Qu'est-ce que l'impedance ?
ou les 5 familles d'impedances du radioamateur

Jean-Pierre Bourdier F6FQX

Le concept d'impédance fait partie des notions de base en électricité et en radio. Il semble donc aller de soi, alors qu'en fait il fait parfois l'objet de contresens qui, poussés à l'extrême, débouchent sur des absurdités (cas de l'antenne E-H). Un peu de retour aux sources permet d'y voir plus clair.

NOTE DE L'AUTEUR :

Cet article est un peu particulier car il contient les remarques de mes relecteurs (en bleu) qui ont endossé le rôle de « candide ». J'aurais pu modifier l'article, mais en gardant l'original j'ai voulu ainsi montrer que bien que le sujet semble élémentaire, les manières de l'aborder peuvent être différentes selon les auteurs.
Et paraphrasant un célèbre humoriste (Sempé) : « en électronique, comme ailleurs, rien n'est simple, et tout se complique ».

L'IMPÉDANCE

Le mot lui-même a été, en français emprunté à l'anglais, comme beaucoup de substantifs en « ance ». Son étymologie antérieure est amusante. Il vient du mot latin « impedimenta » qui signifiait « bagages ». D'ailleurs, en français jusqu'au début du XX^{ème} siècle, on appelait « impedimenta » ou « impédiments » les bagages qui ralentissaient la marche d'une armée en campagne. Un siècle plus tard, seul « impedimenta » subsiste, et uniquement dans la langue littéraire, pour désigner « ce qui entrave l'activité ou le mouvement » en général. Voir sur la *figure 1* un exemple d'empêchement bien connu du chef d'un célèbre petit village gaulois.

Dans ce qui suit, pour simplifier, nous ne nous intéresserons qu'à des courants dits « harmoniques » (fonctions périodiques sinusoïdales du temps), monochromatiques (une seule fréquence), monophasés, ainsi qu'à des milieux isotropes et homogènes (mêmes propriétés en tout point et dans toutes les directi ons) [1], et qu'au domaine familier au radioamateur (valeurs maximales = quelques centaines de MHz pour les fréquences, quelques dizaines de Watts pour les puissances, quelques Ampères pour les intensités et quelques dizaines de Volts pour les tensions).

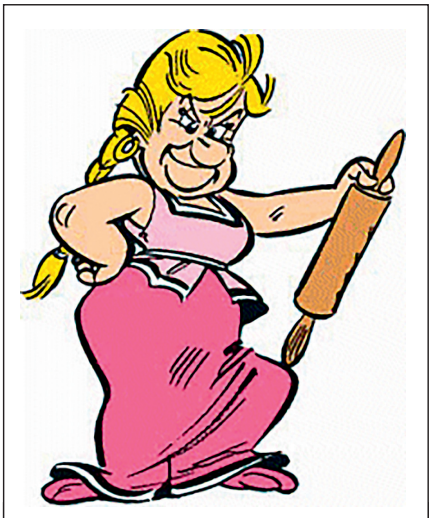

Figure 1 : « Impedimenta » (empêchement), la « Bonnemine » des OM espagnols

(1) F5NB : Par exemple, l'ionosphère est un milieu non isotrope et non homogène (dispersif) et la notion d'impédance (au sens « impédance du milieu ») ne s'y applique pas.

L'IMPÉDANCE ET LE RADIOAMATEUR

Le radioamateur croise « sur son chemin » 5 familles d'impédance, très différentes les unes des autres (comme l'étaient les carottes et les navets qu'on nous a appris à ne pas ajouter à l'école communale), mais ayant un caractère commun fondamental (carottes et navets, bien que différents, ont en commun d'être des légumes) [2].

Ce caractère fondamental, dans le cas des impédances, est de « représenter la contrainte qu'impose l'objet aux phénomènes électromagnétiques qu'on lui impose ».
Nous expliciterons ce caractère en détail au fur et à mesure pour les différentes familles d'impédances.

(2) (F5NB) On a le droit d'ajouter 10 carottes et 20 navets pour faire 30 légumes. Puis ajouter 30 légumes et 10 légumes pour faire 40 légumes. Mais à partir de 40 légumes, on n'a aucun moyen de retrouver le nombre de carottes et de navets, sauf si leur rapport dans la famille des légumes est une constante, et en précisant qu'il ne puisse y avoir que des carottes et des navets dans les légumes.

Ces 5 familles sont, dans l'ordre où nous allons les examiner :

- l'impédance « simple » d'une charge (rapport U/I mesuré au contrôleur)
- l'impédance « complexe » d'une charge (module et phase mesurés à l'oscilloscope)
- l'impédance d'une source, « simple » ou « complexe »
- l'impédance d'une ligne, « simple » dans le cas qui intéresse le radioamateur
- l'impédance du vide, « simple » dans le cas qui intéresse le radioamateur

1 - L'IMPÉDANCE « SIMPLE » D'UNE CHARGE

On dispose d'une charge et d'une source, qui sont des « boîtes noires », l'une marquée « source », l'autre marquée « charge ». On les raccorde, puis on mesure avec un contrôleur le courant I_e (en Ampères) dans le circuit, et la tension U_e (en Volts) aux bornes de la charge (et donc de la source) (voir *figure* 2).

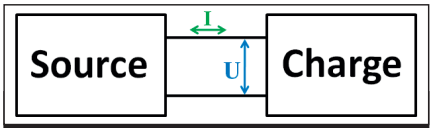

Figure 2 : Détermination de l'impédance

Par définition, le rapport U_e/I_e (en Ohms) est appelé « **impédance de la charge** ». Il s'agit donc d'un nombre positif, « **mesurant à quel point la charge s'oppose au passage du courant** », puisque « **plus l'impédance est élevée, moins le courant passe** », avec une source donnée.

Noter que si la fréquence du courant est nulle (courant continu), l'impédance est appelée « **résistance** », le terme « **impédance** » étant réservé au courant alternatif.

2 - IMPÉDANCE « COMPLEXE » D'UNE CHARGE

« Impédance » suppose un courant alternatif de période **T** et de fréquence **F = 1/T**. Même charge et même source raccordées comme précédemment, mais on fait cette fois les mesures avec un oscilloscope.
On voit alors deux courbes sinusoïdales décalées. Les amplitudes de ces deux courbes nous donnent les valeurs crêtes de l'intensité I_c et de la tension U_c. Le décalage entre elles nous donne la phase **φ** (phi) quand on l'exprime avec un angle compris entre **-π/2** et **+π/2** (voir *figure 3*) [3].
Par définition, on appelle « **magnitude de l'impédance de la charge** » le rapport Uc/Ic (qui est égal au rapport U_e/I_e) et « **phase de l'impédance de la charge** » l'écart de phase **φ**.

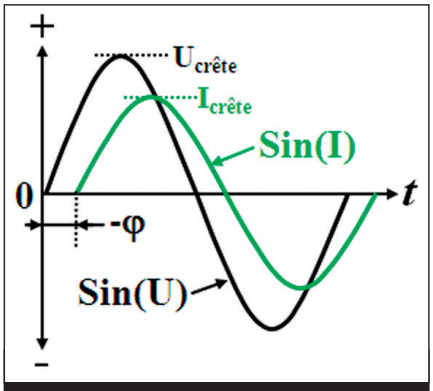

Figure 3 : Tension, courant et leur déphasage

On voit que l'impédance est devenue un nombre complexe, c'est-à-dire un couple de deux nombres réels (module et phase). Or, on sait qu'un tel nombre complexe, qu'on écrit habituellement **Z = [M,φ]** (module, phase) s'écrit aussi sous forme de deux autres nombres réels **Z = (R,X)** dont on dit que le premier **R** est la partie réelle de **Z** et le second **X** sa partie imaginaire. Cette dernière formule peut s'écrire sous une autre forme plus utilisée et qui facilite les calculs : **Z = R+j.X** formulation dans laquelle j est un nombre imaginaire égal à la racine carrée du nombre réel **[-1]** (ceci est impossible avec un nombre réel, c'est pourquoi on l'appelle « imaginaire ») [4].

Ces différentes écritures de l'impédance, comme souvent en mathématiques, ne sont que des formulations compactes, résumant les propriétés constatées :

- Plus le module de Z est élevé, et plus la charge s'oppose au passage du courant.
- Si la phase de Z est nulle, la charge est une résistance pure.
- Si la phase de Z est égale à ±π/2 (±90°), la charge est une réactance pure.

(3) F6BPS : Si l'on mesure un angle plus grand, c'est que l'on a inversé la source et la charge dans la mesure. C'est-à-dire que ce que nous avions nommé « Charge » est en fait le générateur et ce que nous avions appelé « Générateur » est en réalité la charge.

(4) F5NB : Pour calculer Z (la magnitude), il faut « supprimer » le nombre imaginaire j. Ceci se fait, grâce à sa propriété d'être la racine de -1, en élevant les termes R et X au carré puis en prenant la racine carrée du résultat (théorème de Pythagore). Voir sur la *figure 4* une représentation graphique des paramètres de l'impédance avec leurs relations.

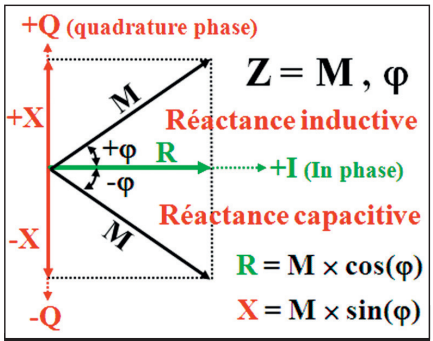

Figure 4 : Les paramètres de l'impédance

3 - IMPÉDANCE D'UNE SOURCE, « SIMPLE » OU « COMPLEXE »

On débranche source et charge.
On ne branche rien sur la source. On mesure la tension aux bornes de la source avec un contrôleur et on trouve une valeur égale à **Ueff**, puis à l'aide d'un oscilloscope, on mesure une valeur (maximum - minimum) égale à **Ucàc**.

On vérifie bien que :
Ucàc = Ueff × 2,828.

On met maintenant la source en court-circuit et on mesure l'intensité qui circule dans ce court-circuit d'une part au contrôleur (on trouve **Ieff**) d'autre part à l'oscilloscope (on trouve une valeur crête à crête **Icàc**).

On vérifie bien que :
Icàc = Ieff × 2,828.

Le rapport **Ucàc/Icàc** est, bien sûr, égal au rapport **Ueff/Ieff**, il s'agit donc d'un nombre positif, « **mesurant à quel point la source s'oppose au passage du courant** », puisque « **plus ce rapport est élevé, moins le courant passe** ». Ce rapport est appelé « **impédance interne de la source** ». Si la fréquence du courant est nulle (courant continu), l'impédance interne est appelée « **résistance interne** » [5].

(5) F5NB : Effectivement, cette méthode de mesure est enseignée dans toutes les écoles de France et de Navarre, mais elle n'est pas employée systématiquement dans l'industrie. Prenons un premier cas simple avec la mesure de la résistance interne d'une pile :
Soit une pile de 1,5V, tension spécifiée pour un courant dans la charge de 50 mA.

Calculons R1 = 1,5 /0,05 = 30 Ω et R2 = 2×R1 = **60 Ω** (valeurs des résistances pas critiques).

Connectons une résistance de 30 Ω aux bornes de la pile.

Nous mesurons U1= 1,52 V et I1 = 0,0507 A.

Connectons maintenant une résistance de 60 Ω aux bornes de la pile.

Nous mesurons U2 = 1,56 V et I2 = 0,026 A.

Alors Ri = (U1-U2) / (I1 - I2), soit ici 1,62 Ω.

On peut calculer U à vide = 1,602 V et contrôler que l'on n'a pas fait d'erreur.

On peut aussi calculer un courant **théorique** de court-circuit, soit ici 1,602 / 1,62 = 0,99A.

Si l'on avait voulu faire la mesure du courant de court-circuit, que se serait-il passé, à votre avis ? (mesure à faire en s'éloignant de la pile).

Notez que si R1 et R2 sont étalonnées, on peut se passer de la mesure de I en appliquant la loi d'Ohm (I = U/R).

La méthode du court-circuit peut conduire aussi à une impossibilité : on peut très bien avoir une source de tension ayant une impédance interne extrêmement faible comme une alimentation stabilisée ou un amplificateur audio. Alors on s'aperçoit que le courant de court-circuit ne peut tendre vers l'infini.

La sécurité de l'appareil empêche la mesure (saturation en courant). De même avec une source de courant et sa saturation en tension.

Deuxième exemple : Une source idéale peut être modélisée par une source de tension en série avec une résistance interne. Si ce modèle peut convenir à une pile ou à une batterie (avec les réserves que l'on a vues), en radio et en électronique, les sources HF, n'ont pas grand chose à voir avec ces sources idéales, sauf peut-être les « bons » générateurs HF.
Donc la méthode de mesure de l'impédance d'une source HF est très compliquée. Et il n'y a pas qu'une méthode, mais plusieurs. Je peux dire par exemple que vouloir mesurer l'impédance de sortie d'un émetteur HF en classe AB est une gageure. Et puis, quelle impédance ? Car elle varie avec le niveau de sortie.

Les générateurs HF (au sens large) ne sont pas des sources linéaires.
Une antenne de réception, oui.
Avec un amplificateur en classe A et 10 % de rendement (en pratique), on s'en approche au plus près.
La mesure de l'impédance de sortie d'un émetteur HF ne peut se faire que dynamiquement. Je vais résumer la méthode que j'ai employée professionnellement (sans être sûr de détenir la vérité absolue) : il faut d'abord déterminer et compenser la partie réactive puis ensuite appliquer la méthode expliquée plus haut pour une pile (mais avec un plus faible rapport entre les résistances de charge pour ne pas modifier les paramètres de l'amplificateur).
Faire cette mesure pour différentes puissances et réitérer la procédure pour toutes les fréquences (c'est long).

Je redonne la plume à F6FQX (qui ne m'avait pas encore lu).

Deux remarques importantes :
a) Comme pour la mesure de l'impédance de charge, il a fallu deux mesures (une d'intensité et une de tension) pour déterminer l'impédance de la source.
En revanche, contrairement au cas de la charge, les deux mesures sur la source ont été faites dans deux configurations différentes (circuit ouvert, puis court-circuit) [6].
La détermination de l'impédance d'une source est toujours plus difficile que celle d'une charge (a fortiori compte tenu de ce qui est dit en (b) ci-après).

b) L'impédance de la source ainsi calculée est une « impédance simple ». Or, on conçoit bien que, comme dans le cas de la charge, cette impédance simple soit en fait le module de « l'impédance complexe » de la source (la magnitude). Mais on voit aussi que la même mesure à l'oscilloscope n'est pas possible puisque tension et intensité ne correspondent pas alors à la même configuration. Disons que la détermination de « l'impédance complexe » d'une source, sous forme Z = [module, phase] = [R, X] = [R+j.X] est possible à partir de plusieurs mesures et de calculs, en faisant l'hypothèse que la source équivaut à une « source fictive d'impédance nulle offrant une tension efficace Ueff à ses bornes » en série avec une « impédance fictive Z » [7].

(6) F6BPS : Parce que nous n'avons pas accès à ce point indéfini qui relie le générateur parfait, pourvu d'une simple f.é.m., à son impédance associée.

(7) F5NB : Ce modèle de la source de tension idéale avec résistance interne série ne préjuge pas de la nature de la source réelle qui peut aussi bien être une source de tension qu'une source de courant avec sa résistance interne en parallèle.
Ici, le modèle correspond à la définition d'une impédance.
Celle-ci n'est pas valable pour une source de courant. On doit utiliser la notion d'admittance qui est l'inverse de l'impédance (Y = 1/Z). Ainsi quand on donne l'impédance d'une source, rien ne permet, sans autre information, de savoir ce qu'il y a réellement « dans la boîte noire » de F6FQX.
Tout ceci a été développé dans une série de « Comment ça marche » publiée dans Radio-REF ces derniers mois.

4 - IMPÉDANCE DE LA SOURCE ET IMPÉDANCE DE LA CHARGE NE DÉPENDENT PAS L'UNE DE L'AUTRE

Que l'impédance de la source ne dépende pas de celle de la charge est évident puisque la mesure de l'impédance de la source se fait indépendamment de tout raccordement à une charge (court-circuit puis circuit ouvert) [8].

En revanche, la réciproque ne va pas de soi puisque les mesures sur la charge se font avec une source raccordée. On peut se demander si, avec des sources différentes, on obtiendrait les mêmes résultats côté charge.

Certains radioamateurs le croient, par exemple les promoteurs de l'antenne E-H. Cette vision erronée pourrait être appelée le « syndrome de la boîte de couplage », puisqu'en installant une telle boîte à la sortie de son émetteur (la source), on accorde son antenne (la charge),
cela ne signifie-t-il pas qu'on a modifié l'impédance de l'antenne (la charge) en modifiant celle de l'émetteur (la source) ? En fait, non, car la mesure de la tension et de l'intensité aux bornes de l'antenne donnerait certes des valeurs différentes suivant qu'il y a coupleur ou non, mais le rapport des deux ne changerait pas, pas plus que ne changeraient la phase, la partie réelle et la partie imaginaire.
L'impédance de la charge est une caractéristique de cette charge, indépendamment de la façon dont on l'alimente [9].

(8) F5NB : Sans aller vers ces extrema (0 et ∞), mon exemple de mesure de la résistance interne d'une pile confirme qu'elle peut aussi se faire à partir d'un delta de l'impédance de charge, quel que soit ce delta.

(9) F6BPS : Et elle ne modifie pas davantage l'impédance interne de la source (l'émetteur).

F5NB : Dit autrement : si l'on impose une tension aux bornes de la charge, c'est celle-ci qui impose le courant. Et si l'on impose le courant, c'est la charge qui impose la tension.
On ne peut pas imposer à la fois la tension et le courant dans une charge comme voudrait nous le faire croire l'inventeur de l'antenne E-H.

5 - IMPÉDANCE D'UNE LIGNE

Depuis une cinquantaine d'années, le câble « coaxial de 50 Ohms d'impédance » s'est peu à peu imposé comme ligne de transmission de référence chez les radioamateurs.
La notion d'impédance d'une ligne est différente de celle d'une charge ou d'une source. Sa mesure est d'ailleurs plus compliquée.
Plusieurs méthodes sont cependant possibles, dont :

- Le calcul à partir de la géométrie et des caractéristiques du diélectrique.
- La mesure des maxima de tension et de courant le long de la ligne (Z = Umax/Imax).
- La recherche du ROS minimal en faisant varier la charge R terminale (Z = R à ROS = 1) [10].

On retrouve donc dans l'impédance d'une ligne le même caractère de contrainte imposée par la ligne au transit d'énergie électromagnétique.
Il s'agit d'un nombre « simple », encore qu'on fasse intervenir des « lignes à impédance complexe » quand on évoque des lignes à fortes pertes, mais on sort du domaine radioamateur.

La même remarque sur l'indépendance de l'impédance d'une ligne par rapport à ce qui lui est raccordé, à l'aval comme à l'amont, s'impose. En particulier, une boîte de couplage entre émetteur et ligne ne modifie en rien l'impédance de la dite ligne, pas plus que cela n'y modifie le R.O.S.

(10) F5NB : Cette mesure n'est pas valide. En effet, pour qu'elle le soit, il faudrait que le ROS-mètre ait son impédance nominale égale à celle de la ligne. Or cette dernière est encore inconnue !
La véritable méthode consiste à mesurer l'impédance d'entrée d'un tronçon de ligne égal à **λ/4** (ou un multiple impair). En faisant varier Rc, quand l'impédance d'entrée Re est égale à Rc, alors c'est l'impédance Zo nominale de la ligne. Un peu de mathématiques : sachant que pour un quart d'onde **$Ze = Zo^2 / Zc$**, on voit que Ze n'est égal à Zc que si Zo est lui aussi égal à Zc. Cette mesure reste valable quelles que soient les pertes. À la limite, quand il y a beaucoup de pertes Zo = Ze, quelle que soit Zc. Méthode bien connue pour mesurer l'impédance d'un long rouleau de câble coaxial.

N.B. : les mesures sont faciles car dans ce cas (λ/4 et Rc) toutes les impédances sont résistives pures.

6 - IMPÉDANCE DU VIDE :

Cette notion n'est familière aux radioamateurs que pour autant qu'ils s'intéressent au champ électromagnétique que leurs antennes rayonnent ou captent, mais il y a fort à parier que l'intérêt pour ce sujet ira croissant avec le développement des CPL et des réglementations invoquant des risques sanitaires éventuels pour restreindre les rayonnements, et par suite l'activité radio elle-même.

Disons simplement que le champ rayonné **à grande distance** comporte une composante magnétique H exprimée en ampères par mètre, et une composante électrique E exprimée en volts par mètre.
Leurs mesures respectives, plutôt difficiles, ne présentent pas d'intérêt puisque le rapport E/H est constant dans le vide (ou l'air, à peu près) et vaut **$120 \times \pi = 377\ \Omega$**.

Ce rapport E/H est appelé « **impédance du vide** ». On retrouve encore l'idée que « le milieu contraint le passage de l'énergie électromagnétique » puisqu'à H donné, E est imposé, et réciproquement.

Là aussi, on voit parfois émerger des idées fausses, telles que celles d'ondes qui, selon les antennes qui les produisent, seraient plus riches en E ou en H, etc. Or, l'impédance du vide est là pour rappeler que, même dans le vide, on ne fait pas ce que l'on veut en matière électromagnétique.

CONCLUSION

F5NB : Cet article de facture non conventionnelle, montre le processus d'élaboration d'un article de vulgarisation. Quand on lit un article dans sa version définitive, on n'imagine pas ce processus, fait quelquefois d'innombrables allers et retours entre l'auteur et ses relecteurs pour trouver le mot juste, la bonne formule, tout en restant accessible au plus grand nombre.

Merci à Jean-Pierre, F6FQX de s'être prêté à ce petit jeu. C'est d'autant plus courageux (ou inconscient) que d'habitude les lignes bleues sont de son fait et pas du mien. Mais ici il est tombé en plein dans mon expérience professionnelle.

Après les fleurs, les critiques.
A la énième relecture, deux remarques me sont venues (11). La première est celle-ci : F6FQX n'a pas parlé d'une impédance de source négative et la seconde : il n'a pas dit comment mesurer l'impédance complexe d'une source, mais seulement qu'elle était complexe aussi à faire. Moi je dis « peut-être pas autant que cela ». Alors, le traitement de ces deux sujets fera l'objet d'un prochain article.

(11) J'entends la réflexion de F6BPS : « Ça, c'est bien du F5NB. »
Au radio-club, il ne peut pas assister à un cours de formation à la licence sur la loi d'Ohm sans interrompre l'OM prof avec une petite phrase du genre « Es-tu bien sûr que cela se passe toujours comme ça ? »

Patatras ! « Elève F5NB, dehors ! Ne perturbez pas vos petits camarades ». J'ai eu ensuite le droit d'assister aux cours, mais à condition de rester muet (j'ai toujours été un incompris).

Cabine téléphonique récupérée par le radioclub pour isoler F5NB lors des cours de formation à la licence.

LA BOUTIQUE DU REF.

La boutique est un service de l'association à votre disposition.
Vous y trouverez de multiples articles (livres, QLS, cartes, reliures, DVD, etc.),
un choix divers et varié pour vous aider à une meilleure pratique de notre hobby.
Service Fournitures : tél : 02 47 41 88 73 - email : fournitures@r-e-f.org
Le bon de commande se trouve sur le site WEB (onglet Services/La boutique du REF).