

Annexe

Influence électromagnétique



Table des matières

1	Couplage magnétique	2
1.1	Champ magnétique des conducteurs traversés par un courant électrique	2
1.2	Lignes de champ magnétique et effet sur la distance	2
1.3	Induction d'un conducteur traversé par un courant alternatif sur un conducteur voisin	3
1.4	Induction sur deux conducteurs parallèles à différentes distances.....	3
1.5	Comment annuler le courant de circulation $\Delta i \sim ?$	4
1.6	Installation de câble d'allumage correcte et incorrecte.....	4
2	Rayonnement électromagnétique haute fréquence	5
2.1	Propagation des ondes.....	5
2.2	Fréquence et longueur d'onde	5
2.2.1	Classification des fréquences.....	6
2.3	Gain d'antenne	7
2.4	Efficacité de l'antenne réceptrice	8
2.5	Puissance de rayonnement efficace	9
2.5.1	PIRE	9
2.5.2	PAR	9
3	Installations de radiodiffusion et dispositifs radio mobiles en Suisse	9

1 Couplage magnétique

1.1 Champ magnétique des conducteurs traversés par un courant électrique

Lorsqu'un conducteur est traversé par un courant électrique, il se forme un champ magnétique autour du conducteur. Un champ magnétique est un champ capable d'exercer une force sur les particules chargées électriquement et matériaux magnétiques. La force du champ magnétique correspond à l'excitation qu'il peut exercer. Cette force, appelée « excitation magnétique », est représentée par la lettre **H** et s'exprime en **A/m**. Les lignes du champ magnétique décrivent des cercles concentriques autour du fil conducteur, et ce sur toute sa longueur (fig. 3). La force du champ magnétique autour d'un conducteur électrique dépend de la force du courant qui y circule.

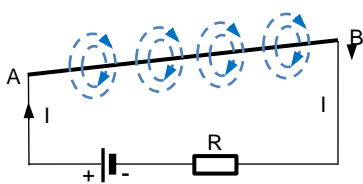
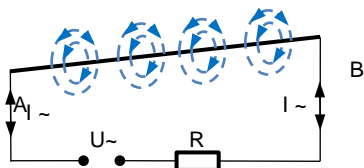


Fig.3



Si un **courant continu** I traverse le conducteur entre A et B (le sens du courant appliqué aux lois électromagnétiques est toujours du plus vers le moins), les lignes de champ circulent dans le sens des aiguilles d'une montre (en regardant de A vers B). Si la polarité de la batterie est inversée, les lignes de champ changent également de direction. La loi suivante est appliquée : si l'on regarde dans le sens de circulation du courant électrique, les lignes de champ circulent autour du conducteur dans le sens des aiguilles d'une montre.

Si un **courant alternatif** $I\sim$ circule dans le conducteur de A à B, il se produit autour du conducteur un champ magnétique variant constamment en force et en direction. Ce champ magnétique alterne au rythme de la fréquence du courant et est appelé « champ magnétique variable ».

1.2 Lignes de champ magnétique et effet sur la distance

La fig. 4 représente la section d'un conducteur de courant continu. Les lignes de champ magnétique circulent en cercles concentriques autour du conducteur. L'intensité des lignes de champ est la plus grande à proximité du conducteur et décroît avec la distance. $\rightarrow H = \frac{I}{2 \cdot \pi \cdot r}$
 L'effet du champ magnétique est appelé « induction magnétique », est représenté par la lettre **B** et s'exprime en Vs/m^2 .
 L'ensemble de l'induction magnétique traversant une surface est appelé « flux », est représenté par la lettre Φ (phi) et s'exprime en Vs. Le flux représente la force du champ magnétique.

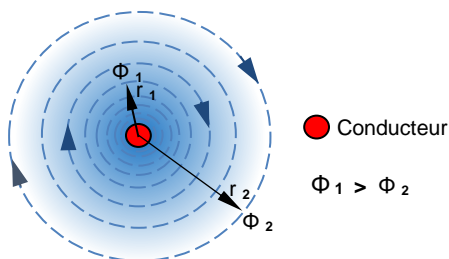
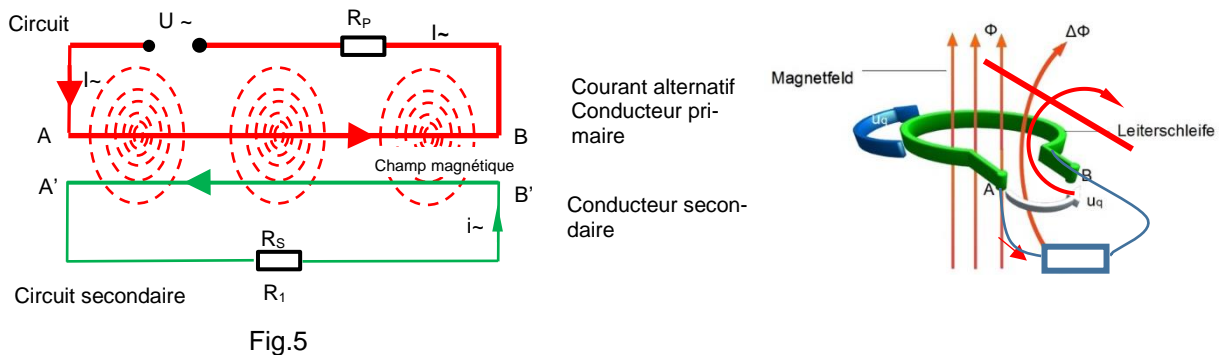


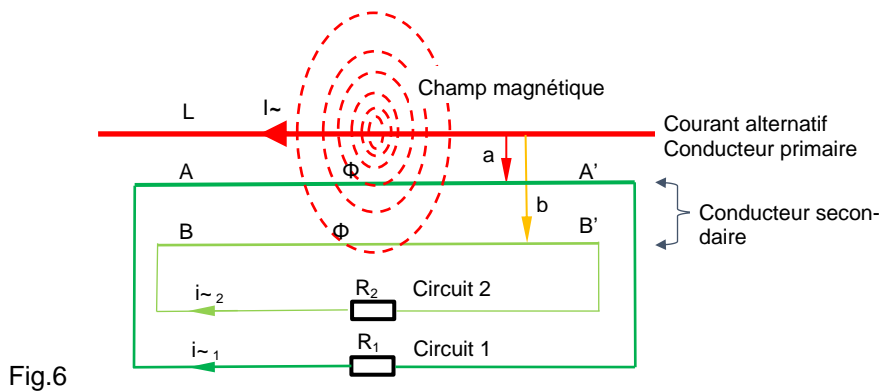
Fig.4

1.3 Induction d'un conducteur traversé par un courant alternatif sur un conducteur voisin

Le conducteur AB (fig.5) est traversé par un courant continu I_{\sim} . Un champ magnétique variable se forme autour de lui. En parallèle du conducteur AB se trouve un second conducteur A'B', lequel est exposé au champ magnétique produit. Selon les lois de l'induction il se forme dans le circuit secondaire fermé un courant induit i_{\sim} . Le courant i_{\sim} est produit en raison des variations constantes du champ magnétique en force et en direction, et le conducteur AB est coupé par les lignes de champ. Un couplage magnétique (induction) a lieu entre le circuit primaire et le circuit secondaire. La tension est directement proportionnelle à la variation de flux : $U = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ Plus le champ magnétique est élevé, plus la surface est importante et plus les variations de champ sont rapides, alors plus la tension produite est élevée. Les champs variables à haute fréquence produisent des tensions plus importantes et les variations rapides du champ magnétique produisent le même effet.



1.4 Induction sur deux conducteurs parallèles à différentes distances



Le conducteur de courant alternatif L_{\sim} induit avec son champ magnétique variable un courant dans les deux conducteurs parallèles voisins AA' et BB'. Il est à noter que les conducteurs AA' et BB' sont positionnés à des distances différentes du conducteur L ($a < b$). Selon les lois de l'induction, un courant induit se forme dans les deux circuits (1 et 2), respectivement $i_{\sim 1}$ et $i_{\sim 2}$. Le champ magnétique variable exercé sur AA' (Φ_1) étant cependant supérieur à celui exercé sur BB' (Φ_2) (voir section 1.2), le courant induit $i_{\sim 1}$ est supérieur à $i_{\sim 2}$. Si les deux conducteurs secondaires se trouvaient à distance égale de L ($a = b$), les deux courants induits seraient également égaux ($i_{\sim 1} = i_{\sim 2}$).

1.5 Comment annuler le courant de circulation Δi_{\sim} ?

Le courant de circulation Δi_{\sim} est annulé lorsque les courants induits $i_{\sim a}$ et $i_{\sim b}$ présentent la même valeur. Dans un tel cas, les deux courants s'annulent, de sorte qu'il ne se trouve aucun courant de circulation dans le conducteur d'allumage. La difficulté consiste à faire sortir les deux fils du circuit d'allumage en même temps de la zone d'action du champ magnétique variable du conducteur primaire. Il s'agit par conséquent d'un « problème de symétrie ».

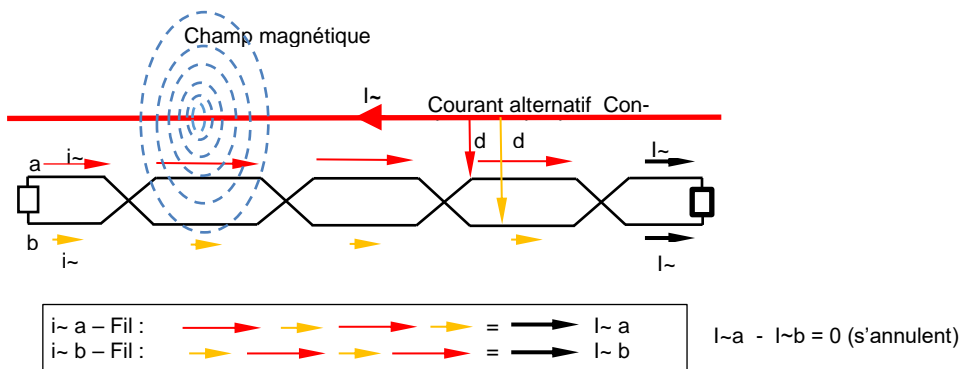


Figure 7

Ce problème peut être résolu en **torsadant** les deux fils du circuit d'allumage. Une autre solution efficace consiste à utiliser un câble d'allumage à deux brins.

En Fig. 7, le conducteur de courant alternatif L_{\sim} exerce, par son champ magnétique variable, un effet d'induction sur les deux conducteurs **parallèles torsadés** voisins. Le torsadage permet d'obtenir un courant identique circulant dans les fils a et b ($I_{\sim a} = I_{\sim b}$). Cela permet d'éviter tout courant induit critique dans les conducteurs d'allumage.

Remarque :
Plus la **configuration du câble d'allumage** est **symétrique**, plus le risque de courant d'induction est faible.

1.6 Installation de câble d'allumage correcte et incorrecte

Exemple de câblage d'un « rideau de volcans » avec 6 volcans en série, avec et sans câblage à boucle à induction.

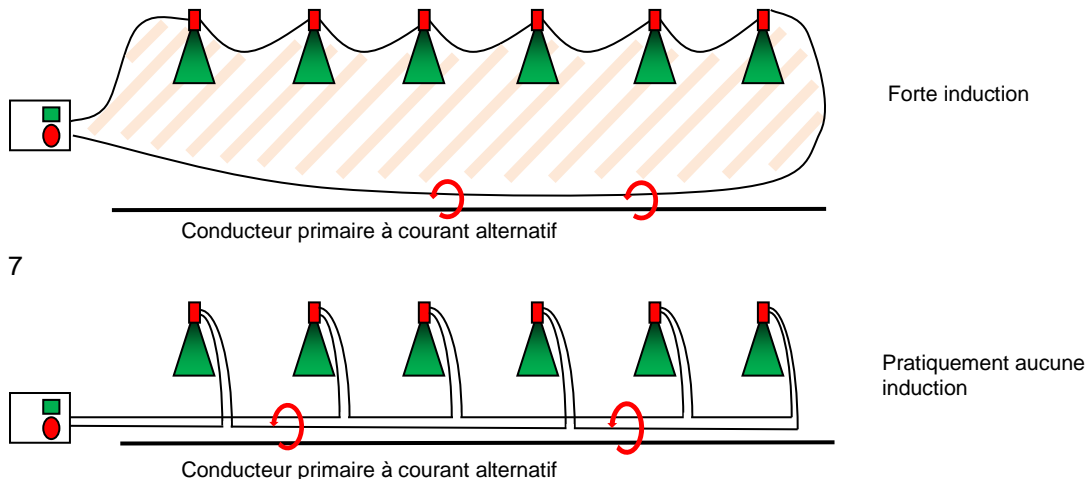


Figure 7

2 Rayonnement électromagnétique haute fréquence

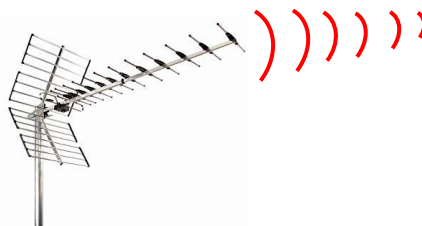
Ordonnance sur les explosifs 941.411

Art. 99 Distances de sécurité par rapport aux installations d'énergie électrique Lors des allumages électriques, les distances de sécurité minimales par rapport à des installations d'énergie électrique (par ex. : émetteurs, installations radar ou lignes à haute tension) indiquées par le fabricant doivent être respectées.

L'ordonnance sur les explosifs ne propose aucune réglementation spécifique relative à l'observation des distances minimales entre l'unité d'allumage électrique et les appareils émetteurs de hautes fréquences.

2.1 Propagation des ondes

Le rôle d'une antenne est de propager des signaux électriques haute fréquence sous forme de champ électromagnétique.



Toutes les antennes émettrices des grands opérateurs de radio et télévision, antennes de téléphones portables ou de talkiewalkies envoient des rayonnements dits électromagnétiques à hautes fréquences.

Les antennes émettrices et réceptrices ne présentent pas de différences majeures. Une bonne antenne émettrice est également toujours une bonne réceptrice.

Lorsque les rayonnements électromagnétiques rencontrent des fils métalliques tels que les fils ou câbles d'allumage, ils produisent des courants électriques dans ces conducteurs, comme dans une antenne réceptrice. Ces courants sont généralement très faibles. La force des courants électriques induits est directement influencée à la puissance de l'émetteur, à la fréquence et à la distance entre le circuit d'allumage et l'émetteur. La force des courants induits dépend de nombreux paramètres tels que l'orientation et la composition du circuit d'allumage, ou encore la longueur des fils d'allumage et leur hauteur au-dessus du sol.

2.2 Fréquence et longueur d'onde

Il existe une relation physique directe entre la fréquence f et la longueur d'onde λ (lambda) d'une oscillation.

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

	Signe	Unité
Fréquence	f	Hz = 1/s
Longueur d'onde	λ	m
Vitesse de la lumière	c	m/s

Les ondes électromagnétiques telles qu'on les rencontre dans la transmission radio se propagent dans l'espace à la vitesse de la lumière ($\sim 300\,000\text{ km/s} = 300\,000\,000\text{ m/s}$).

La longueur d'onde λ se calcule en divisant la vitesse de la lumière c par la fréquence f .

Exemple : Un émetteur de radio FM envoie une onde à une fréquence de 100 MHz. Selon la formule décrite, la longueur d'onde λ s'élève à $300 \cdot 10^6 / 100 \cdot 10^6 \rightarrow 300 / 100 = 3\text{ m}$

2.2.1 Classification des fréquences

Abrév.	Désignation	Plage de fréquences	Longueur d'onde	Utilisation technique
EBF	Extrêmement basses fréquences	3–30 Hz	100–10 Mm	Réseau électrique ferroviaire
EBF	Extrêmement basses fréquences	30–300 Hz	10–1 Mm	Réseau électrique, (autrefois) communication des sous-marins jusqu'à 300 m de profondeur
ULF	Ultra-basses fréquences	0,3–3 kHz	1000–100 km	
VLF	Très basses fréquences	3–30 kHz	100–10 km	Communication des sous-marins jusqu'à 30 m de profondeur, pulsomètres
LF	Basses fréquences	30–300 kHz	10–1 km	Radio basses fréquences, émetteurs de signaux horaires/horloges radio-pilotées, navigation côtière, radioamateurs
MF	Moyennes fréquences	0,3–3 MHz	1000–100 m	Radios moyennes fréquences, radiocommunication aéronautique militaire (en partie), détecteurs de victimes d'avalanches, radioamateurs
HF	Hautes fréquences	3–30 MHz	100–10 m	Radios hautes fréquences (en partie), ondes limites, radioamateurs, RFID
VHF	Très hautes fréquences	30–300 MHz	10–1 m	Télévision, radionavigation, radiocommunication aéronautique, radio VHF, DAB+, DVB-C, radars, radiocommunication des autorités de sécurité (Allemagne), radioamateurs, radiocommunication maritime, AIS
UHF	Ultra-hautes fréquences	0,3–3 GHz	10–1 dm	Télévision, fours à micro-ondes, WLAN, Bluetooth, DVB-T, DVB-T2, DVB-C, DAB+, LTE
	<i>Ondes centrimétriques</i>	3–30 GHz	10–1 cm	Radars, faisceau hertzien, radiocommunication par satellite, WLAN, RTLS, Short Range Devices, radioamateurs, spectroscopie par résonance paramagnétique électronique (EPR)
	<i>Ondes millimétriques</i>	30–300 GHz	10–1 mm	Radars, faisceau hertzien, radioamateurs, Wireless Gigabit

En Suisse, seuls les radioamateurs de moindre envergure sont encore actifs.

Spectre audible

2.3 Gain d'antenne

Si le rayonnement est émis de manière homogène (isotrope) dans toutes les directions, l'antenne affiche un facteur de gain $G=1$. Dans un tel cas, la puissance isotrope rayonnée équivalente (PIRE) de l'émetteur est identique à la puissance P de l'émetteur, en watts, alimentée dans l'antenne.

La puissance alimentée dans une antenne est toujours rayonnée de manière dirigée, au sein d'un angle solide limité. Il n'existe pas d'émetteur à rayonnement sphérique (fig. 8) pour les ondes électromagnétiques. Toutes les antennes affichent des caractéristiques de directivité plus ou moins marquées. La puissance du rayonnement se concentre dans un certain angle solide, comme illustré en fig. 9. Aussi décrit-on les caractéristiques de rayonnement d'une antenne à l'aide de ce que l'on appelle un diagramme de rayonnement fig.9.

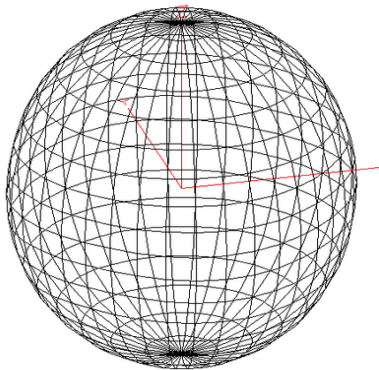


Fig.8 Rayonnement isotrope

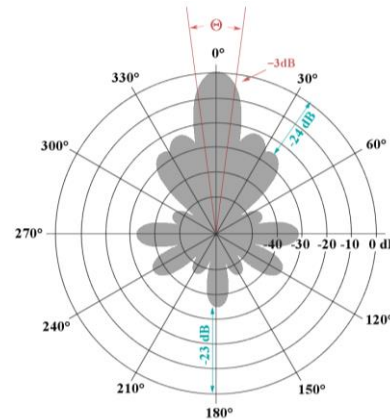


Fig.9 Diagramme de rayonnement

Fig.9 : Gain d'antenne résultant de la concentration du rayonnement dans un angle solide. Pour cette antenne, l'on obtient un gain de 60 dB et un angle solide d'environ 14°.

Remarque : 3 dB correspondent à un doublement ou une réduction de moitié de la puissance
6 dB correspondent à un doublement de la portée

Les antennes présentent communément un lobe principal correspondant à la direction d'émission de la majorité de l'énergie. L'on définit le lieu présentant la plus forte puissance d'émission (en anglais : *line of shoot*) à une distance donnée. La valeur mesurée est comparée avec la valeur théorique pour un émetteur de rayonnement isotrope à la même distance. Le rapport est appelé « gain d'antenne » G . Une antenne affichant un gain $G = 10$ présente ainsi, dans le lobe principal, une puissance de rayonnement dix fois supérieure à celle d'un émetteur isotrope de même puissance. Ce gain de puissance rayonnée dans le lobe principal intervient bien entendu en parallèle avec une réduction de la puissance rayonnée dans les autres directions.

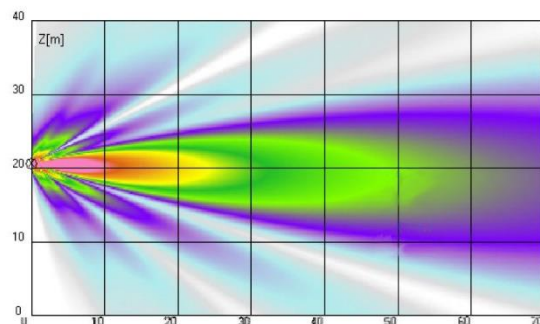
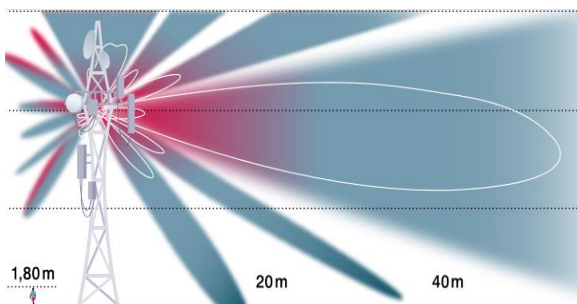


Diagramme de rayonnement possible

Exemple de gain d'antenne

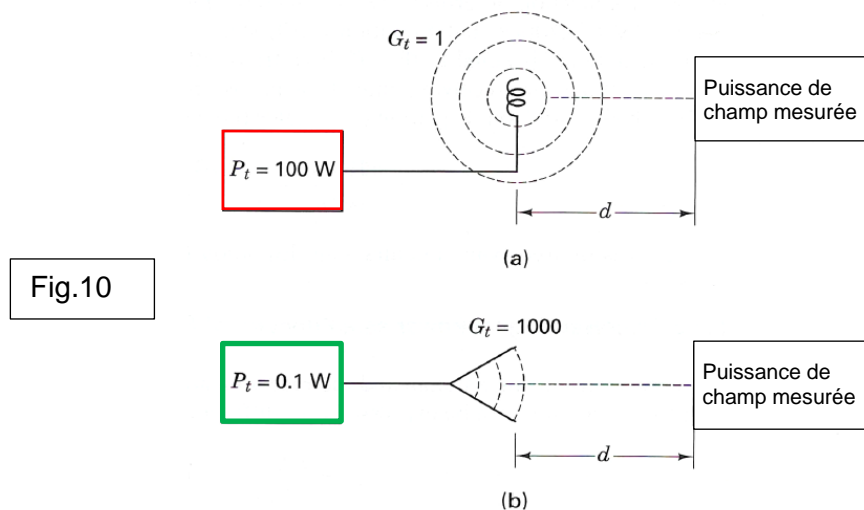
Un émetteur VHF d'une puissance de sortie de 200 watts est connecté à une antenne directrice de gain $G = 10$ (par rapport à un émetteur isotrope). Quelle est la PIRE de l'antenne ?

Solution : Gain $G = 10$, soit un facteur de 10 appliqué à la puissance.

$$P_{\text{PIRE}} = 200 \text{ W} \cdot 10 = 2000 \text{ W}$$

Les 200 watts de l'émetteur ont été convertis en 2000 watts de puissance de rayonnement « directionnel ».

Dans la pratique, cela signifie que, pour obtenir une même puissance au niveau d'un point de réception, l'on peut combiner soit un émetteur haute puissance avec une antenne omnidirectionnelle (a), soit un émetteur moins puissant avec une antenne directionnelle présentant un gain (b) (cf. fig.10).



2.4 Efficacité de l'antenne réceptrice

La taille d'une antenne doit toujours être dimensionnée en fonction de la moitié de la longueur d'onde λ à réceptionner. Si une antenne est nettement inférieure au quart de la longueur d'onde, sa résistance au rayonnement est très faible, et son efficacité réduite en conséquence.

Les antennes long fil affichent une efficacité particulièrement médiocre, en particulier en cas d'installation à faible hauteur au-dessus du sol.

Les antennes long fil non ajustées atteignent rarement une efficacité supérieure à 1 %.

La hauteur d'installation de l'antenne au-dessus du sol est cruciale pour les propriétés de réception, en particulier pour les fréquences $< 30 \text{ MHz}$. Elle doit être prise en compte jusqu'à 300 MHz ($h < 2 \lambda$).

2.5 Puissance de rayonnement efficace

2.5.1 PIRE

La *puissance isotrope rayonnée équivalente* (PIRE), correspond à la puissance d'un rayonnement haute fréquence émis par un émetteur isotrope.

La relation entre la puissance d'émission P , le gain de l'antenne émettrice et l'efficacité de rayonnement est exprimée de la manière suivante :

$$PIRE = P_s \times G_i$$

P_s = puissance alimentée dans l'antenne (en watts)

G_i = Facteur de gain de l'antenne par rapport à un émetteur isotrope

La formule signifie : pour obtenir une puissance équivalente à celle d'un émetteur isotrope P_{PIRE} , la puissance de l'émetteur doit être multipliée par le facteur de gain $G_{\text{antenne isotrope}}$.

2.5.2 PAR

La puissance apparente rayonnée (PAR) est utilisée en tant que valeur de référence pour le gain d'antenne des dipôles demi-onde ($\lambda/2$).

$$PAR = P_s \times G_d$$

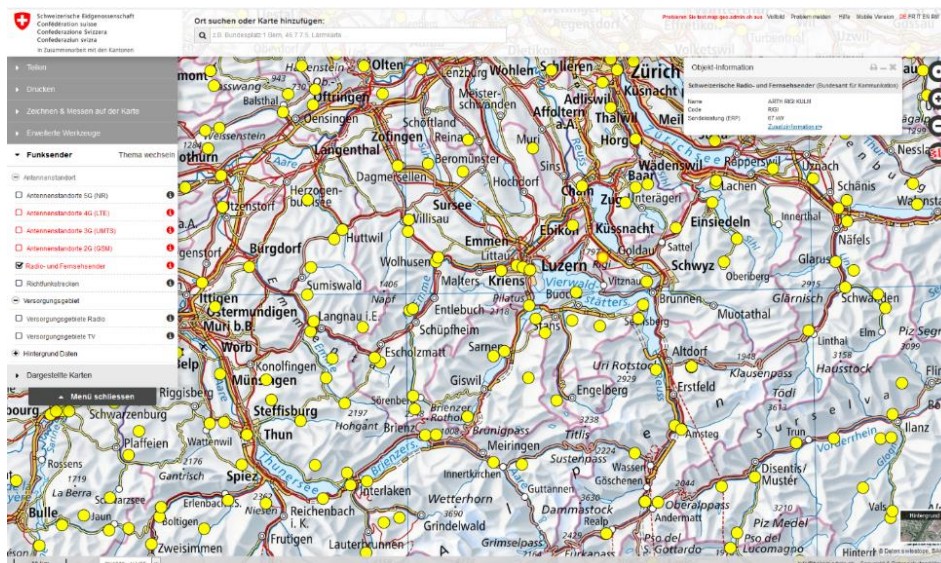
P_s = puissance alimentée dans l'antenne (en watts)

G_d = facteur de gain d'antenne par rapport à un dipôle demi-onde

La différence en matière de gain d'antenne G entre l'émetteur isotrope et le dipôle $\lambda/2$ pris en référence s'élève à environ 1,64.

3 Installations de radiodiffusion et dispositifs radio mobiles en Suisse

Le portail map.geo.admin.ch permet de visualiser tous les émetteurs radio de Suisse avec qu'un certain nombre d'informations techniques à leur sujet.



Lien : <https://map.geo.admin.ch>