

Formation Technique F4 & F8 Les courants

Formation Technique F4 & F8 – Les courants

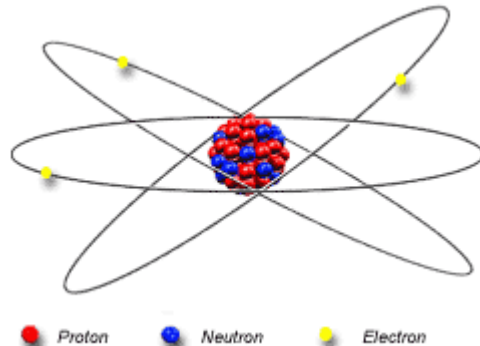
Deux grandeurs à définir, U et I

Il y a deux grandeurs importantes que nous manipulerons sans cesse, il s'agit de la **tension U** et de **l'intensité du courant I**. Mais avant d'en arriver là, nous allons faire un bref rappel sur la matière.

L'atome :

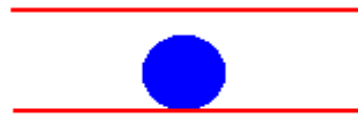
Toute la matière, qu'elle soit inerte ou vivante, est composée d'atomes (du grec Atomos, qu'on ne peut pas diviser). L'atome est formé d'un noyau et d'électrons qui tournent autour de lui.

Le noyau, comme vous pouvez le voir sur l'animation à droite est lui-même constitué de neutrons et de protons. Les protons portent une charge positive tandis que les neutrons sont, comme leur nom l'indique, neutres électriquement, c'est à dire qu'ils ne portent pas de charge électrique. L'électron quant à lui porte une charge négative. Globalement, les atomes sont neutres, les charges positives égalant les charges négatives, toutefois sous certaines conditions on peut ajouter ou retrancher un ou plusieurs électrons à un atome. On imagine facilement qu'après cette opération, l'atome ne sera plus neutre électriquement mais positif s'il a perdu un électron ou négatif s'il a gagné un électron. Il ne s'appellera plus d'ailleurs atome mais ION.



Passons à l'électricité :

Prenons une analogie simple : supposons que vous soyez assez habile pour faire tenir en équilibre une bille dans un tube. Si vous maintenez le tube bien horizontal, la bille est immobile, à peine frémissez-vous que la bille se met en mouvement, parallèlement vous observez que ce mouvement n'est possible que dans la mesure où vous inclinez le tube. Vous avez donc créé une différence de niveau pour mettre en mouvement la bille. En électricité, il en va de même, pour faire circuler des électrons (le courant) on a besoin de produire préalablement une différence de potentiel (la tension).



A quoi est due cette tension ?

A l'accumulation de charges positives d'un côté et à l'accumulation de charges négatives de l'autre. Un pôle est chargé positivement, le +, l'autre négativement, le -. Tant que ces deux pôles ne sont pas réunis, aucun courant ne circule.

Vous connaissez une foultitude de systèmes capables de générer cette tension : ex une batterie de voiture, une pile, le secteur domestique, des panneaux solaires etc.

La tension, également appelée DDP ou différence de potentiel se mesure en VOLT, symbole U

L'intensité ou le courant se mesure en AMPERE, symbole I

Remarque :

Le Volt et l'Ampère sont, en radioélectricité de grandes valeurs, nous traiterons plus souvent de leurs sous-multiples

Sous-multiples du Volt	
Volt = 1 V	V
Millivolt = 10^{-3} V	mV
Microvolt = 10^{-6} V	μ V
Nanovolt = 10^{-9} V	nV

Sous-multiples de l'Ampère	
Ampère = 1 A	A
Milliampère = 10^{-3} A	mA
Microampère = 10^{-6} A	μ A
Nanoampère = 10^{-9} A	nA

Pour mémoire : Les puissances de 10

Formation Technique F4 & F8 – Les courants

$10^0 = 1$
 $10^1 = 10$
 $10^2 = 100$
 $10^3 = 1000$
 $10^4 = 10\ 000$
 $10^5 = 100\ 000$
 $10^6 = 1\ 000\ 000$
 $10^7 = 10\ 000\ 000$
 $10^8 = 100\ 000\ 000$
 $10^9 = 1\ 000\ 000\ 000$

$10^0 = 1$
 $10^{-1} = 0,1$
 $10^{-2} = 0,01$
 $10^{-3} = 0,001$
 $10^{-4} = 0,0001$
 $10^{-5} = 0,00001$
 $10^{-6} = 0,000001$
 $10^{-7} = 0,0000001$
 $10^{-8} = 0,00000001$
 $10^{-9} = 0,000000001$

giga = 10^9
mega = 10^6
kilo = 10^3
milli = 10^{-3}
micro = 10^{-6}
nano = 10^{-9}
pico = 10^{-12}

Revenons sur le courant

Imaginons un tuyau dans lequel circule de l'eau, si nous voulons mesurer le débit (pour la facturation par exemple) nous devons insérer un dispositif qui mesure le volume d'eau qui traverse à un point donné et en une seconde notre tuyau. Il en est de même pour le courant, nous allons comptabiliser les charges électriques qui circulent dans un endroit du circuit et ce en une seconde.

La mesure s'effectuera à l'aide d'un Ampèremètre.

Vous comprenez aisément que pour faire circuler une quantité d'électricité de 1 C/s, soit 1 A, il faut beaucoup de charges.

Charge élémentaire d'une particule :

$$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Coulomb}$$

1 Ampère = 1 Coulomb par seconde
 $1 \text{ A} = 1 \text{ C/s}$ ou $1 \text{ A} = 1 \text{ C} \cdot \text{s}^{-1}$

La loi s'énonce ainsi :

Le courant est égal au quotient de la quantité d'électricité traversant une surface S par unité de temps

$$I = \frac{Q}{t}$$

avec ;
I Courant en Ampère A
Q quantité d'électricité en Coulomb C
t temps en seconde s

Nous retiendrons :

La tension ou différence de potentiel est due à une accumulation d'un côté de charges positives, de l'autre de charges négatives. La tension est de l'énergie potentielle (différence de niveau)

Le courant est une circulation d'électrons à travers un matériau. Le courant est de l'énergie cinétique (de mouvement)

La tension peut exister sans courant

Le courant ne peut pas exister sans tension

On mesure la tension avec un **voltmètre**

On mesure le courant avec un **ampèremètre**

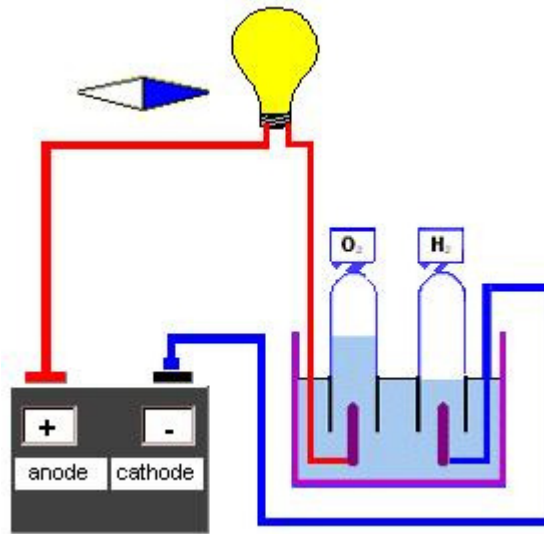
Effets du courant électrique



Nous avons vu dans le chapitre précédent que le courant était une circulation d'électrons dans nos circuits. Ce passage

Formation Technique F4 & F8 – Les courants

ne va pas s'effectuer sans conséquence. Nous allons détailler les effets du courant électrique.



Voici le montage de test :

Une batterie de voiture alimente une ampoule très ordinaire. En série dans le circuit, nous trouvons un bac à électrolyse contenant essentiellement de l'eau à laquelle on a ajouté de la soude. Si nous fermons le circuit électrique de manière à ce que le courant circule, nous constatons :

- La lampe s'éclaire et chauffe
- L'aiguille de la boussole a dévié
- Un gaz se forme dans chaque tube

Le filament de la lampe, pour émettre un rayonnement visible est porté à haute température, c'est l'effet thermique. L'aiguille aimantée de la boussole s'est déplacée sous l'action du champ magnétique occasionné par le passage du courant électrique, c'est l'effet magnétique. La solution aqueuse se décompose et l'on recueille d'un côté de l'oxygène, de l'autre de l'hydrogène. Par ailleurs on note un volume d'hydrogène plus important que celui de l'oxygène, (H_2O) c'est l'effet chimique.

Polarisation des effets :

Essayons d'inverser les polarités de la batterie et observons ce qui se passe:

- L'aiguille de la boussole change de sens
- On recueille maintenant de l'oxygène là où l'on recueillait de l'hydrogène et réciproquement
- La lampe brille du même éclat sans autre forme de manifestation

Deux effets sur trois sont polarisés (ils sont influencés par le sens de passage du courant), il s'agit des effets magnétique et chimique, l'effet thermique quant à lui n'est pas polarisé.

Effet thermique

Appelé également effet joule, cet effet est exploité par exemple dans un grille pain, une ampoule ou un radiateur. Malheureusement cet effet n'est pas toujours souhaité et il se manifeste quand même conduisant à la mise en place de systèmes dissipateurs de chaleur permettant d'évacuer les calories. D'une manière générale on constatera que tout échauffement est synonyme de perte de rendement.

Effet chimique

Le cas le plus connu, l'électrolyse. C'est cet effet qui est utilisé pour la charge/décharge des batteries

Formation Technique F4 & F8 – Les courants

Effet magnétique

Si l'on place une boussole à proximité d'un fil parcouru par un courant électrique, on constate que l'aiguille aimantée bouge. Le courant a créé un champ magnétique. Cette propriété extrêmement importante sera exploitée de façon extensive pour produire des relais, des moteurs électriques, des haut-parleurs etc. Nous verrons plus avant les propriétés du magnétisme et ses implications en radioélectricité.

Retenez bien les trois effets du courant électrique, ils seront omniprésents dans votre vie de radioamateur et pourront à l'occasion vous mener la vie dure quand ils ne seront pas recherchés.

Formation Technique F4 & F8 – Les courants

La résistance



Dès que nous aurons traité ce sujet, nous pourrons passer à l'étude de circuits électriques.
Rien ne semble plus simple à traiter que la résistance, toutefois s'il est aisé de définir ce que fait la résistance il n'en est pas tout à fait de même pour dire ce qu'elle est.

Nous allons définir :

- la résistance en tant que phénomène physique
- la résistance en tant que composant
- les potentiomètres et rhéostats

La résistance est la propriété qu'a un matériau de convertir de l'énergie électrique en énergie calorifique.

La résistance représente l'action d'une propriété du matériau qui a pour effet de freiner le passage du courant

Ceci explique ce que fait une résistance mais pas ce qu'elle est. On trouve dans certains ouvrages une définition consistant à décrire la résistance comme un convertisseur d'énergie cinétique en énergie potentielle, ceci déborde quand même du cadre fixé de ce traité.

Les résistances dans nos montages (et elles sont nombreuses) nous serviront soit à limiter le courant circulant dans un circuit, soit à créer une chute de tension (ddp).

Comment cela se présente t'il physiquement ?

Voici un exemple



Quelle est l'unité de mesure

C'est l'OHM,

Le symbole de la résistance est **R**

Un Ohm, est-ce une grande valeur comme l'était un ampère ?

Formation Technique F4 & F8 – Les courants

Non, un ohm est une résistance de faible valeur (tout est relatif), vous trouverez dans le tableau à droite les multiples usuels

1 ohm = 1 Ω
1 kilohm = 1000 Ω
1 megohm = 1 000 000 Ω

Les résistances portent un marquage de couleur, comment s'y retrouver ?

C'est extrêmement simple mais cela nécessite quand même un petit apprentissage.

Explications:





Le marquage, qui indique la valeur du composant en ohm, est composé de barres de couleur. A chaque couleur est affectée une valeur de 0 à 9, bon jusque là, ça va non ?

Bien, où cela se complique c'est qu'il va falloir introduire une notion de multiplicateur...

Non rien de méchant, notez :

La troisième couleur est la valeur du multiplicateur, càd le nombre de 0 qu'il faudra ajouter.

Seules les 3 premières couleurs sont significatives pour déterminer la valeur de la résistance, les autres indiquent la tolérance et autres paramètres non indispensables pour le moment.

Couleur	Valeur	
	0	noir
	1	marron
	2	rouge
	3	orange
	4	jaune
	5	vert
	6	bleu
	7	violet
	8	gris
	9	blanc

Tolérances usuelles :

- **Rouge : 2%**
- **Or : 5 %**
- **Argent : 10%**

Un exemple pour comprendre :



Voici une résistance

La bague de droite, que j'ai voulu représenter en couleur dorée (sic!) représente la tolérance de la valeur càd l'écart en pourcentage autour de la valeur indiquée.

Commençons par la bague rouge, rouge = 2, la suivante est violette càd = 7 et la troisième qui est le multiplicateur = 4.

Posons ceci sur le papier, il vient :

27 0000 càd 270 000 Ω ou encore 270 k

C'est aussi simple que cela...

Comment sont faites les résistances ?

En général de carbone, certaines sont faites de fil résistant, d'autres d'agglomérat de matériau résistant. Les résistances bobinées ont le grave défaut, en haute fréquence, (ce qui nous intéresse) de présenter une composante selfique (ceci est lié à la fabrication), nous expliciterons cela plus tard.

Formation Technique F4 & F8 – Les courants

Variation autour du même thème :

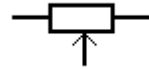
Tous les jours vous agissez (ou vous agissiez autrefois) sur une résistance sans le savoir en triturant le bouton de volume de votre téléviseur, chaîne HI FI ou poste de radio. Plus précisément sur le potentiomètre.

le potentiomètre

Ce dispositif permet de faire varier en continu la résistance de la valeur maximum à la minimum. Nous verrons d'ici peu que c'est surtout et essentiellement un magnifique diviseur de tension.

Notez :

On trouve 3 électrodes sur ce composant

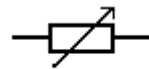


la résistance variable

Ce dispositif permet de faire varier en continu la résistance de la valeur maximum à la minimum. Quand nous aurons besoin de d'ajuster une valeur de résistance, nous utiliserons ce composant qui est à ne pas confondre avec le potentiomètre.

Notez :

On trouve 2 électrodes sur ce composant



Pour réaliser une résistance variable à partir d'un potentiomètre (cas pratique), il suffit de relier le curseur à un côté du potentiomètre.

Les valeurs des résistances sont normalisées:

on ne trouve pas dans le commerce n'importe quelle valeur, celles-ci appartiennent à une série basée sur la racine énième de 10 (ouh que c'est compliqué!). Voici ci dessous la série E12.

10 - 12 - 15 - 18 - 22 - 27 - 33 - 39 - 47 - 56 - 68 - 82 - 100

On trouve naturellement dans cette série tout les multiples de 10, ce qui donnerait

100-120-150-180-220-270 etc. vous avez compris

Les résistances ont une tolérance de valeur :

Si vous lisez 4700 Ω sur le corps de la résistance, ne soyez pas étonné, si vous la mesurez avec un instrument digne de foi, de ne pas lire cette valeur car les fabricants affichent une tolérance de fabrication. Les résistances que nous utilisons dans notre domaine ont une tolérance comprise entre 5 et 10 %. On pourra utiliser des valeurs de 1% mais ce sera plus cher...

Les résistances supportent une puissance maximum :

au delà de laquelle... elles fument. Comme leur fonction est de freiner le passage du courant, elles convertissent en chaleur cette énergie. On doit donc utiliser une résistance dimensionnée pour la mission qu'on lui confie, càd veiller à sa puissance max. Les valeurs usuelles en électronique sont 1/8 W, 1/4 W, 1/2 W

Formation Technique F4 & F8 – Les courants

Les résistances ont des coefficients de température :

Ce qui veut dire que leurs valeurs changent en fonction des variations de température. Si cet effet n'est pas désiré, il est néfaste ce qui se conçoit aisément. Certaines résistances particulières exploitent ce phénomène . Ces coefficients peuvent être positifs ou négatif

Calcul de la valeur d'une résistance connaissant sa valeur à 0°C, sa valeur à x°C et son coefficient de température

$$R_t = R_0 (1 + \alpha t)$$

Avec
R_t=valeur à température t en °C
R₀=valeur à température de 0°C
α = coeff de température
t = température en °C atteinte

Les thermistances :

Ce sont des résistances dont la valeur varie avec la température soit positivement avec l'accroissement de température soit en sens inverse selon que le coefficient de température est positif ou négatif. On distinguera donc :

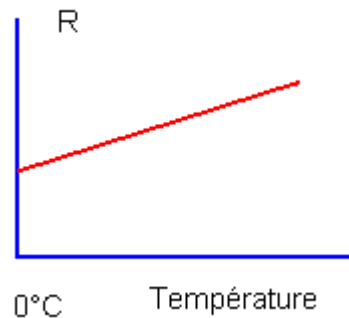
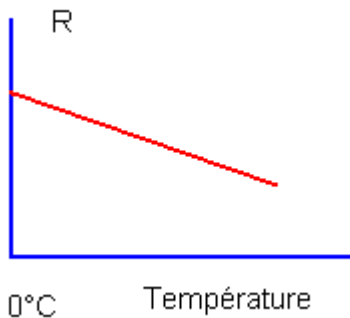
Les thermistances CTN

Le coefficient de température est négatif, une augmentation de température diminue la valeur de R

Les thermistances CTP

Le coefficient de température est positif, une augmentation de température augmente la valeur de R

Si l'on traduit cela sur un graphique, nous voyons :



Ces résistances seront utilisées pour des applications mettant en jeu la température. (Thermostat, capteurs et senseurs divers et variés etc.)

Vous en savez assez sur les résistances pour passer au chapitre suivant.

La résistivité

La nature d'un matériau est caractérisée par un facteur appelé **RESISTIVITE** qui traduit la facilité avec laquelle, dans un matériau donné, on peut arracher un électron de son orbite autour de son noyau.

Symbole de la résistivité

rhô : ρ

Unité

l'ohm-mètre : $\Omega \cdot m$

Calcul de la résistance d'un conducteur connaissant ses caractéristiques physiques

Avec :

R en Ω

ρ en $\Omega \cdot m$

S en m^2

l en mètres

$$R = \frac{\rho l}{S}$$

on en déduit de la formule ci-dessus et on retiendra que la résistance d'un conducteur filiforme et homogène sera :

- proportionnelle à sa longueur
- inversement proportionnelle à sa section
- dépendante de la résistivité intrinsèque du matériau

On va donc définir, en fonction de la résistivité plusieurs classes de matériaux

Les isolants :

La résistivité est très grande, on ne peut pas ou presque pas arracher d'électrons au noyau et conséquemment, pas d'électron, pas de courant, le matériau est isolant

Les conducteurs :

La résistivité peut évoluer de presque de rien (cas des métaux) à des valeurs permettant de réaliser des résistances par exemple. Un des meilleurs conducteurs est l'or (pour les applications nécessitant de bons contacts, ceux-ci sont dorés) mais son coût rend son usage difficile aussi lui préfère t'on le plus démocratique cuivre. Pour des applications demandant une résistivité faible, une masse légère et une bonne tenue mécanique, cas typique des antennes, on choisira l'aluminium et/ou ses alliages.

A savoir :

Si l'on refroidi certains matériaux vers le 0 absolu (0° K soit -273 °C), on atteint la supraconductivité et la résistivité chute à une valeur presque nulle. Sachez toutefois qu'atteindre une telle température n'est pas chose aisée.

Quelques valeurs de résistivité de matériaux usuels :

Et un petit exemple : Soit à calculer la résistance d'un fil de cuivre de longueur 40 cm et de section de 1mm² (cas d'une self).

1 - Il faut ramener tout cela aux unités normalisées

1 mm² = 10⁻⁶ m²

40 cm = 0,4 m

$$R = \frac{1,5 \cdot 10^{-8} \times 0,4}{10^{-6}} = 0,6 \cdot 10^{-2} = 0,006 \Omega$$

• Aluminium	2,5 10 ⁻⁸	$\Omega \cdot m$
• Cuivre	1,5 10 ⁻⁸	
• Argent	1,6 10 ⁻⁸	
• Fer		
• Nickel	1,1 10 ⁻⁷	
• Plomb	1,2 10 ⁻⁷ 2 10 ⁻⁷	

Loi d'OHM



Nous y voici, le moment est venu de découvrir cette fameuse loi qui est **fondamentale**. Elle vous guidera dans tous les instants de votre vie de radioamateur car c'est le principe que vous appliquerez pratiquement partout, que ce soit pour la conception de vos circuits, le dépannage, l'analyse. Son apparente simplicité cache des trésors, Il est **indispensable** de bien maîtriser cette loi.

Tout d'abord, voyons cela sur le plan arithmétique

$$U = RI$$

$$I = \frac{U}{R}$$

$$R = \frac{U}{I}$$

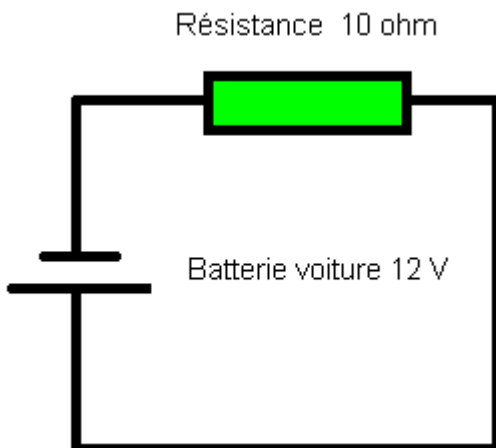
U, la tension en Volt

I, le courant en Ampère

R, la résistance en ohm

Bien, nous ne sommes guère plus avancés, il faudrait un exemple pratique pour la discussion, le voici.

Cas n° 1 : Nous avons relié avec des fils conducteurs une résistance de 10 Ω à une batterie de voiture fournissant une tension continue de 12 V. Que nous dit la loi d'Ohm ?



Réponse : Que nous pouvons facilement calculer le courant qui circule dans ce circuit en appliquant la formule $I = U/R$, ce qui nous donne $I = 12/10$ soit 1,2 A. Si nous passons à l'expérimentation avec des appareils de mesure, en utilisant un ampèremètre, nous pourrions vérifier que le courant qui circule est bien d'1,2 A.

Cas n° 2 : Nous avons relié une résistance de valeur inconnue à notre batterie de voiture de 12 V, nous mesurons un courant de 0,6 A soit 600 mA, quelle est la valeur de R ?

Formation Technique F4 & F8 – Les courants

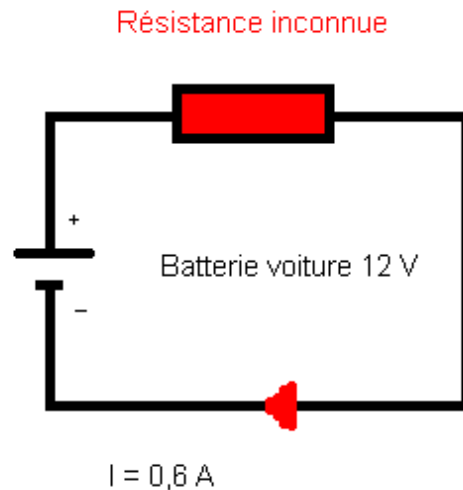
Réponse :

Nous connaissons U et I, il suffit d'appliquer :

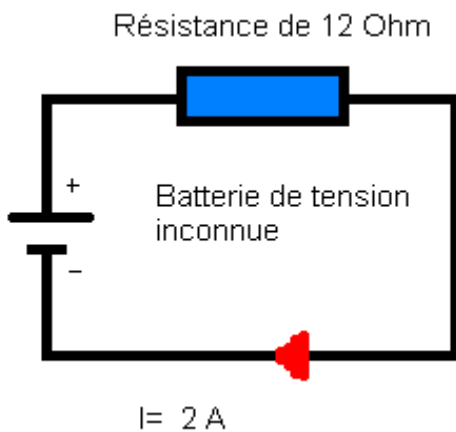
$$R = U/I$$

$$R = 12 / 0,6 \text{ soit } 20 \Omega$$

Vous noterez la flèche rouge indiquant une circulation de courant dans le circuit. Vous noterez également que dans ce circuit, le courant de 0,6 A circule dans tous les éléments du circuit (batterie-résistance), ceux-ci étant montés en "SERIE"



Cas n° 3 : Nous avons relié une résistance de 12Ω à une batterie dont la tension nous est inconnue. Nous mesurons dans le circuit un courant de 2 A. Quelle est la tension fournie par la batterie ?



Réponse :

Nous connaissons I et R, il nous suffit d'appliquer :

$$U = R \cdot I$$

$$U = 12 \times 2 \text{ soit } 24 \text{ V}$$

Voici une petite calculatrice en Javascript indiquant $I = U/R$
Insérer deux valeurs dans les cases idoines et cliquez sur la troisième pour l'obtenir

<input type="text"/>	Ampere =	<input type="text"/>	volt /	<input type="text"/>	ohm
U le courant		U la tension		R la résistance	

Testez vos connaissances

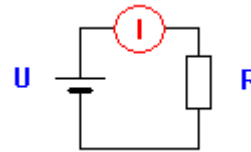
Important :

J'ai été amené à constater que le phénomène d'insertion d'une résistance dans un circuit était souvent mal interprété, conduisant les jeunes impétrants électroniciens à des conclusions erronées. Une résistance n'a pas d'effet d'entonnoir, il n'y a pas d'un côté de la résistance un énorme courant et de l'autre côté un fin filet qui circule. Le courant est en tout point identique dans les circuits que nous venons d'examiner car le générateur (la batterie dans notre cas) voit une résistance globale.

Formation Technique F4 & F8 – Les courants

Et pour apprendre tout en jouant et déterminer deux importantes caractéristiques :

Nous allons réaliser le montage de test que vous apercevez à gauche et procéder à mes mesures de courant et tension.
 Pour la première mesure, nous maintiendrons R constante et égale à 1 Ω et nous ferons varier U de manière à déterminer le courant.
 Pour la seconde mesure, nous ferons varier R en maintenant U constante.

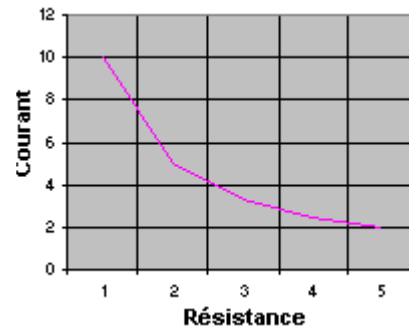
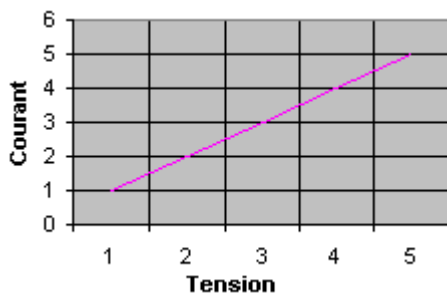


U (V)	1	2	3	4	5
I (A)	1	2	3	4	5
R (Ω)	1	1	1	1	1

U (V)	10	10	10	10	10
I (A)	10	5	3,3	2,5	2
R (Ω)	1	2	3	4	5

Ici nous maintenons R constante et nous faisons varier U de 1V à 5 V. A chaque fois nous mesurons I

Dans ce cas, nous maintenons U constante (10V) et faisons varier R de 1 Ω à 5 Ω .



Le courant évolue en fonction de la tension appliquée, en d'autres termes, le fait d'augmenter la tension fait croître le courant et inversement naturellement.

A tension constante, le courant varie inversement à la résistance, le fait d'augmenter la résistance diminue le courant et réciproquement.

Ce sera tout, dans un premier temps pour cette fameuse loi d'Ohm, le temps de bien digérer et de mesurer les implications. Le principe à retenir est que nous connaissons 2 éléments sur trois (une inconnue) et que ceci sera suffisant pour nous permettre de déterminer sans ambiguïté ce troisième élément manquant. Que ce soit en électricité ou en électronique, nous ne serons pas confrontés à d'autres problèmes que celui-ci

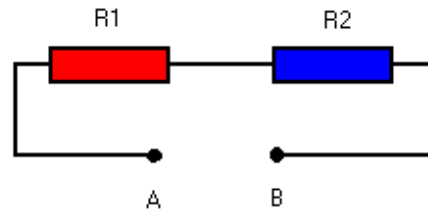
Résistances en série



Nous avons défini ou du moins tenté de définir ce qu'était la résistance dans un chapitre précédent. L'objectif de cette page sera de déterminer la valeur résultante d'une association de résistance en série, c'est à dire mises les unes au bout des autres. Dans un prochain chapitre nous verrons les associations parallèles.

Manipulation :

Nous avons puisé dans notre stock de composants une résistance de 10 kΩ et une autre de 4,7 kΩ. Nous les avons connecté comme indiqué sur le schéma à droite. Nous nous proposons de déterminer la valeur résultante



Comme nous le savons, une résistance freine le passage du courant, donc si nous en mettons 2 bout à bout, (on appelle ceci, les mettre en série) nous allons augmenter la valeur du frein. Traduit en langage mathématique cela donne

$$R_t = R_1 + R_2$$

Dans notre cas nous aurons

$$R_t = 10 + 4,7 = 14,7 \text{ k}\Omega$$

Notez que l'on n'additionne pas des kilogrammes et des tonnes, on prend soin d'utiliser une unité commune, en l'occurrence des kΩ. Nous aurions pu effectuer ce calcul en convertissant tout en Ω soit

$$R_t = 10\,000 + 4700 = 14\,700 \text{ }\Omega \text{ soit } 14,7 \text{ k}\Omega$$

Testez vos connaissances

Et si nous avons 5 résistances les unes au bout des autres

Aucun problème, les freins s'additionnent, la résultante serait : $R_t = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5$. Il n'y a aucune difficulté avec les groupements série de résistances.

Qu'en est-il du courant dans le circuit ?

Appliquons la fameuse loi d'ohm sur un exemple

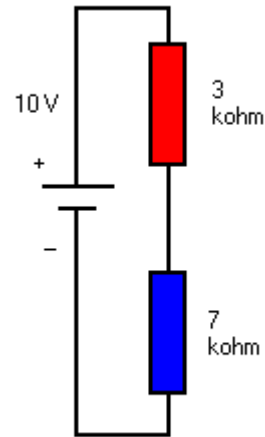
Formation Technique F4 & F8 – Les courants

Bon, voici le nouveau montage, nous trouvons un générateur, en l'occurrence une batterie de 10V, une résistance de 3 kΩ et une autre de 7 kΩ. Les valeurs, non conventionnelles, ont été choisies de manière à simplifier les calculs.

Commençons par calculer la valeur totale des résistances en série:

$$R_t = R_1 + R_2$$

$$R_t = 3000 + 7000 = 10\,000\ \Omega \text{ soit } 10\ \text{k}\Omega$$



Jusqu'à présent rien de nouveau me direz-vous et je le confirme, nous allons calculer le courant qui circule dans ce circuit.

C'est ici que cela devient intéressant, nous savons que le courant qui circule est identique en tout point dans ce circuit, c'est-à-dire que le courant qui traverse la résistance de 3 kΩ est

identique à celui qui traverse la résistance de 7 kΩ.

Nous allons maintenant calculer quelle est la tension aux bornes de chaque résistance. Eh oui, car aux bornes de l'association de résistances, on retrouve le générateur, soit 10 V mais il n'en est pas de même aux bornes de chaque résistance.

Comment pratiquer ?

Merveilleuse loi d'Ohm, tu vas encore nous sauver. Nous savons que **$U = R I$** , appliquons ceci

Application immédiate de la loi d'Ohm

$$I = U / R$$

$$I = 10/10\,000 = 0,001\ \text{A} = 1 \cdot 10^{-3}\ \text{A} = 1\ \text{mA}$$

(habituez-vous à la notation scientifique)

1 - sur la résistance de 3 k

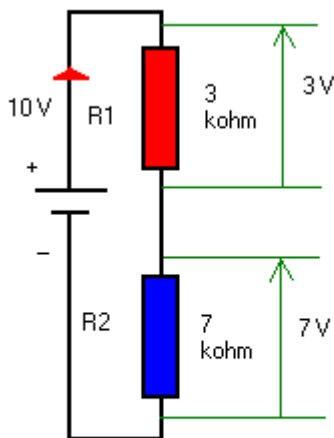
$$U = R I$$

$$U = 3000 \times 0,001 = 3\ \text{V}$$

2 - sur la résistance de 7 k

$$U = R I$$

$$U = 7000 \times 0,001 = 7\ \text{V}$$



Ceci est fondamental ! (encore)

Nous avons réalisé avec ce montage un diviseur de tension (3 V d'un côté et 7 V de l'autre), également appelé **pont diviseur**

Le courant de 1 mA circule dans tout le circuit, il est constant en tout point

La flèche rouge représente le courant, le sens conventionnel (par convention) indique qu'il circule du + vers le - alors qu'en fait physiquement, il va en sens inverse. (c'est historique, ils se sont trompés lors de l'établissement de la convention, vous n'étiez pas né(e)).

La tension aux bornes de chaque résistance est proportionnelle à la valeur de la résistance, en d'autres termes plus la valeur est élevée plus forte sera la tension (on dit la chute de tension).

Formation Technique F4 & F8 – Les courants

Et pour finir...

Suis-je obligé de passer par le calcul du courant pour déterminer la chute de tension aux bornes de chaque résistance ?

Non, il suffit de calculer le rapport (la proportionnalité) du **pont diviseur** comme ceci :

Nous voulons calculer la tension aux bornes de R2

$$U_{R2} = \frac{R2}{R1 + R2} \times U$$

Nous voulons calculer la tension aux bornes de R1

$$U_{R1} = \frac{R1}{R1 + R2} \times U$$

Nous sommes arrivés au terme de ce chapitre fort riche en notions nouvelles. Imprégnez-vous de tout cela et essayez de réaliser des simulations pour tester vos connaissances.

Résistances en parallèle



Le moment est venu de voir l'autre grand type d'association de résistances, l'association parallèle que nous noterons à l'avenir comme ceci "//" par souci de gain de temps (autrement nommée fainéantise)

Manipulation :

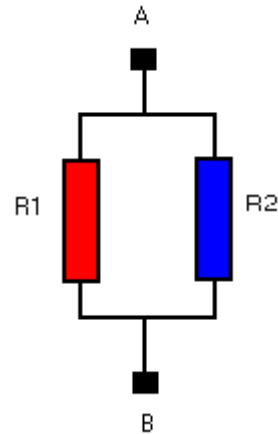
Nous avons puisé dans notre stock de composants une résistance de 10 kΩ et une autre de 20 kΩ. Nous les avons connecté comme indiqué sur le schéma à droite. Nous nous proposons de déterminer la valeur résultante.

Cette fois-ci vous allez être surpris, car le fait de mettre en // (je l'ai fait!) deux résistances fait diminuer la résistance totale. Impossible allez-vous crier... et pourtant SI !

Comment expliquer un tel mystère ?

Mettez vous un instant à la place du courant. Vous voyez ces deux résistances devant vous (pt A), vous allez vous engouffrer dans celle qui offre le moins de résistance, ce qui déterminera un courant I1 mais il vous faudra quand même traverser celle qui offre la plus grande résistance ce qui occasionnera un courant I2 (rigolez c'est classique).

Résultat des courses : Le courant total sera égal à I1 + I2, où encore le courant total sera de toute manière plus élevé que le plus fort des courants d'une branche, ce qui démontre (on l'espère) que la valeur de 2 résistances en // est inférieure à la plus faible des deux valeurs ! Ouf. Voyons cela en termes arithmétiques.



Approche simplifiée ne fonctionnant que pour 2 résistances en //

$$R_t = \frac{R_1 \times R_2}{R_1 + R_2}$$

Approche académique

Pour calculer la valeur résultante d'une association de résistances R1 et R2 mise en //, nous allons passer par un calcul utilisant l'inverse de la résistance et qui s'appelle la **conductance**.

N'oubliez pas, pour calculer les valeurs de n résistances en //, il faut obligatoirement réduire au même dénominateur.

A titre de comparaison, si je vous donne 1/8 de tarte et 1/2 tarte, il vous est difficile de voir ce que cela représente. mentalement vous allez convertir 1/2 en x/8 (en fait cela fait 4/8) puis vous allez ajouter 1/8 ce qui vous donnera 5/8 tarte pour vous tout seul!

$$\frac{1}{R_t} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad (\text{il faut maintenant réduire au même dénominateur})$$

$$\frac{1}{R_t} = \frac{1 \times R_2 + 1 \times R_1}{R_1 \times R_2} = \frac{R_2 + R_1}{R_1 \times R_2}$$

nous sommes en possession de 1/Rt et nous désirons Rt donc prenons l'inverse et il vient :

$$R_t = \frac{R_1 \times R_2}{R_1 + R_2}$$

Là je sens que cela flotte... Un petit exemple numérique vous aiderait non ? Supposons que nous ayons 3 résistances en // dont les valeurs sont :

R1 = 50 Ω
R2 = 100 Ω
R3 = 200 Ω

Quelle est la résultante ? (nous savons déjà que la valeur sera < à 50 Ω)

$$\frac{1}{R_t} = \frac{1}{50} + \frac{1}{100} + \frac{1}{200}$$

Formation Technique F4 & F8 – Les courants

$$\frac{1}{R_t} = \frac{1}{50} + \frac{1}{100} + \frac{1}{200} \quad \text{réduisons au même dénominateur}$$

$$\frac{1}{R_t} = \frac{1 \times 100 \times 200}{50 \times 100 \times 200} + \frac{1 \times 50 \times 200}{50 \times 100 \times 200} + \frac{1 \times 50 \times 100}{50 \times 100 \times 200}$$

$$\frac{1}{R_t} = \frac{20000 + 10000 + 5000}{1\,000\,000} = \frac{35\,000}{1\,000\,000} = \frac{35}{1000}$$

Maintenant que nous savons que $1/R_t = 35/1000$, inversons le rapport pour avoir R_t

$$R_t = 1000/35 = \mathbf{28,57 \, \Omega}$$

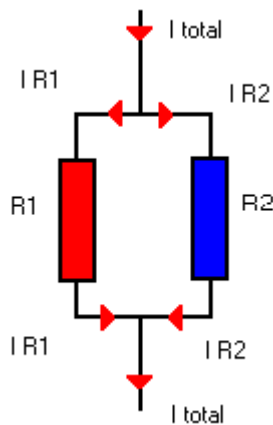
Ceci appelle plusieurs commentaires :

- 1 - c'est long et fastidieux
- 2 - les risques d'erreurs sont nombreux
- 3 - La résultante est effectivement inférieure à la plus faible des valeurs en //

Bon je crois que vous avez compris, entraînez vous avec ceci :

Testez vos connaissances

Ce n'est pas fini... Qu'en est-il de la tension et du courant dans cette association ?



Pour la tension, on voit facilement qu'elle est identique sur chaque branche, c'est-à-dire que la tension aux bornes de R_2 = la tension aux bornes de R_1 . Ce sera une constante, dans une association // la tension est commune à tous les composants.

Pour le courant, le courant total se divise en deux (car 2 résistances) et sa valeur sera :

(encore la loi d'Ohm décidément universelle)

$$I_{R1} = \frac{U}{R1} \quad I_{R2} = \frac{U}{R2}$$

Et pour conclure, un exemple pratique

Formation Technique F4 & F8 – Les courants

Soit un générateur (batterie) de 60 V alimentant une association de deux résistances en //

R1 = 100

R2 = 150

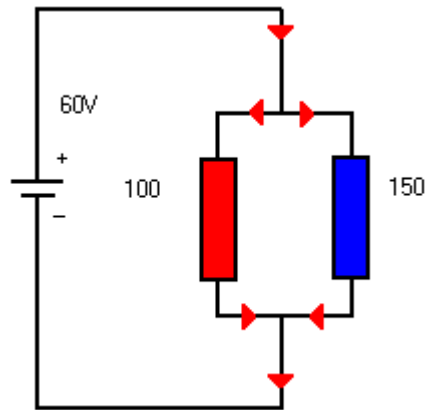
Quels sont les courants qui traversent chaque résistance et quel est le courant fourni par le générateur ?

Nous pouvons soit calculer le courant dans chaque branche et sommer, soit calculer la résistance équivalente, puis le courant total, puis le courant dans chaque branche. Adoptons la solution 1

$$IR_1 = \frac{U}{R_1} = \frac{60}{100} = 0,6 \text{ A}$$

$$IR_2 = \frac{U}{R_2} = \frac{60}{150} = 0,4 \text{ A}$$

Le courant total = 0,6 + 0,4 = 1 A



Vérifions nos calculs

$$R_t = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = \frac{100 \times 150}{100 + 150} = \frac{15\,000}{250} = 60 \, \Omega$$

$$I_{\text{total}} = \frac{U}{R_t} = \frac{60}{60} = 1 \text{ A}$$

Et si on allait se coucher ?

A demain pour la suite...

Voici une calculatrice javascript qui va vous permettre de réaliser quelques associations de résistances en parallèle.

Entrez les valeurs de R1 et R2. Validez par un clic ou par la touche Tab

R1 = R2 =

Résistance équivalente série =

Résistance équivalente parallèle =

Voilà, c'est fini. Ce concept des résistances // est simple, maîtrisez-le complètement.

Le générateur



Jusqu'à présent nous avons considéré le générateur comme une boîte noire nous fournissant tension et courant à la demande. Hélas, rien n'est parfait dans ce bas monde et nos générateurs ont des limitations que nous allons passer en revue.

Il existe différents types de sources :

- Source de tension

Cette source fournit une tension indépendante de la résistance de charge (càd du courant qu'on lui demande). **Elle possède une résistance interne très faible.** (ex: batterie de voiture)

- Source de courant

Cette source fournit un courant indépendant de la résistance de charge. **Elle possède une résistance interne très élevée.** (ex : transistor)

Chaque source possède une résistance interne

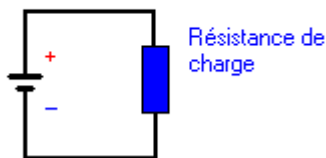
Ce sera souvent un facteur de limitation des performances.

Comment cela se traduit-il pour les sources de tension :

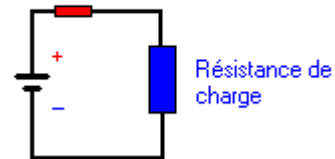
Dans l'exemple ci-dessous, la source est parfaite, on pourrait faire varier la charge dans de grandes proportions sans noter de variation de la tension fournie.

Le monde réel :
Notre source possède une résistance interne, très faible, certes, mais présente.

Source de tension parfaite



Résistance interne



En quoi cela peut-il être gênant ?

Vous devez vous souvenir de la loi d'Ohm qui dit que $U = RI$.

Dans ce circuit de droite, ci-dessus, le courant sera identique en chaque point, nous sommes bien d'accord?

Ceci implique que la résistance interne à la source sera également traversée par le courant I du circuit et que selon cette bonne vieille loi, il se produira aux bornes de cette résistance interne une chute de tension.

Toujours d'accord ?

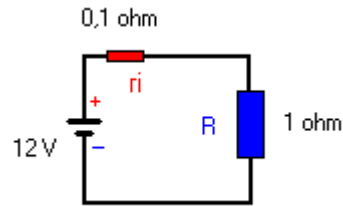
Cette chute de tension viendra se soustraire à la tension fournie par la source, donc la charge ne verra plus que U à vide (sans débit) - $R_i \times I$. Phénomène encore plus pernicieux, quand le débit augmentera suite à une diminution de la valeur de la charge, la chute de tension augmentera, réduisant encore plus la tension disponible pour la charge.

Voyons cela avec un exemple pratique.

Formation Technique F4 & F8 – Les courants

Nous avons une batterie de 12 V de tension à vide qui possède une résistance interne de 0,1 Ω. Ceci vous paraît raisonnable, voire faible, attendez la suite.

On connecte sur cette batterie une charge constituée par une résistance de 1 Ω

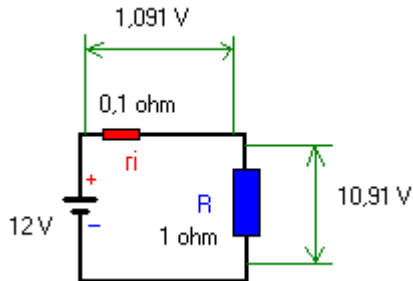


Nous nous proposons de calculer le courant qui circule dans ce circuit et la tension aux bornes de R, la charge

1 - Calculons la résistance globale
 $R_t = r_i + R = 0,1 + 1 = 1,1 \Omega$

2 - calculons I
 $I = \frac{U}{R_t} = \frac{12}{1,1} = 10,91 \text{ A}$

3 - Calculons la tension aux bornes de R
 $U = R I \quad U_R = 1 \times 10,91 = 10,91 \text{ V}$



Quelles conclusions pouvons nous en tirer ?

La chute de tension aux bornes de r_i prive la charge (R) de cette tension.

Plus r_i est grand, plus la chute de tension est importante

La résistance interne limite de débit maximum à une valeur appelée Courant de court-circuit.

Et une notion qui sera approfondie plus tard car vitale dans le monde de la radioélectricité :
Pour obtenir un transfert de **puissance** maximum (UI) ceci nous imposerait de connecter une charge de résistance égale à la résistance du générateur.

Courant de court-circuit (CC)

Dans notre cas, supprimons la charge et ne laissons que la résistance interne r_i .

Calculons I = $\frac{U}{R} = \frac{12}{0,1} = 120 \text{ A}$

Ceci est le courant maximum qui pourra être fourni par ce générateur

Introduisons une notion effleurée précédemment :

Nous pourrions définir pour un générateur, une tension à vide, c'est-à-dire le générateur ne débitant pas et une tension en charge, c'est-à-dire le générateur débitant dans une charge.

Notez que nous écrirons pour la résistance interne du générateur " r " de manière à la distinguer de la résistance de charge

Notez également que nous venons d'introduire une nouvelle notion qui est la force électromotrice. Remarquez comme elle porte bien son nom, car il s'agit bien d'une force électrique qui font se mouvoir (motrice) les électrons. On parlera de fem à vide et de tension en charge

En termes mathématiques :

$$U_{\text{charge}} = E - (r I)$$

U_{charge} en V
E: fem = force électromotrice
 r = résistance interne en Ω
I = courant débité par le générateur en A

Et pour conclure...

Il vous arrivera dans votre carrière d'être devant un montage alimenté par piles et qui ne fonctionne plus. Comme vous êtes méthodique, vous allez commencer par vérifier immédiatement l'état de vos piles avec un contrôleur universel en position voltmètre. La mesure vous indiquera une pile en bon état.

Là, vous êtes dubitatif...

Car vous êtes sur le point d'être victime d'une facétie de la résistance interne. En effet, à vide, sans débit, il n'y a pas de chute de tension, la tension est intacte, mais dès que vous allez demander un tant soit peu de débit à votre pile HS, la tension va chuter aux bornes de la résistance interne qui augmente au fur et à mesure de l'usage. Moralité, testez en charge!

Formation Technique F4 & F8 – Les courants

La puissance



Il est temps d'aborder ce thème maintenant que nous connaissons les constituants principaux de l'électricité. Préalablement nous allons revenir sur la notion de travail.

Le travail (c'est la santé!)

Supposons que vous ayez à transporter un tas de terre provenant de votre jardin d'un point A vers un point B et ce à l'aide d'une brouette.

Le contenu de votre brouette sera une charge (au propre comme au figuré) que vous allez déplacer, pour faire rouler la brouette il vous faudra de l'énergie (beaucoup). Quand vous aurez mené à bien votre mission au bout de quelques heures, vous serez heureux de constater votre **travail**.

Il en va de même en électricité.

Les charges (les électrons) déplacés par l'action de la tension dans un temps "t" effectuent un travail.

Ce travail peut être quantifié par la formule

$$W = U I t$$

Avec :
W en joules
U en V
I en A
t en secondes

Et la puissance ?

La puissance est le travail fourni en 1 seconde, ce qui donne $P = W / t$
comme $W = U I t$ la formule devient :

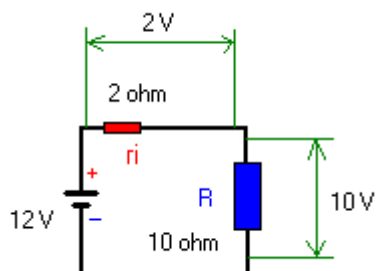
$$P = \frac{U I t}{t} = U I, \text{ c'est tout.}$$

Avec :
P en Watt symbole W
U en V
I en A

$$P = U I$$

Un exemple de calcul de puissance:

Prenons un exemple qui nous fera faire, qui plus est, une révision sur les générateurs



Nous souhaitons connaître la puissance consommée par la résistance, le générateur ayant une résistance interne r_i de 2Ω

1 - pour calculer cette puissance, nous avons besoin de connaître la tension aux bornes de cette résistance (R) de charge ainsi que le courant qui la traverse.

2 - calculons le courant dans le circuit

$$I = \frac{U}{(R + r_i)} = \frac{12}{(10 + 2)} = \frac{12}{12} = 1A$$

3 - Calculons la tension aux bornes de R

$$U = R I \quad U = 10 \times 1 = 10 V$$

Formation Technique F4 & F8 – Les courants

4 - calculons maintenant la puissance absorbée par R

$$P = U I \quad P = 10 \times 1 = 10 \text{ W}$$

Si nous nous intéressions à la puissance fournie par le générateur maintenant.

Ceci est extrêmement simple à calculer.
Nous savons que $I = 1 \text{ A}$, que $U = 12 \text{ V}$, il vient:

$$P = U I \quad P = 12 \times 1 = 12 \text{ W}$$

12 W sont fournis par le générateur, 10 W sont absorbés par la charge et les 2 qui manquent ?
Ils sont consommés en pure perte (chaleur) dans la résistance interne du générateur.

Tout échauffement, quand cet effet n'est pas désiré (c'est utile dans un radiateur) est synonyme de perte de rendement et d'énergie perdue.

Les autres formules utiles pour calculer la puissance :

$P=UI$ n'est pas la seule formule permettant de déterminer la puissance, nous pouvons faire intervenir la résistance pour effectuer ce calcul.

$$P = \frac{U^2}{R}$$

$$P = R I^2$$

Avec :

P en W
I en A
R en ohm

Reprenons l'exemple précédent

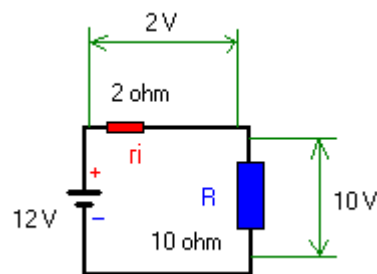
Calculons la puissance absorbée par R :

1er cas

$$P = \frac{U^2}{R} \quad P = \frac{10^2}{10} = \frac{100}{10} = 10 \text{ W}$$

2 ème cas

$$P = R I^2 \quad P = 10 \times 1^2 = 10 \text{ W}$$



Voici une calculatrice de puissance à partir de $P = U \cdot I$
Incrivez deux valeurs dans les cases idoines et cliquez sur la troisième pour l'obtenir

Watt = Volt x Ampère

[P la puissance](#)

[U la tension](#)

[I le courant](#)

Nous venons de survoler le sujet, retenez bien les formules de puissance, elles vous accompagneront toute votre vie

La Loi de Joule

Formation Technique F4 & F8 – Les courants

Nous avons déjà abordé, sans le spécifier, ce thème avec la formule de puissance $P = RI^2$. Voyons plus en détail ce phénomène.

Définition :

L'effet Joule est le phénomène d'échauffement qui apparaît dans un conducteur ohmique parcouru par un courant.

Loi de Joule :

L'énergie électrique perdue par effet Joule dans un récepteur est proportionnelle au temps (t), au carré de l'intensité (I^2) et à la résistance électrique du conducteur (R)

$$W = R I^2 t$$

W en Joule
R en
I en A
P en W
t en s

Puissance perdue par effet Joule :

$$P = R I^2$$

Quand il n'est pas souhaité, l'effet Joule diminue le rendement des appareils électriques et cause des échauffements qui peuvent être néfastes voire dangereux pour les systèmes.

Ceci impose de veiller attentivement à une autre notion appelée "densité de courant" qui est le quotient de l'intensité du courant circulant dans un conducteur par la section de ce conducteur

$$J = \frac{I}{S}$$

Avec J en A/m^2 (ampère par mètre carré)
S en m^2
I en A

Applications de la loi de Joule :

- chauffage
- appareils électroménagers
- fusibles
- fer à souder ...

Pensez que chaleur et électronique font mauvais ménage. L'électronique chauffe même si les concepteurs essaient systématiquement de réduire les consommations, un bon ventilateur additionnel sur un émetteur-récepteur vous prolongera la vie de votre engin dans des proportions non négligeables.

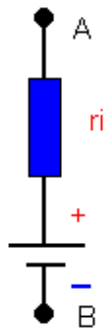
Associations de générateurs



Imaginons que nous disposions d'une énorme quantité de batteries rechargeables de 1,2 V pouvant débiter chacune 1A. Si nos besoins en énergie demandent 120 V et 45A, nous allons constituer des associations de générateurs nous permettant de satisfaire ces besoins.

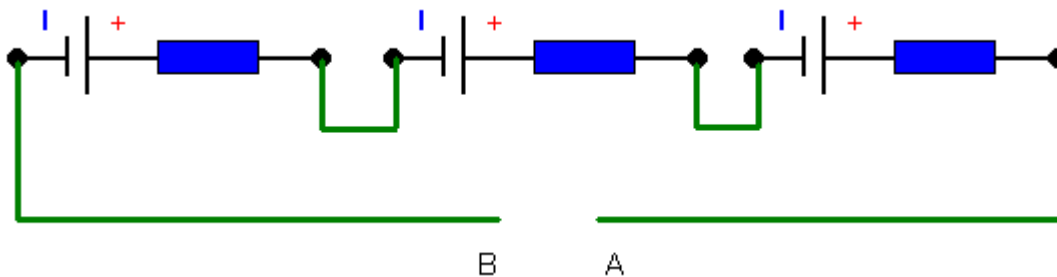
Les générateurs en série :

Nous allons préalablement définir les caractéristiques de nos générateurs



Dans tous les cas de figure nous utiliserons ce générateur, qui fournit une tension U aux points A-B, qui possède une résistance interne notée r_i et qui est capable de délivrer un courant I pendant un temps t .
Nous sommes en présence du générateur réel, tel que nous le rencontrons lors de nos essais ou expérimentations.

Imaginons que nous mettions en série comme suit nos générateurs, quels sont les résultats d'une telle association :



- Nous découvrons expérimentalement que les tensions, dans ce montage s'ajoutent.
- Les résistances internes s'ajoutent.
- Le courant total est égal au courant maximum que peut fournir un générateur.
- Pour ajouter il tensions, il convient de veiller à brancher correctement les pôles des générateurs, un + doit être suivi d'un moins.

Nous retiendrons que dans la mise en série de générateurs :

Σ ce symbole signifie : somme, vous le retrouverez souvent

$I_{\text{total}} = I_{\text{max}} \text{ débité par 1 générateur}$

$U_{\text{totale}} = \Sigma \text{ des } U$

Formation Technique F4 & F8 – Les courants

R interne totale = Σ résistances internes

Quels sont les avantages et inconvénients d'une telle association ?

Avantages

- 1 - on obtient la tension de sortie désirée en ajoutant les générateurs les uns derrière les autres.
- 2 - on n'est pas obligé de mettre des générateurs fournissant la même tension, on peut très bien mettre en série une batterie de 12V avec une batterie de 24 V pour obtenir 36V

Inconvénients

- 1 - Le débit d'ensemble est dicté par le débit maximum du générateur le plus faible
- 2 - les résistances internes sont en série, donc s'ajoutent. Ceci limite à la fois le courant maximum et la tension utile
- 3- un générateur H.S. dans l'association perturbe grandement le fonctionnement

exemple numérique :

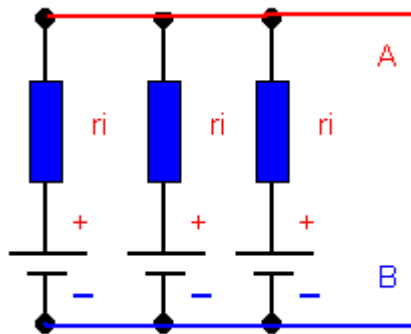
Nous disposons de piles dont les caractéristiques sont les suivantes :
tension : 1,5 V
I max = 150 mA
ri = 0,01 Ω

Nous souhaitons connaître la tension disponible à vide aux bornes d'une association de 3 piles en série , le débit maximum consenti par cet assemblage et la résistance interne totale.

Solution :

Nous savons que les tensions s'ajoutent donc il vient pour 3 piles

$$U_t = 1,5 + 1,5 + 1,5 = 4,5 \text{ V}$$
$$I_{\text{max}} = i_{\text{max}} \text{ d'une pile soit } 150 \text{ ma}$$
$$r_s = 0,01 + 0,01 + 0,01 = 0,03 \Omega$$



Les générateurs en parallèle // :

Que se passe t-il si nous connectons maintenant nos générateurs comme le montage l'indique ?

- Nous remarquons que les résistances internes se retrouvent en parallèle, ce qui diminue la résistance interne globale
- La tension totale (on suppose les générateurs identiques) = la tension d'un générateur
- le courant total disponible est égal à la somme des courants pouvant être fournis par les générateurs.

Quels sont les avantages et inconvénients d'une telle association ?

Avantages

- 1 - Le courant disponible est multiplié par un facteur n= nombre de générateurs
- 2 - La résistance interne de l'ensemble est divisé par un facteur n = nombre de générateurs
- 3 - Un générateur H.S. ne perturbe que très peu l'ensemble

Inconvénients

- 1 - La tension d'ensemble est dictée par la tension unitaire des générateurs

Formation Technique F4 & F8 – Les courants

Nous retiendrons que dans la mise en // de générateurs :

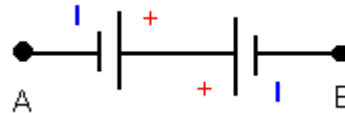
I total = n fois le courant d'un générateur

U totale = U d'1 générateur

R interne totale = divisée par n fois le nombre de générateurs

Les générateurs en opposition :

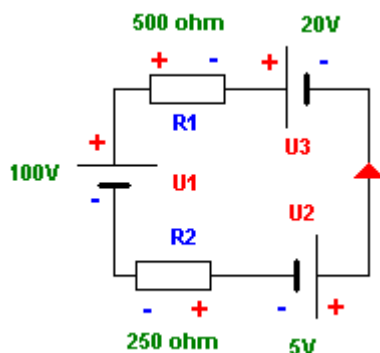
Rien ne nous interdit d'opérer un branchement de générateurs tel que celui que vous pouvez observer à gauche. Il peut s'agir d'une erreur ou au contraire d'une action délibérée. Qu'en est-il de la tension disponible aux points A et B ?



Dans le cas ci-dessus les tensions sont en opposition et vont se retrancher (essayez avec des piles si vous ne me croyez pas) ce qui peut nous conduire à 3 cas simples :

- Le générateur 1 fournit une tension supérieure au générateur 2, auquel cas c'est lui qui imposera le sens de circulation du courant dans le circuit. La résultante vaudra $U_1 - U_2$.
- Le générateur 1 fournit une tension égale au générateur 2, la résultante est nulle, aucun courant ne circule dans le circuit.
- Le générateur 1 fournit une tension inférieure au générateur 2, auquel cas c'est le générateur B qui imposera le sens de circulation du courant dans le circuit, la résultante vaudra $U_2 - U_1$.

Examinons cela à partir d'un exemple concret :



Ne vous posez pas trop de questions à propos des polarités inscrites sur le schéma, ni sur les équations présentées ici. Tout ceci sera vu en détail au chapitre consacré aux lois de Kirchhoff, cet exemple ne sert qu'à présenter une situation complexe de mise en série et opposition de générateurs. Nous avons fixé **arbitrairement** un sens de circulation du courant et placé des polarités en fixant comme règle : Quand le courant entre nous posons le signe "-", quand le courant sort d'un composant, nous posons le signe "+". Nous respectons les polarités des générateurs. Nous déterminerons ultérieurement si le sens de circulation du courant était correct ou pas. Nous cherchons le courant dans cette boucle.

Nous pouvons écrire les relations suivantes :
En partant de la batterie de 100V.

$U_1 + U_{r2} + U_2 + U_3 + U_{r1} = 0$ (nous ne tenons pas compte des polarités)
Sachant que $U = RI$ nous pouvons aussi écrire :

$U_1 + R_2.I + U_2 + U_3 + R_1.I = 0$
Remplaçons par les valeurs numériques, il vient :

$$\begin{aligned} 100 - 250.I - 5 - 20 - 500.I &= 0 \\ 100 - 5 - 20 - 250.I - 500.I &= 0 \\ 75 - 750.I &= 0 \\ 75 &= 750 I \text{ soit } I = 75/750 = 0,1 \text{ A} \end{aligned}$$

Bon c'est terminé, pas de panique, c'était seulement un exemple.

Retenez les propriétés essentielles des générateurs plus particulièrement le fait que l'on puisse mettre des tensions en série ou en opposition car ceci est important en radioélectricité.

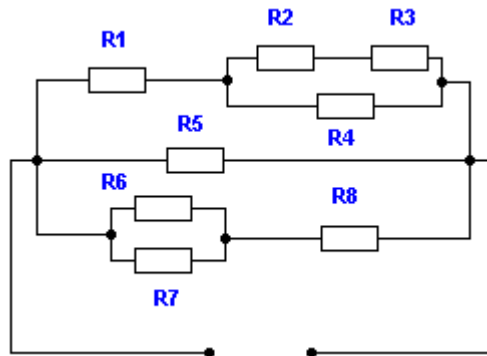
Formation Technique F4 & F8 – Les courants

Association de résistances



Nous savons calculer la valeur résultante de n résistances en série, nous sommes en mesure de faire la même chose pour des résistances en //, nous allons appliquer nos connaissances à une association série-//

Soit à déterminer la résistance équivalente aux points A et B de ce montage :



Les valeurs en ohm :

R1 : 10	R5 : 34
R2 : 20	R6 : 40
R3 : 20	R7 : 40
R4 : 60	R8 : 14

Comment attaquer ?

On voit aisément dans cet exemple que nous avons affaire avec une association qui comporte trois branches principales en //.

- 1 - celle formée par R1 R2 R3 R4
- 2 - celle formée par R5
- 3 - celle formée par R6 R7 R8

Au sein de chaque branche, on retrouve des associations série // faciles à calculer.

Calculons la branche n°1:

Nous avons R2 ET R3 en série
R2-R3 est en // sur R4
Cet ensemble est en série avec R1

$$\begin{aligned} R2 + R3 &= 20 + 20 = 40 \\ (R2+R3)//R4 &: 24 \\ ((R2+R3)//R4) + R1 &= 34 \end{aligned}$$

Calculons la branche n°2:

1 seule résistance R5

$$R5 : 34$$

Calculons la branche n°3:

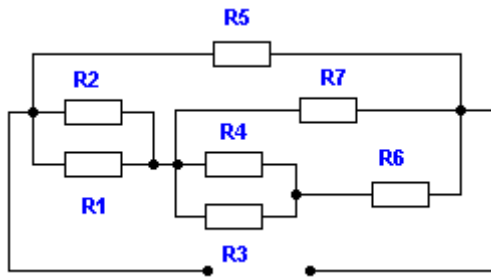
R6 est en // sur R7
R6//R7 en série avec R8

$$\begin{aligned} R6//R7 &: 20 \\ (R6//R7) + R8 &= 34 \end{aligned}$$

Voici notre montage réduit à 3 branches de 34 Ω en parallèle ce qui donne : 11,3 Ω

Formation Technique F4 & F8 – Les courants

Un autre exemple :



Toutes les valeurs en ohm

R1 = 100
R2 = 100
R3 = 20
R4 = 30
R5 = 60
R6 = 8
R7 = 20

Comme toujours dans de telles associations, nous retrouvons des branches séries et des branches parallèle. Le premier travail va consister à isoler les branches séries élémentaires.

Dans cet exemple, nous pouvons procéder comme suit, c'est une voie, il y en a d'autres.

Calcul de R3//R4 : 12 Ω

Calcul de l'association précédente en série avec R6 : 12 + 8 = 20 Ω

Calcul de l'association précédente en // avec R7 : 10 Ω

Calcul de R1//R2 : 50 Ω

Calcul de R1//R2 avec l'association précédente : 50 + 10 = 60 Ω

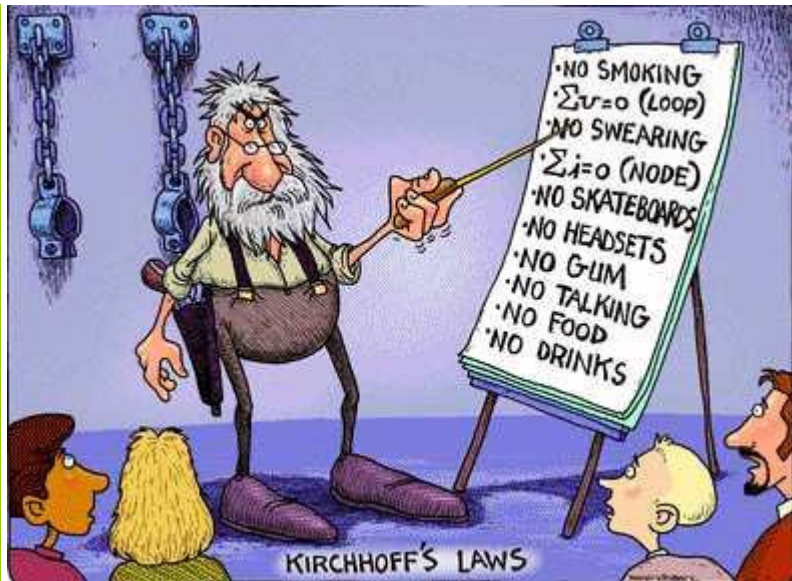
Calcul de l'association précédente avec R5 en // : 30 Ω

Il n'y a rien de bien méchant ici. Décomposez méticuleusement, calculez les résultantes, c'est tout.

Les lois de Kirchhoff

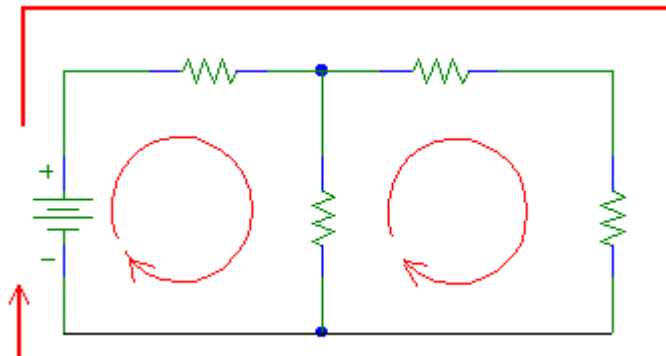


Ce grand physicien a laissé son nom à l'histoire, il faut dire que sa contribution a été de taille. Nous concernant (nous les radioamateurs) les lois décrites ici ne font pas partie du programme, toutefois elles nous accompagnent en permanence. C'est une raison suffisante pour faire une incursion dans ce domaine. Vous allez certainement être dérouterés par ces notions si vous les abordez pour la première fois. Ne vous laissez pas impressionner, il ne faut qu'un peu de logique et surtout de cohérence pour respecter les règles édictées. Bon courage et pensez que ces fameuses lois vous permettront de résoudre beaucoup de problèmes complexes.



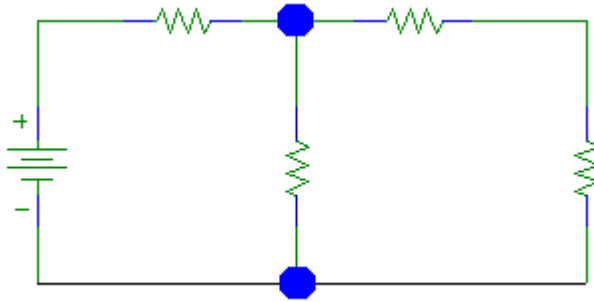
Que disent les lois de Kirchhoff ?

Des choses très intuitives que nous connaissons et que voici :
Dans un montage on trouve des mailles et des noeuds. Les noeuds sont les points de croisement des éléments (au moins 3 composants conducteurs etc.), les mailles sont les boucles formées par les composants et les conducteurs. En image cela donne ceci :



Les mailles sont représentées en **rouge**
Ce circuit comporte 3 mailles
Nous parlerons de la loi des MAILLES

Formation Technique F4 & F8 – Les courants

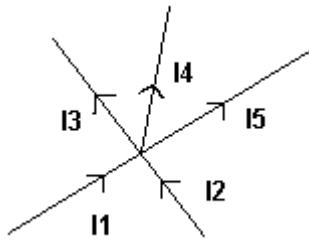


Les noeuds sont représentées en **bleu**
 Ce circuit comporte 2 noeuds
Nous parlerons de la loi des NOEUDS

Le décor est planté ... Passons aux lois

Loi des Noeuds	Loi des Mailles
La somme algébrique des intensités en un point est nulle.	La somme algébrique des tensions dans une maille est nulle
On peut exprimer cela en disant que la somme des courants entrant dans un noeud est égale à la somme des courants sortant de ce noeud.	Idem pour les tensions, (les chutes de tensions aux bornes d'éléments passifs sont négatives et se retranchent à la tension des éléments actifs).

Tout cela est peut-être un peu énigmatique, nous allons appliquer nos connaissances à un exemple.
 Il est extrêmement important de bien comprendre les notations des polarités pour appliquer les lois de Kirchhoff.

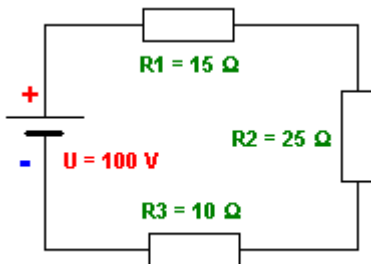


Les courants qui entrent dans le noeuds sont notés positifs, ceux qui en ressortent sont notés négatifs

Le courant entre par le potentiel le plus bas et sort par le potentiel le plus haut.

Nous pouvons passer à la pratique !

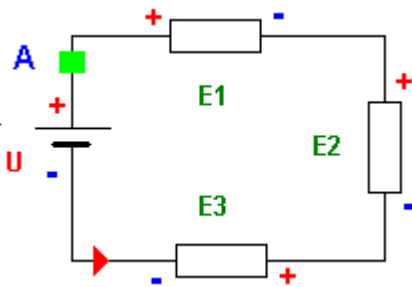
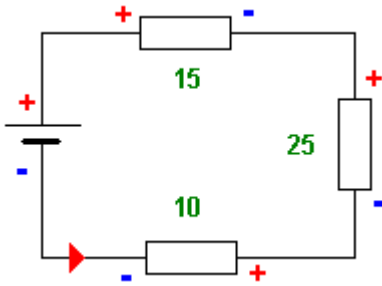
Comme à l'accoutumée, il conviendra d'être méthodique et de respecter les règles énoncées ci-dessus.



1

Voici le schéma de départ, nous connaissons bien ce type de montage et en appliquant la loi d'Ohm, nous pourrions tout aussi bien nous tirer d'affaire.
 Ici nous n'avons qu'une seule maille, l'exercice est très simple.

Formation Technique F4 & F8 – Les courants



2

Maintenant, nous allons indiquer sur le schéma les polarités sur les divers éléments de notre circuit en nous rappelant que nous choisissons un sens totalement arbitraire de circulation du courant.

Le courant entre dans les éléments passifs par le potentiel bas que nous noterons - et sort par le potentiel haut que nous noterons +.

Les éléments actifs (sources de tension/ courant) conservent leurs polarités.

3

Posons les équations. Chaque chute de tension aux bornes de la résistance est identifiée par E. Nous tournerons dans le sens horaire (c'est arbitraire, nous pouvons faire contraire) en partant du point A.

Il vient :

$$-E1 - E2 - E3 + U = 0$$

En tournant dans l'autre sens nous aurions eu :

$$- U + E3 + E2 + E1$$

Voici l'équation de la maille. Nous pouvons appliquer la loi d'Ohm en remplaçant E par sa valeur R.I

$$- R1 I - R2 I - R3 I + U = 0$$

$$-15 I - 25 I - 10 I + 100 = 0$$

$$-50 I + 100 = 0$$

$$-50 I = - 100$$

$$I = -100/-50 = 2 \text{ A}$$

Quelques précisions vitales :

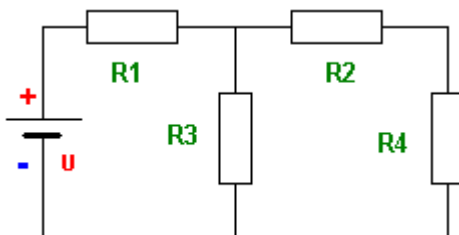
Cela peut paraître déconcertant de prime abord. L'application de lois de Kirchoff reposent sur le respect strict de règles.

- Dans le sens d'examen choisi, quand on aborde un composant par le (-), on ajoute la valeur
- Dans le sens d'examen choisi, quand on aborde un composant par le (+) on retranche la valeur
- On fixe arbitrairement le sens de circulation du courant
- On tourne autour de la maille selon un sens ou l'autre.

Certes ce n'est pas impressionnant car une simple addition suivie d'une division nous aurait fourni exactement le même résultat (et heureusement) sans passer par toutes ces étapes. (addition des résistances dans la maille $15+25+10 = 50 \Omega$ puis calcul du courant en divisant la tension du générateur 100V par la résistance totale 50Ω soit 2A). Cet exercice nous permet de comprendre le positionnement des polarités et d'appréhender la loi des mailles (somme algébrique des tensions nulle sur une maille).

Passons à l'exercice n°2.

Celui-ci consiste à écrire les équations des mailles pour bien maîtriser le principe.

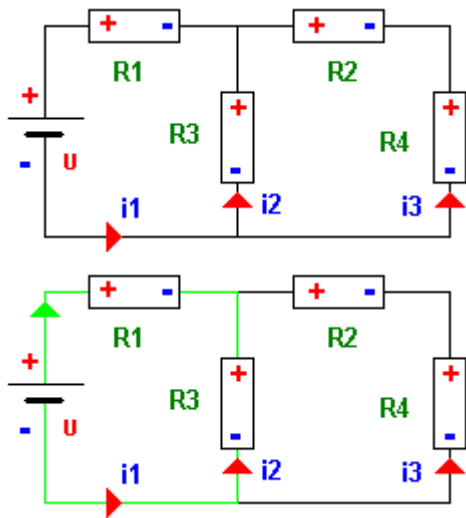


Voilà le schéma. Nous allons appliquer consciencieusement la règle.

1

Nous fixons arbitrairement un sens de circulation du courant comme l'indique la figure suivante. Partant de ce sens nous plaçons les polarités.

Formation Technique F4 & F8 – Les courants



2

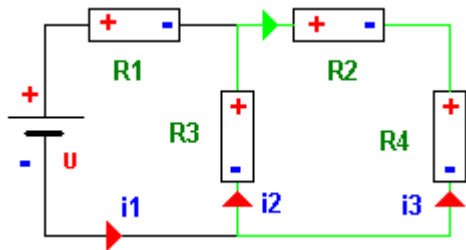
Le courant entre par un moins dans les éléments passifs et sort par un plus. Pour les sources de courant ou tension, les polarités sont respectées.

3

Il ne nous reste plus qu'à écrire l'équation de la maille en choisissant de parcourir celle-ci dans un sens ou un autre. Quand nous entrerons dans un composant par le moins, le signe sera **positif** (suivez bien) et quand nous entrerons par un plus le signe sera **négatif**.

Ce qui nous donne en supposant que nous partions de la résistance R1 en tournant dans le sens des aiguilles d'une montre :

$$-R1 I1 - R3 I2 + U = 0$$



$$- R2 I3 - R4 I3 + R3 I2 = 0$$

Nous pratiquons de manière identique pour la maille de droite en tournant dans le sens indiqué par la flèche verte. Précision importe :

Nous avons une résistance (R3) qui est commune aux deux mailles, nous conservons les polarités fixées lors de l'étude de la première maille. Il vient :

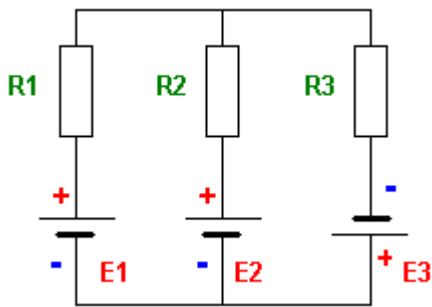
Bon, nous maîtrisons maintenant les éléments de base pour l'application des lois de Kirchhoff. Rappelons la méthode à suivre :

- Identifier une maille dans le circuit
- Donner un nom à chaque élément (Résistances, sources etc.)
- Définir un sens de circulation du courant (arbitrairement).
- Poser les polarités en vous rappelant que les sources de tension gardent leurs polarités "naturelles et que, en suivant le sens du courant, vous entrez dans une résistance par le moins et sortez par le +.
- Choisir un sens d'examen de la maille et écrire l'équation de la maille en tournant dans le sens choisi.

La finalité est de trouver un certain nombre d'équations indépendantes (autant que d'inconnues) et nous utiliserons la loi d'Ohm ($U = RI$) pour les chutes de tension dans les résistances.

Et pour finir un problème très classique et que l'on ne pourrait pas résoudre simplement avec la loi d'Ohm :

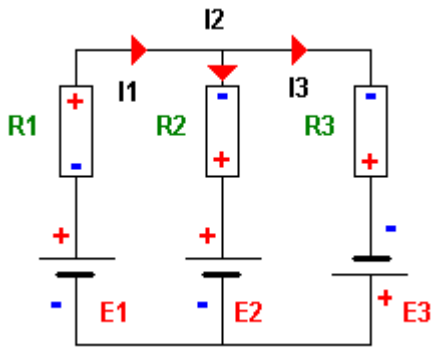
Formation Technique F4 & F8 – Les courants



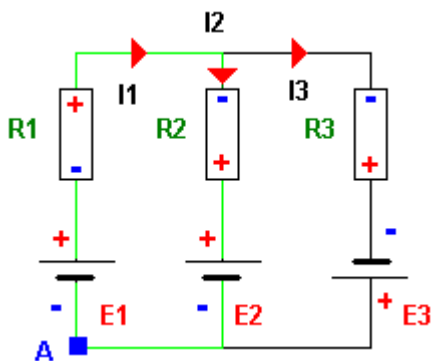
Voici le schéma. 3 résistances et 3 sources. Nous allons commencer par identifier les mailles, les noeuds, fixer le sens de circulation des courants et poser les polarités ce qui devrait nous donner le schéma suivant. Ces étapes sont indispensables, bien réalisées, l'analyse est ensuite très simple et ce ne sera plus qu'une question de calcul.

Les valeurs :

$$\begin{aligned} R1 &= 10 \, \Omega & E1 &= 5V \\ R2 &= 5 \, \Omega & E2 &= 10V \\ R3 &= 5 \, \Omega & E3 &= 5V \end{aligned}$$



Pour faire cela, nous avons appliqué les principes édictés plus haut. Pour le sens de circulation des courants, il est évident que nous n'avons aucune idée du sens réel, nous postulons qu'il circule comme cela, seul le calcul nous permettra de vérifier notre hypothèse car si le signe du courant est positif, notre hypothèse de départ se vérifie, si le signe est négatif cela signifie que le sens est inversé. Comme vous pouvez également le constater les sources ont leurs polarités normales. D'autre part (répétition, reformulation, la clef du savoir...) pour les éléments passifs, en suivant le sens du courant, quand on entre, le potentiel est plus bas qu'en sortant où il est plus élevé.



Attaquons nous à la première maille :

Nous tournons dans le sens des aiguilles d'une montre et nous partons du point A.

$$E1 + R1 I1 + R2 I2 - E2 = 0$$

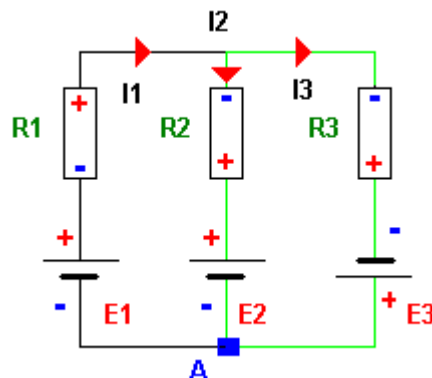
on peut arranger comme suit

$$E1 - E2 = -R1 I1 - R2 I2$$

Et remplacer par les valeurs

$$-5 = -10 I1 - 5 I2$$

Voici l'équation de la 1ère maille.



Nous tournons dans le sens des aiguilles d'une montre et nous partons du point A.

$$E2 - R2 I2 + R3 I3 + E3 = 0$$

on peut arranger comme suit

$$E2 + E3 = R2 I2 - R3 I3$$

Et remplacer par les valeurs

$$15 = 5 I2 - 5 I3$$

Voici l'équation de la 2nde maille.

Passons à la loi des noeuds :

en analysant notre montage, nous voyons que que le courant I1 se scinde en deux courants qui sont I2 et I3 et nous pourrons écrire :

$$I1 - I2 - I3 = 0 \text{ (la loi des noeuds)}$$

ou

$$I1 = I2 + I3$$

Pour déterminer la valeur des courants circulant dans ce circuit, nous n'avons plus qu'à résoudre le système de 3 équations à 3 inconnues.

$$-5 = -10 I1 - 5 I2$$

$$15 = 5 I2 - 5 I3$$

$$I1 = I2 + I3$$

Formation Technique F4 & F8 – Les courants

La résolution est laborieuse, vous pouvez ici appliquer la méthode vous convenant le mieux (Cramer, substitution etc.) Nous allons maintenant remplacer dans la 1ère équation I1 par son équivalent tiré de la loi des noeuds, à savoir $I1 = I2 + I3$.

1 - Equation de départ

$$\begin{aligned} -10 I1 - 5 I2 &= -5 \\ 5 I2 - 5 I3 &= 15 \end{aligned}$$

2 - Remplaçons I1 par I2+I3

$$\begin{aligned} -10 I2 - 10 I3 - 5 I2 &= -5 \\ 5 I2 - 5 I3 &= 15 \end{aligned}$$

3 - Il vient :

$$\begin{aligned} -15 I2 - 10 I3 &= -5 \\ 5 I2 - 5 I3 &= 15 \end{aligned}$$

4 - Multiplions le second terme par 2 et soustrayons

$$\begin{aligned} -15 I2 - 10 I3 &= -5 \\ 10 I2 - 10 I3 &= 30 \end{aligned}$$

5 - Le résultat de la soustraction est :

$$\begin{aligned} -25 I2 &= -35 \\ \text{Soit } I2 &= -35 / -25 = 1,4 \text{ A} \end{aligned}$$

6 - Il suffit ensuite de remplacer I2 par sa valeur pour déterminer I1 et I3.

$$I1 = -0,2 \text{ A et } I3 = -1,6 \text{ A}$$

I2 et I3 n'étaient pas positionnés dans le bon sens dans notre hypothèse de départ.

C'est fini, les lois des noeuds et des mailles sont derrière nous. Moment passionnant dans l'étude des circuits.

Théorème de Thévenin



AVERTISSEMENT

VOUS N'ETES PAS OBLIGE DE CONNAITRE CE QUI SUIT POUR LE PASSAGE DE LA LICENCE RADIOAMATEUR

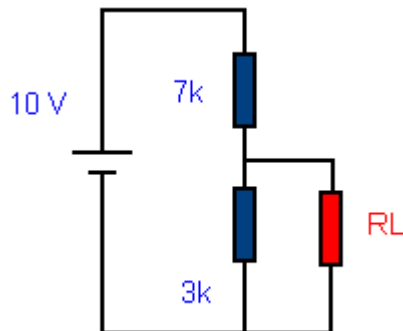
Vous voici arrivé à un tournant dans votre carrière... vous allez découvrir le théorème de Thévenin qui va vous apporter une grande aide dans l'analyse de vos schémas.

A quoi sert-il ?

A modéliser des circuits électriques complexes et à les réduire en circuits électriques très simples nous permettant d'appliquer les lois fondamentales de l'électricité sans aucune acrobatie de calcul. Le théorème de Thévenin est particulièrement adapté dès lors que la charge prend plus d'une valeur.

Au début était le commencement ...

Voici un réseau de résistances alimenté par une batterie de 10V. La charge est représentée par RL. Je désire connaître le courant qui circulerait dans la charge pour des valeurs de RL de 1,5 k, 3 k et 4,5 k.

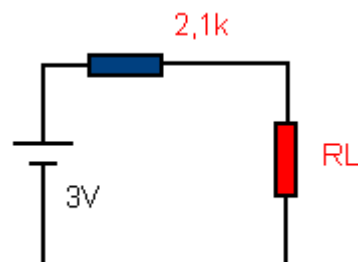


Vous allez vous amuser un certain temps avant de trouver les réponses et ce circuit est loin de représenter ce que l'on peut imaginer de pire en matière de complexité.

Bon maintenant, si je vous donne le montage suivant

et que je vous demande de me donner le courant qui circule dans RL quand celle-ci fait 900 Ω, vous me répondez instantanément :

$$I = \frac{U}{R} = \frac{3}{2100 + 900} = 1 \text{ mA}$$



et si je vous demande de me recalculer ceci pour RL = 3,9kΩ, vous me répondrez avec la même facilité : 0,5 mA etc.

Pourquoi est-ce si facile ?

Parce que le circuit ne présente qu'une maille et ainsi on peut appliquer immédiatement la loi d'ohm.

Quid du théorème de Thévenin ?

Formation Technique F4 & F8 – Les courants

Ce théorème va nous permettre de réduire n'importe quel circuit en un circuit à une maille, comportant une source de tension accompagnée en série d'une résistance

Quelques définitions (2) :

Tension de Thévenin :

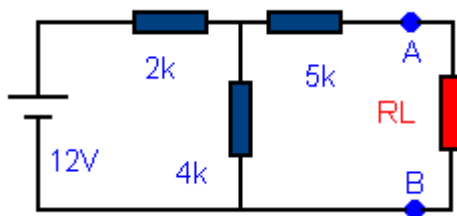
C'est la tension entre les bornes de la charge lorsqu'on ouvre cette résistance de charge (tension à vide). On l'appellera V_{th}

Résistance de Thévenin :

Résistance que l'on voit depuis les bornes de la charge, une fois que l'on a remplacé les sources de tension par un court-circuit et les sources de courant par un circuit ouvert et débranché la charge.

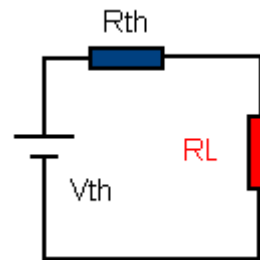
On l'appellera R_{th}

Pour bien comprendre la démarche, un exemple :

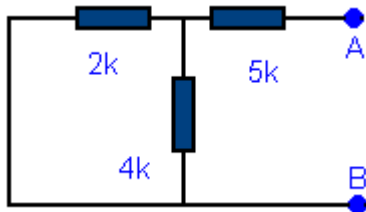


Soit le montage proposé à gauche. On se propose de déterminer le courant qui circule dans R_L quand R_L prend la valeur de 1 - 3 et 5k.

1 - notre objectif est de réduire le montage ci-dessus au montage de droite



- on débranche R_L
- on court-circuite la source
- On obtient le montage suivant



La résistance de 4k est en parallèle avec la résistance de 2k ce qui nous donne 1,33k.

A cette résistance équivalente vient s'ajouter la résistance de 5 k en série ce qui fait :

$$5 + 1,33 = 6,33 \text{ k}\Omega$$

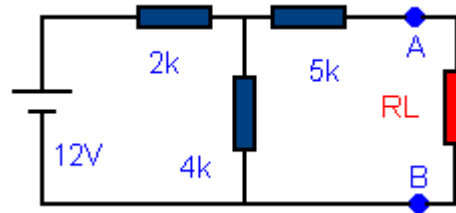
$$R_{th} = 6,33 \text{ k}\Omega$$

2 - Déterminons la résistance de Thévenin :

Formation Technique F4 & F8 – Les courants

3 - Déterminons la tension de Thévenin V_{th}

Reprenons notre schéma d'origine ---->



Il vient :

$$V_{th} = \frac{U \times 4}{2+4} = 8V$$

ici nous avons simplement calculé la proportionnalité du pont et multiplié ce rapport par la tension fournie par la source.

On peut aboutir différemment au même résultat en calculant avec le courant circulant dans le pont :

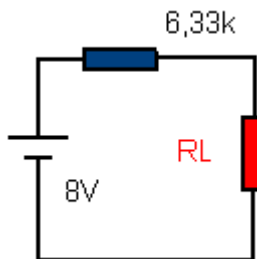
$$I = \frac{U}{R} \quad I = \frac{12}{2000+4000} = 2 \text{ mA}$$

La tension aux bornes de la 4kΩ sera :

$$U = R I \quad U = 4000 \times 2 \cdot 10^{-3} = 8V$$

1- débranchons la charge R_L

2 - on voit immédiatement un pont diviseur de tension formé par les résistances de 2 et 4 k. La résistance de 5 kΩ ne débite pas, puisqu'en l'air d'un côté, on retrouve intégralement la tension à son extrémité.



4 - Redessinons notre montage :

Donc notre montage peut se résumer à une source de tension de 8V avec un résistance série de 6,33 kΩ.

pour répondre à la question initialement posée, il nous suffit d'appliquer la loi d'Ohm comme suit

Valeurs de R_L : 1 - 3 - 5 kΩ

Calcul pour 1000 Ω

$$I = \frac{U}{R} = \frac{8}{6330 + 1000} = 1,09 \text{ mA}$$

Calcul pour 3000 Ω

$$I = \frac{U}{R} = \frac{8}{6330 + 3000} = 857 \mu A$$

Calcul pour 5000 Ω

$$I = \frac{U}{R} = \frac{8}{6330 + 5000} = 706 \mu A$$

Voilà nous sommes parvenus au terme de notre étude concernant le magnifique théorème de Thévenin. Octroyez-vous un peu de repos et une boisson fraîche et nous allons passer à l'étude du théorème de Norton qui va vous paraître très simple car il est au courant ce que Thévenin était à la tension.

Formation Technique F4 & F8 – Les courants

Théorème de Norton



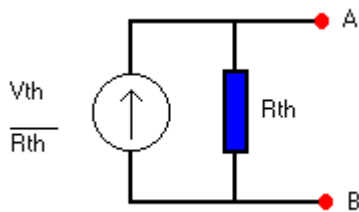
AVERTISSEMENT

VOUS N'ETES PAS OBLIGE DE CONNAITRE CE QUI SUIVIT POUR LE PASSAGE DE LA LICENCE RADIOAMATEUR

Tout aussi incontournable que son cousin Thévenin, le théorème de Norton vous amènera sur la voie royale de la modélisation. Comme nous maîtrisons bien Thévenin, Norton ne sera qu'une formalité pour nous.

Principe :

Dans le théorème de Thévenin, nous réduisons un montage quelconque à une source de tension associée à une résistance série. Dans le modèle de Norton, nous allons réduire le montage à une source de courant associée à une résistance en parallèle.



Comme vous pouvez le constater, rien de méchant.

Il faut toutefois bien comprendre le principe suivant :

Nous allons déterminer la résistance de notre circuit, celle-ci sera égale à la résistance de Thévenin, donc pas de problème.

Ensuite, nous allons calculer le courant de court-circuit, c'est-à-dire que nous allons remplacer la charge par un court-circuit (CC) et mesurer (plutôt calculer) le courant. Ce courant sera le courant maximum qui pourra être débité.

Ensuite il ne nous restera plus qu'à introduire une charge et à calculer le courant qui y circule en appliquant le principe de proportionnalité entre la charge et la résistance de Thévenin.

Comment allons nous réaliser cela ?

Concernant la résistance de Norton

Elle est identique à la résistance de Thévenin, donc nous appliquerons rigoureusement le même principe de calcul à cette différence près que la résistance sera en // sur la source de courant.

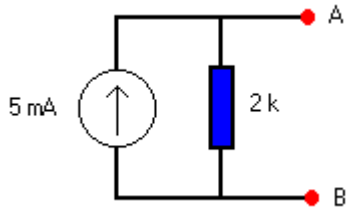
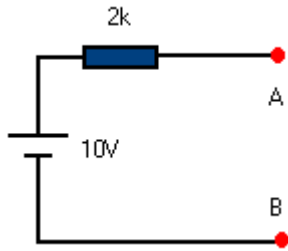
Concernant la source de courant

Nous allons court-circuiter la charge et calculer le courant qui circule

elle sera aussi égale à : $\frac{V_{th}}{R_{th}}$

Transformons un circuit de Thévenin en circuit de Norton:

Formation Technique F4 & F8 – Les courants



A votre gauche un classique modèle de Thévenin. Nous savons que la résistance est identique mais qu'elle est placée en // sur la source de courant, ce problème est déjà résolu.

Maintenant pour déterminer le courant, nous court-circuitons la sortie de notre modèle, c'est-à-dire que nous relierons le point A au point B. Un courant devrait circuler. Calculons sa valeur

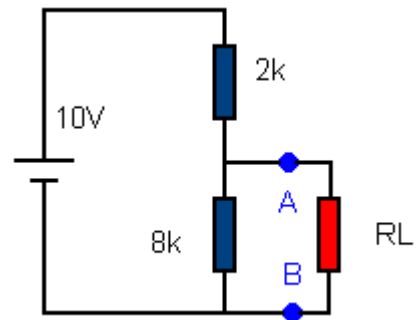
$$I = \frac{V_{th}}{R_{th}} \quad I = \frac{10}{2000} = 5 \text{ mA}$$

Et voilà, l'œuvre apparaît à gauche !

Un exemple ne serait-il pas le bienvenu ?

Voici le schéma suivant,

Calculer i dans R_L quand $R_L = 1 - 2$ et $8 \text{ k}\Omega$



Calculons notre résistance de Thévenin :

- 1 - débranchons la charge
- 2 - court-circuitons la source de tension

Il vient $2\text{k}/8\text{k} = 1600 \Omega$

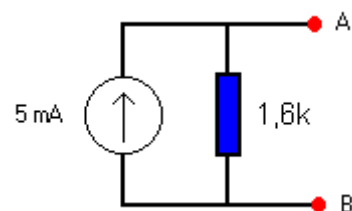
Calculons le courant de court-circuit :

- 1 - remplaçons la charge par un court-circuit

Ceci court-circuite la résistance de $8 \text{ k}\Omega$, il reste seulement la résistance de 2000Ω dans le circuit.

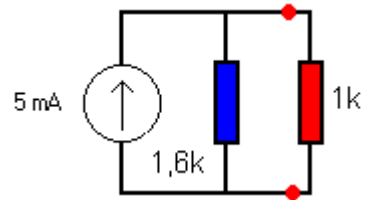
$$I_{cc} = 10/2000 \quad I_{cc} = 5 \text{ mA}$$

On peut donc dès maintenant retracer notre circuit comme suit :



Formation Technique F4 & F8 – Les courants

Connectons la première charge de 1000 Ω



Appliquons le principe de proportionnalité, attention, soyez vigilant, c'est naturellement dans la résistance de plus forte valeur que le courant est le plus faible

Nous avons un courant de 5 mA qui se scinde en deux courant inégaux dans Rth et RL.

Le courant circulant dans RL :

$$I_{RL} = \frac{I_{cc} \times R_{th}}{R_{th} + R_l} = \frac{5 \times 1600}{2600} = 3,08 \text{ mA}$$

de même le courant dans Rth :

$$I_{Rth} = \frac{I_{cc} \times R_l}{R_{th} + R_l} = \frac{5 \times 1000}{2600} = 1,92 \text{ mA}$$

Il ne vous reste plus qu'à calculer pour les autres valeurs de RL et puisque vous êtes dans de bonnes dispositions, essayez avec le modèle de Thévenin...

Les ponts



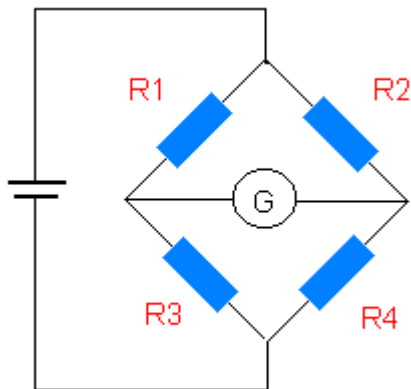
je ne sais trop si ce nom exotique est dû à la forme du montage, quoi qu'il en soit, il s'agit d'un ensemble qui a vocation d'être équilibré.

Il existe plusieurs types de ponts, nous nous contenterons d'étudier le plus célèbre, le pont de Wheatstone qui a certainement d'ailleurs donné naissance aux autres.

A quoi cela sert-il un pont ?

A traduire un équilibre ou un déséquilibre électrique (cela n'a rien à voir avec la santé psychologique). Les principales applications se retrouveront tout naturellement dans la mesure de grandeurs physiques.

Voyons un exemple

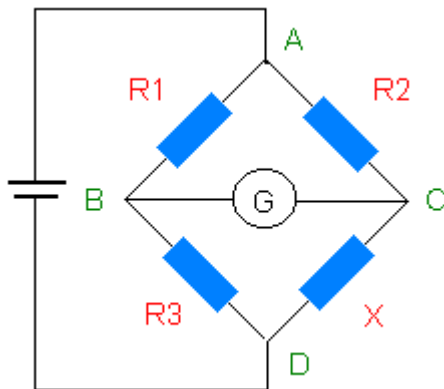


décrivons l'engin:

Le pont est constitué de 4 résistances, d'une batterie alimentant l'ensemble et d'un appareil de mesure (G :galvanomètre) qui s'il ne dévie pas dans un sens ou dans l'autre nous indique que le système est équilibré, c'est-à-dire qu'aucune différence de potentiel (ddp=tension) n'est présente à ses bornes et que par conséquent aucun courant n'y circule.

Naturellement, le circuit étant alimenté comme représenté sur le schéma, un courant circule dans chaque résistance du pont.

Et alors, que se passe-t'il dans ce pont ?



Bon, petites modifications par rapport au précédent schéma :

- R4 est devenue X (valeur inconnue)
- Nous avons ajouté pour chaque nœud du pont, une lettre (ABCD).

Notre résistance X à une valeur inconnue et c'est justement sa valeur que nous nous proposons de déterminer. Cette résistance est variable et nous l'avons faite varier pour obtenir l'équilibre du pont, c'est-à-dire le point "0" du galvanomètre. Nous en déduisons que la différence de potentiel en les points B et C est nulle (=0)

Posons quelques équations :

$$\begin{aligned} V_{ab} &= R_1 \times I_1 \\ V_{bd} &= R_3 \times I_1 \\ V_{ac} &= R_2 \times I_2 \\ V_{cd} &= X \times I_2 \end{aligned}$$

Convention :

- Le courant qui circule dans R1 et R3 sera appelé I1.
- Le courant qui circule dans R2 et X sera appelé I2.

V_{ab} = différence de potentiel entre les points A et B

Pour que le pont soit en équilibre, c'est-à-dire que la ddp entre les points B et C soit nulle ($V_{bc}=0$); il faut que les chutes de tension aux bornes de R1 et R2 soient identiques.

Idem pour R3 et X.
On en déduit que :

$$R_1 I_1 = R_2 I_2$$

Formation Technique F4 & F8 – Les courants

$$R3 I1 = X I2$$

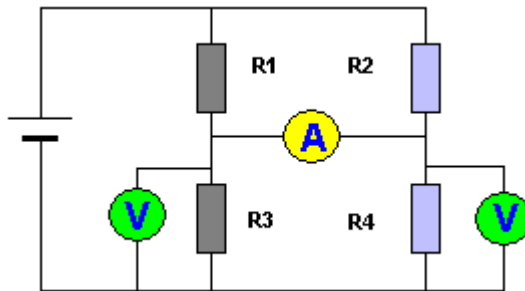
Comme nous sommes astucieux, reformulons notre équation :

$$\frac{R1 I1}{R3 I1} = \frac{R2 I2}{X I2}, \text{ simplifions, il vient : } \frac{R1}{R3} = \frac{R2}{X}$$

déduisons la valeur de X :

$$X = \frac{R2 R3}{R1}$$

Une autre façon de comprendre le montage en pont :



Voici une autre représentation du fameux pont de Wheatstone moins usuelle mais à laquelle vous êtes sûrement plus habitué. Que constate t-on?

- Nous avons affaire à un montage regroupant deux résistances en série R1+R3
- Nous retrouvons en // une autre branche regroupant R2+R4 en série.

Quand on parle de pont en équilibre, cela signifie que l'ampèremètre (noté A) ne voit circuler aucun courant, ni dans un sens ni dans l'autre. Les deux voltmètres (notés V) mesurent des tensions rigoureusement identiques. Ceci n'est réalisé qu'à la condition que la chute de tension aux bornes de R3 égale celle de R4 et conséquemment que la chute de tension aux bornes de R1= la chute de tension aux bornes de R2. Et pour en finir, nous en arrivons à la conclusion qu'il faut que le rapport R1/R3 soit équivalent au rapport R2/R4.

Si l'on modifie une seule des valeurs des résistances, on va provoquer un déséquilibre du rapport, les voltmètres indiqueront des tensions différentes et l'ampèremètre indiquera une circulation de courant.

Rien de plus simple à comprendre. Amusez vous avec des résistances (dont au moins une variable) à réaliser un pont et faire des mesures, on retient mieux ce que l'on a expérimenté. Vous trouverez, plus tard, (chapitre métrologie) des applications du pont, plus particulièrement en alternatif.

Formation Technique F4 & F8 – Les courants

Le shunt



Tout finit par arriver, nous allons voir une application du diviseur de courant (2 résistances en //).

Quelle est la nature du problème ?

L'intensité du courant circulant dans un circuit se mesure avec un ampèremètre, appareil de mesure s'insérant en **serie** dans le circuit. Un ampèremètre n'est rien d'autre qu'un mesureur de débit d'eau appliqué à l'électricité, nous étudierons plus tard le principe de fonctionnement du voltmètre et de l'ampèremètre.

L'appareil que nous utilisons est un système utilisant les effets magnétiques du courant, il est muni d'une belle aiguille qui dévie et sur le plan électrique, il présente une résistance très faible.

Or les "capteurs" de mesure de courant ne sont capables de mesurer qu'un courant extrêmement faible, voire infinitésimal.

Notre problématique :

Mesurer un courant de plusieurs ampères avec un appareil de mesure ne supportant que le passage d'1 milliampère, tout dépassement de cette valeur occasionnant la destruction irrémédiable de l'engin.

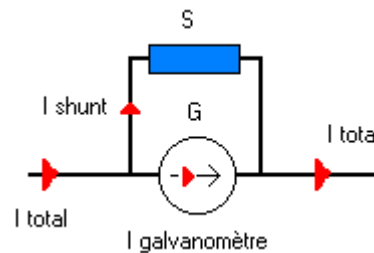
Et notre solution :

Il nous faudrait laisser passer 1 milliampère dans notre appareil de mesure et dériver l'autre grosse partie de courant dans une autre résistance extérieure, bref faire un diviseur de courant. Eurêka !

Le schéma

une portion du circuit (celle qui nous intéresse) est représentée ici. Nous avons notre galvanomètre dans lequel circule un courant I_g et notre shunt S dans lequel circule un courant I_s .

A l'entrée le courant total I_{total} se scinde en deux courants et se reforme à la sortie en un courant I_{total} .



Les données :

I_g : courant dans le galvanomètre
 I_t : courant total à mesurer
 I_s : courant dans le shunt
 R_g : résistance du galvanomètre
 R_s : résistance du shunt

Sur le plan calcul :

Nous parlerons du facteur "m", dit multiplicateur du shunt, c'est-à-dire la capacité qu'a le shunt de "multiplier" le courant passant dans le galvanomètre. Attention, il n'y a pas de multiplication de courant, c'est une image.

Les indispensables formules :

m : multiplicateur du shunt

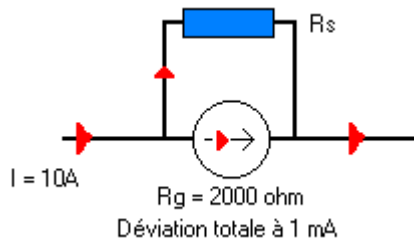
$$m = \frac{R_g + R_s}{R_s}$$

R_s : valeur de la résistance shunt

$$R_s = \frac{R_g \cdot I_g}{I_t - I_g}$$

Et l'incontournable exemple qui clarifie les idées:

Formation Technique F4 & F8 – Les courants



Nous avons à mesurer un courant maximum de 10A avec un galvanomètre qui dévie à pleine échelle pour 1 mA. Sa résistance $R_g = 2000 \Omega$

Quelle sera la valeur de la résistance shunt à mettre en parallèle pour obtenir à pleine échelle, une indication de 10 A ?

Nous appliquerons directement la formule suivante:

$$R_s = \frac{R_g I_g}{I_t - I_g}$$

et nous obtiendrons :

$$R_s = \frac{2000 \times 0,001}{10 - 0,001} = 0,2 \Omega$$

Vous constatez :

- 1 - que la résistance de dérivation du shunt est très faible ce qui peut conduire à des problèmes de réalisation.
- 2 - que le courant dans cette résistance sera très élevé ce qui implique que celle-ci soit correctement dimensionnée. (puissance admissible)

Formation Technique F4 & F8 – Les courants

Le magnétisme



Introduction :

Nous allons aborder un chapitre extrêmement important pour notre activité (n'oublions pas que notre finalité est de produire des ondes électromagnétiques), les applications du magnétisme et de l'électromagnétisme sont omniprésentes. Nous nous contenterons de décrire les effets du magnétisme, pas d'expliquer le comment et pourquoi du phénomène.

Tout le monde sait ce qu'est un aimant, ceux-ci sont connus depuis longtemps. Ils sont composés d'oxydes de fer ($Fe_3 O_4$ pour les chimistes), ce sont des aimants naturels.

On peut toutefois réaliser un aimant avec une barre d'acier que l'on aimantera avec un aimant naturel et on obtiendra un nouvel aimant. (qui n'a pas rûlé en constatant qu'un tournevis ayant séjourné trop longtemps à proximité d'un aimant était magnétisé ?).

Mais il est également possible d'obtenir la même chose avec un courant électrique, le saviez-vous ?

Examinons les propriétés des aimants:

Les pôles:

les propriétés magnétiques qui consistent à attirer de la limaille de fer ne se manifestent qu'aux extrémités. Ces extrémités s'appellent les **pôles**

La boussole:

C'est un aimant monté sur axe. En dehors de toute autre influence que celle du champ magnétique terrestre, elle s'oriente sur un axe Nord-Sud. L'extrémité qui s'oriente vers le nord est appelé **pôle nord**

Phénomènes magnétiques liés à la présence d'un aimant:

Un aimant approché d'une boussole fait tourner l'aiguille de celle-ci traduisant ainsi une **action mécanique**.

Actions réciproques des aimants :

Si nous approchons deux aimants l'un de l'autre, on constate que :

- les pôles de même nom se repoussent
- les pôles de noms contraires s'attirent

Action d'un aimant sur un corps non aimanté:

L'effet magnétique ne se manifeste pas sur tous les corps, seuls les substances dites magnétiques y sont sensibles (fer, cobalt, nickel et alliages...)

Aimantation par influence :

Pour certaines substance, la magnétisation disparaît dès que cesse la cause de la magnétisation, pour d'autres celle-ci demeure.

Expérience de l'aimant brisé:

Si l'on prend un aimant, qu'on le casse en deux, nous nous retrouvons avec deux aimants munis chacun d'un pôle nord et d'un pôle sud. On en déduit qu'il est impossible d'isoler un pôle d'aimant.



L'électromagnétisme



Voici le chapitre consacré au magnétisme du au courant. Nous allons voir ici des propriétés qui sont mises en application au quotidien dans notre hobby.

Quels sont les systèmes susceptibles de produire un champ magnétique ?

Fondamentalement deux :
1 - les aimants
2 - les courants électriques

Mise en évidence du champ magnétique :

Prenez un aimant droit, une boussole et approchez l'aimant de la boussole. Vous constatez que que vous pouvez faire dévier l'aiguille. Il y a bien une action mécanique à distance du champ magnétique

Définition :

On dit qu'il existe un champ magnétique, aussi appelé **excitation manétique**, si en une région de l'espace, il existe un état magnétique susceptible de se manifester par des forces

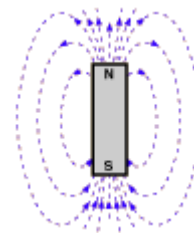
Symbole et unité:

--->
H : **vecteur** excitation magnétique
qui se mesure en ampère/mètre **A/m**

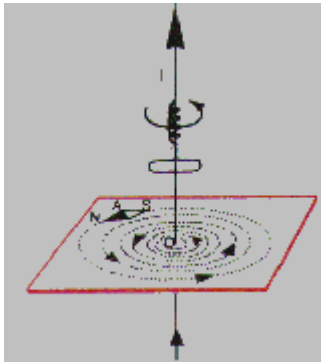
On ne doit plus parler aujourd'hui du champ magnétique H, mais de l'excitation magnétique. Que ceux dont les études remontent à un certain temps s'y résolvent ! De même l'induction magnétique B est devenue le champ magnétique.

Comment se matérialise un champ magnétique ?

Par des lignes de force (ou de champ c'est pareil), pour les voir, il suffit d'étaler sur une table de la limaille de fer et d'approcher un aimant. La limaille va épouser les lignes du champ.



Formation Technique F4 & F8 – Les courants



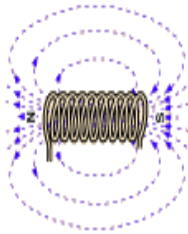
Le dessin ci-dessus représente un conducteur traversé par un courant électrique. Les lignes de champ sont clairement visibles.

Retenez ce qui suit :

Un champ magnétique est produit dès l'instant où une charge électrique est en mouvement.

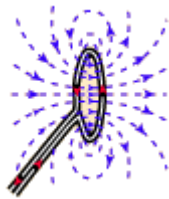
Donc tous nos fils parcourus par un courant généreront un champ magnétique. Cette propriété fut découverte par Oersted en 1819.

Le tire bouchon placé sur l'axe du fil et dans le sens du courant vous indique le sens du champ. (Ce moyen mnémotechnique est dû au grand Maxwell). La boussole indique la direction du champ (on voit qu'elle est tangente aux lignes de force)



Et un courant traversant une bobine (il faudrait dire un solénoïde) ?

Le champ à l'intérieur d'une bobine est pratiquement uniforme. On remarquera que les lignes de champ se referment à l'extérieur de la bobine, créant ainsi des fuites et du rayonnement.



Comment déterminer les faces sud et nord ?

C'est très simple, la face sud est toujours la face par laquelle pénètrent les lignes de champ



Et si nous utilisons un tore, quid du champ ?

Un tore est un anneau de matériau magnétique, il est très utilisé pour la réalisation des inductances en haute fréquence. Les lignes se referment à l'intérieur du tore, il n'y a pas de fuite, et si l'on place des boussoles à proximité d'un tore, elles indiqueront le nord sans être perturbées par celui-ci

Formation Technique F4 & F8 – Les courants

Relation champ magnétique, excitation magnétique :

Petit rappel :

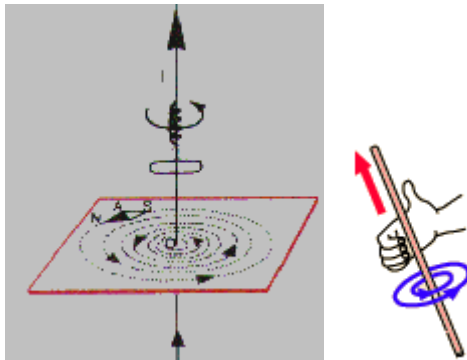
Nous savons que les actions magnétiques, quelles qu'elles soient sont des actions à distance. (boussole par exemple).
Nous retiendrons que toutes les actions dues à un champ magnétique sont liées à l'intensité de ce champ. Cette intensité sera notée B (vecteur que je ne peux pas reproduire en HTML)

$$B = \mu_0 \mu_r H$$

B : Champ magnétique en Tesla
 μ_0 : perméabilité du vide = $4 \pi 10^{-7}$
 μ_r : perméabilité relative = **1 pour le vide**

retenez bien cette valeur de μ_0 :
 $4 \pi 10^{-7}$

Nous pouvons déterminer quelle sera la valeur de l'intensité du champ magnétique pour différentes formes de bobinages:



Cas n°1 : fil rectiligne

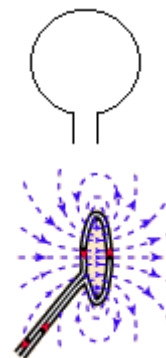
$$B = \frac{\mu_0 I}{2 a}$$

avec B en Tesla
 $\mu_0 = 4 \pi 10^{-7}$
I en ampère
a = distance en mètre en le fil et le point de mesure

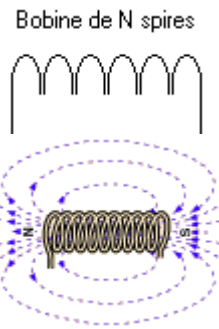
Cas n° 2 la spire

$$B = \frac{\mu_0 N I}{2 r}$$

avec B en Tesla
 $\mu_0 = 4 \pi 10^{-7}$
I en ampère
r = rayon en mètre de la spire
N : nombre de spires



Formation Technique F4 & F8 – Les courants



Cas n°3 bobine longue

$$B = \frac{\mu_0 N I}{l}$$

avec B en Tesla

$$\mu_0 = 4 \pi 10^{-7}$$

I en ampère

l = longueur en mètre du solénoïde

Notion de flux:

Le flux magnétique est la mesure du flux d'induction magnétique B traversant une surface donnée S

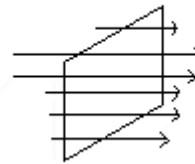
$$\Phi = B S$$

Avec :

Φ en Weber

S en m²

B en Tesla



Et si notre surface pour une raison ou une autre n'est pas rigoureusement perpendiculaire au champ, la formule s'écrit

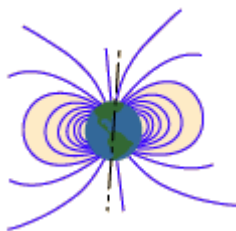
$$\Phi = B S \cos \alpha$$

Avec α = angle formé par le plan de la surface et le champ

La notion de flux est extrêmement importante pour la suite comme vous allez le constater. D'ici là nous allons faire une petite pause pour vous permettre de bien assimiler la déclinaison d'excitation magnétique, de champ magnétique et de flux.

Et tout naturellement si on déterminera le flux embrassé par une bobine de N spires par la formule

$$\Phi_{\text{total}} = N \Phi$$



Avez-vous une idée de la valeur du champ magnétique terrestre ?

Celle-ci est très faible, de l'ordre de $4 \text{ à } 5 \cdot 10^{-4} \text{ T}$ qui plus est elle n'est pas constante, puisque très forte aux pôles et diminuant à l'équateur.

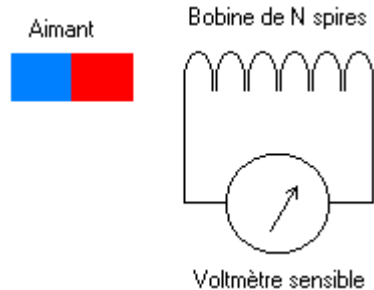
Formation Technique F4 & F8 – Les courants

Le moment est venu de passer à la suite, à savoir l'induction électromagnétique.

Réalisons le montage et l'expérience suivants:

Rien de compliqué, on réalise une bobine contenant un nombre N de spires, on relie cette bobine à un voltmètre sensible (càd capable de mesurer de toutes petites tensions) et on se munit d'un aimant.

Quand nous allons approcher notre aimant de l'axe de la bobine, nous allons constater que le voltmètre dévie. Comment un tel miracle peut-il se produire ?



Notre aimant par définition produit un champ magnétique permanent, vous le savez déjà. Quand nous approchons notre aimant, nous

produisons une variation du flux Φ . C'est cette **variation du flux** qui produit cette tension détectée par notre voltmètre

Ce phénomène s'appelle l'induction électromagnétique, il y a création d'un courant induit dans la bobine et conséquemment d'une tension induite.

Ceci nous amène tout naturellement vers la loi de Lenz qui dit :

Une variation $\Delta \Phi$ du flux à travers un circuit électrique crée un courant induit i . Le sens du courant i est tel que les effets qu'il produit tendent à s'opposer à la cause qui lui a donné naissance

Nous retiendrons que toute variation de flux magnétique produit un courant induit

Pouvons nous déterminer la valeur de la fem (force électromotrice) induite ?

oui simplement, la loi de Lenz nous dit :

$$e = - \frac{d \Phi}{dt}$$

Ce qui se traduira pour nous par :

e = variation du flux / variation du temps.
ceci est vrai pour une spire, il faudrait multiplier ce résultat nous N spires

Auto-induction:

Formation Technique F4 & F8 – Les courants

Si nous poussons notre raisonnement, nous avons vu qu'une spire et a fortiori un solénoïde parcourus par un courant produisent un champ magnétique B. Si ce courant est variable, le champ sera variable, ce qui veut dire que le flux sera également variable ($\Phi = B S \cos \alpha$) ce qui signifie également qu'il y aura un courant induit dans notre solénoïde qui respectera la loi de Lenz, c'est-à-dire qui s'opposera à la cause lui ayant donné naissance, c'est-à-dire au courant initial variable.

Ce phénomène s'appelle l'auto-induction de l'anglais self induction.

La tension d'auto-induction aura pour valeur :

$$e = - \frac{d\Phi}{dt}$$

$d\Phi$: variation du flux

dt : variation du temps en seconde
e : en volt

$$\Phi = L i$$

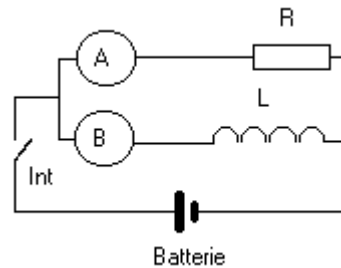
$$e = - L \frac{di}{dt}$$

En l'absence de matière ferromagnétique (de noyau), le flux propre à travers un circuit est proportionnel à l'intensité du courant dans ce circuit

Mise en évidence de l'auto-induction :

Il s'agit d'une classique expérience de lycée, voici le montage, R à la même valeur ohmique que L, A et B sont des ampoules

Quand on ferme l'interrupteur Int, la lampe A brille immédiatement, tandis que la lampe B s'éclaire progressivement. A l'ouverture de Int; phénomène inverse, A s'éteint tout de suite, B s'éteint progressivement



Explication du phénomène :

A la fermeture de Int, un courant s'établit dans L, ce courant provoque un flux magnétique. Comme ce flux s'établit progressivement, il y a apparition d'une fem auto-induite qui s'oppose à la cause qui lui a donné naissance, à savoir l'établissement du courant initial

Conséquences :

- retard à l'allumage
- retard à l'extinction

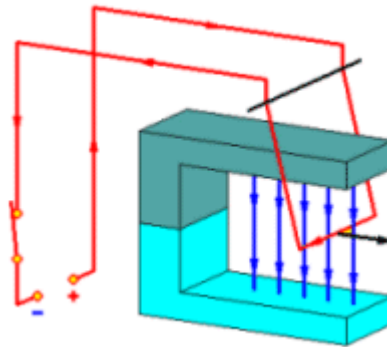
Que se passe-t-il si un conducteur parcouru par un courant se trouve plongé dans un champ magnétique ?

Formation Technique F4 & F8 – Les courants

Il subit une force, dite force de Laplace. Regardez ce petit dessin :

Nous avons un conducteur **articulé autour d'un axe** (en noir au dessus de l'aimant), alimenté par une batterie avec un interrupteur dans le circuit et un aimant permanent. Initialement le circuit est ouvert, il n' a pas de courant dans le circuit.

Nous fermons le circuit, un courant circule et le conducteur subit une force F qui le fait tourner autour de son axe. Si nous ouvrons le circuit le conducteur retrouve sa position normale.



Si nous inversons le sens du courant, le conducteur de déplacerait dans l'autre sens

Si nous inversons le sens du champ magnétique, nous obtiendrions le même effet à savoir un déplacement en sens contraire.

Cette force, appelée **Force de Laplace** est quantifiée par la formule

$$F = I B l \sin \alpha$$

Application la plus célèbre : le **moteur électrique** et le **haut-parleur électrodynamique**. Celui-ci est constitué d'une bobine pouvant coulisser entre les pôles d'un aimant. La bobine est solidaire de la membrane du HP. Quand la bobine est alimentée, celle-ci est soumise à une force de Laplace qui la fait de déplacer et ce déplacement crée des ondes de pression que nous entendons.

Avec F en newton
 I en Ampère
 B en Tesla
 l en mètre (longueur du déplacement)

Nous nous arrêterons ici pour l'étude de l'électromagnétisme

Nous n'avons fait qu'effleurer ce sujet, il n'est pas nécessaire de tout savoir pour le passage de la licence, toutefois il n'est pas inintéressant de savoir ce qui se passe dans nos circuits.

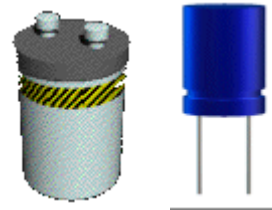
Les phénomènes d'induction involontaires vous feront passer quelques nuits blanches devant un montage au comportement inattendu et vous serez souvent surpris du luxe de précautions que l'on prend dans les montages hautes fréquences pour les éviter (blindage, découplage, self d'arrêt etc.)

Le condensateur



Dans ce chapitre, nous allons étudier le célèbre condensateur qui est un des constituants essentiels de nos montages. Il y a plusieurs approches possibles pour cette étude, de la plus simple à la plus compliquée. Nous nous attacherons à décrire son comportement en continu, pour l'alternatif, ce sera une autre histoire...

Commençons par le symbole et quelques images:



Comment est constitué un condensateur ?

Aussi surprenant que cela puisse paraître, un condensateur est constitué par deux conducteurs séparés par un isolant. ceci apparaît clairement sur le symbole

Quelles sont ses propriétés fondamentales ?

Un condensateur ne laissera pas passer le courant continu, il le bloquera et inversement laissera passer le courant alternatif, attention cette dernière assertion est soumise à conditions.

On dit souvent qu'un condensateur est un réservoir d'énergie. C'est plus ou moins vrai, c'est vrai quant au bilan énergétique, c'est moins vrai quant à son fonctionnement. Nous retiendrons quand même cette image.

On parle de la capacité d'un condensateur, de quoi s'agit-il ?

C'est le rapport entre la quantité d'électricité Q qu'il est susceptible d'emmagasiner et la tension U à ses bornes

$$C = \frac{Q}{U}$$

Avec :
C en Farad
Q en Coulomb
U en volt

La capacité du condensateur s'exprime en Farad. Le Farad est une grandeur énorme aussi les sous-multiples sont-ils plus fréquemment utilisés

Sous-multiples du Farad

Farad = 1	1 F
MilliFarad = 10^{-3} F	1 mF
MicroFarad = 10^{-6} F	1 μ F
NanoFarad = 10^{-9} F	1 nF
PicoFarad = 10^{-12} F	1 pF

Formation Technique F4 & F8 – Les courants

De quoi dépend la capacité du condensateur ?

- elle est proportionnelle à la surface **S** des armatures
- elle est inversement proportionnelle à l'épaisseur **e** du diélectrique (isolant)
- elle est proportionnelle à la permittivité relative ϵ_r également appelée constante diélectrique.
- elle est proportionnelle à la permittivité absolue ϵ_0 également appelée constante diélectrique.

$$\epsilon_0 = \frac{1}{36 \pi 10^9}$$

$\epsilon_r = 1$ pour le vide, +/- 1 pour l'air

$$C = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 S}{e}$$

avec:

C en Farad

e en mètre

S en m²

ϵ_0 = dépendant du matériau utilisé

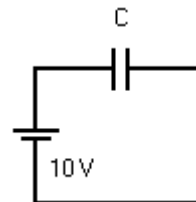
$$\epsilon_0 = 1/36 \pi 10^9$$

Nota : Souvenez-vous ou essayez de vous souvenir de la valeur de ϵ_0 , nous la retrouverons (mais bcp plus tard)

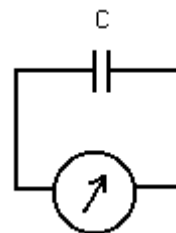
Passons à la pratique :

Nous réalisons le petit montage suivant:

Nous relierons un condensateur C à une batterie fournissant 10V. Nous laissons mijoter un peu histoire de bien "charger" notre condensateur.



Maintenant, nous déconnectons notre batterie et nous mesurons la tension aux bornes de notre condensateur avec un voltmètre ce qui nous donne le montage suivant :



Là nous mesurons à peu près notre tension de batterie, mais ne l'oublions pas celle-ci n'est plus connectée.

Nous venons de vérifier expérimentalement que notre condensateur a stocké de l'électricité c'est-à-dire des charges positives sur une armature, des charges négatives sur l'autre.

Comme vous êtes attentif et studieux, vous allez m'objecter que dans les propriétés fondamentales du condensateur il avait été écrit que celui-ci ne laissait pas passer le courant continu !

C'est vrai. Tout cela est exact. Notre condensateur s'est chargé, un courant a circulé mais c'est fini, une fois la charge effectuée, il n'y a plus de circulation d'électrons, donc pas de courant. Le condensateur va se comporter comme un interrupteur ouvert dans un circuit à courant continu.

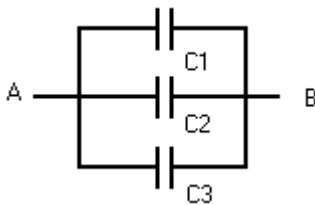
Formation Technique F4 & F8 – Les courants

Tout ceci nous amène à penser que nous utiliserons des condensateurs quand nous aurons besoin de diriger ou véhiculer des signaux alternatifs d'un point vers un autre ou bien quand nous ressentirons le besoin d'isoler un ensemble ou un composant d'une composante continue indésirable. Ce ne sera pas là la seule utilisation du condensateur mais nous verrons plus loin.

Est-il possible d'associer des condensateurs comme nous l'avons fait pour les résistances ?

Mais très certainement, comme ceci :

Condensateurs en parallèle

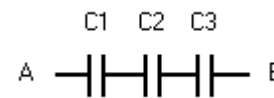


Si j'ai 3 réservoirs d'eau intuitivement je comprends qu'en les connectant de la sorte, j'ai augmenté ma capacité aqueuse. Il en va de même avec les condensateurs.

la capacité résultante aux points A-B sera

$$C_{\text{totale}} = C1 + C2 + C3$$

Condensateurs en série



Inversement, si je connecte mes réservoirs comme suit, je me rends compte immédiatement que mon débit d'eau sera limité par le débit du plus petit réservoir.

la capacité résultante aux points A-B sera

$$C_{\text{totale}} = \frac{1}{\frac{1}{C1} + \frac{1}{C2} + \frac{1}{C3}}$$

Principe pour le calcul :

En parallèle, pour les condensateurs on applique le principe de calcul des résistances en série.
En série, pour les condensateurs, on applique le principe de calcul des résistances en parallèle

Et l'énergie dans tout cela ?

Nous savons que nos condensateurs stockent de l'énergie mais combien? Telle est la question.
la réponse est :

$$W = \frac{1}{2} CU^2 = \frac{1}{2} QU = \frac{Q^2}{2C}$$

W en joule
C en Farad
Q en Coulomb
U en volt

Et le champ électrique ?

Puisque nos condensateurs sont chargés électriquement, il paraît évident qu'il existe entre les armatures un champ électrique. Ce champ a pour valeur :

$$E = \frac{U}{e}$$

E en volt/mètre
U en volt
e = distance entre plaques en mètre

Aspects technologiques:

Formation Technique F4 & F8 – Les courants

Il existe une variété considérable de condensateurs, chacun a un usage particulier. Certains condensateurs seront plus stables à la HF que d'autres, certains sont conçus pour les forts courants, d'autres pour des applications particulières, d'autres sont polarisés.

Dans nos montages VHF ou UHF le condensateur classique ne sera pas seulement un condensateur, mais également un élément selfique (la longueur des connexions aux hautes fréquences représentent une part non négligeable de la longueur d'onde), il faudra utiliser des condensateurs spéciaux.

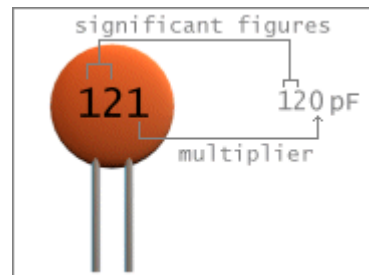
On veillera à toujours choisir le condensateur idoine pour l'application choisie.

Un autre aspect qu'on ne peut passer sous silence est la tension d'isolement. Il s'agit de la tension maximum d'utilisation. Soyez vigilant à ce paramètre sous peine de vous voir transformé en Pierrot enfariné ! C'est particulièrement vrai avec nos alimentations haute tension pour amplificateurs à tubes!

Le marquage :

Soit en clair (ou presque) soit comme les résistances. Vous trouverez à droite un type de marquage fréquent.

Soyez attentif au fait que le 3ème chiffre est un multiplicateur, si vous lisez 120, il s'agit d'un condensateur de 12 pF et non pas 120 pF. Le condensateur de 120 pF est marqué 121.



Dépannage :

le condensateur est un composant facétieux, surtout quand il vieillit ! Combien de récepteurs ou émetteurs n'ayant pas fonctionné depuis longtemps, à la remise sous tension seront complètement silencieux.

Les condensateurs présentent (entre autres) deux défauts courants :

- 1 - la fuite
- 2 - le court-circuit

Si le deuxième cas est relativement facile à détecter (il a fumé, ou il est chaud, on retrouve à sa sortie une composante continue etc.), le premier cas est bien plus sournois. Dans ce cas, le condensateur présente une résistance directe qui est loin d'être infinie, et il vous dérive vos signaux vers la masse (cas de découplages plus particulièrement) ou vous écroule une tension continue.

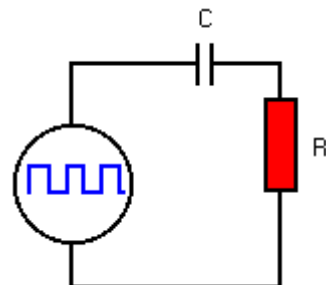
Vous n'y échapperez pas !

Il fallait bien y venir à un moment ou à un autre, càd parler de la loi de charge et de décharge d'un condensateur. Sachez que ceci n'est donné que pour votre information, je ne pense pas que le passage de la licence impose cette connaissance (à vérifier)

Nous réalisons le montage suivant, à savoir un générateur de tension carrée, un condensateur C et une résistance R.

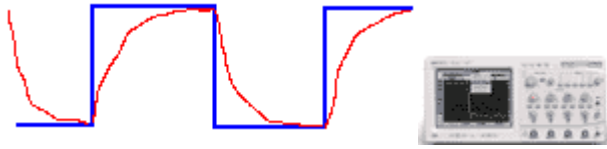
Maintenant grâce à un appareil que tout radioamateur doit posséder et qui s'appelle oscilloscope, nous allons examiner l'allure des tensions aux bornes du générateur et du condensateur.

Il y a là aussi plusieurs angles d'attaque possibles. Nous allons rester simple et nous baser sur un exemple.



Voici le résultat

Formation Technique F4 & F8 – Les courants



- En bleu, la tension observée aux bornes du générateur
- En rouge, la tension observée aux bornes du condensateur.

On constate que la forme des signaux est différente et qu'il faut un certain temps au condensateur pour se charger complètement (càd avant d'atteindre l'amplitude maximale). On constate le même phénomène à la décharge. Ceci est dû à la résistance R insérée dans le circuit.

Si nous décidions d'augmenter la valeur de R fortement, on pourrait constater sur l'oscilloscope que le condensateur ne peut pas se charger à la valeur maximum.

Les lois de charge et de décharge sont de la forme

$$e^{-t/RC}$$

e logarithme de base e (2.72)
avec l'expression $-t/RC$ en exposant

Donc la tension aux bornes d'un condensateur chargé par une tension E au bout d'un temps t dans un circuit comprenant une résistance R sera de :

$$V = E (1 - e^{-t/RC})$$

et la tension aux bornes d'un condensateur se déchargeant au bout d'un temps t et ayant été chargé par une tension E dans un circuit comprenant une résistance R sera de :

$$V = E (e^{-t/RC})$$

Formation Technique F4 & F8 – Les courants

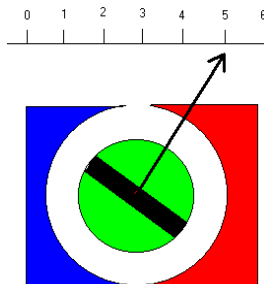
Mesure de U et I



Nous voici parvenus au terme de notre étude concernant le courant continu. Cette section s'achève donc sur la mesure des grandeurs que nous avons manipulé depuis le début.

Fonctionnement du galvanomètre à cadre mobile:

Nous allons employer un engin universel pour la mesure du courant et de la tension, voici l'engin (désolé le dessin n'est pas terrible)



Quelques explications:

- Les faces rouges et bleues sont les pôles d'un aimant permanent
- Le noyau vert est un noyau en fer doux monté sur un axe
- la partie noire solidaire de l'aiguille est un solénoïde bobiné autour du noyau de fer doux.

Fonctionnement:

Quand nous effectuons une mesure, nous relierons les extrémités de notre solénoïde au circuit à mesurer. Il circule donc un courant dans ce solénoïde, ce qui a pour effet de produire au sein du bobinage un champ magnétique B multiplié par la perméabilité relative du noyau.

Comme ce champ est lui-même confronté au champ de l'aimant, cet "équipage mobile" (noyau, bobine, aiguille) subit un couple de forces qui a pour effet de le faire tourner.

Un ressort de rappel (non représenté) en forme de spirale à la charge de ramener l'ensemble en position de repos quand l'excitation cesse.

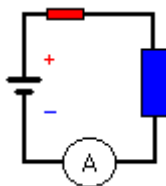
L'angle de rotation est proportionnel au courant qui circule dans le bobinage.

Il suffit de placer une échelle graduée en unités correctes pour effectuer une mesure.

Ce dispositif n'autorise pas le passage d'un grand courant, la gamme classique se situe entre 50 et 100 μA il faudra adjoindre des composants extérieurs pour réaliser un appareil de mesure susceptible de fonctionner avec une gamme étendue.

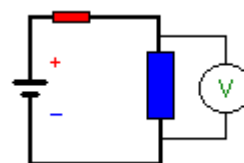
L'ampèremètre

- La mesure s'effectue toujours en **SERIE** dans le circuit à mesurer



Le voltmètre

- La mesure s'effectue toujours en **PARALLELE** sur le circuit ou composant à mesurer

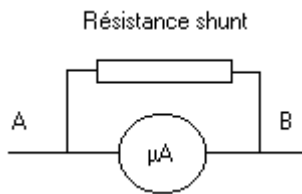


Formation Technique F4 & F8 – Les courants

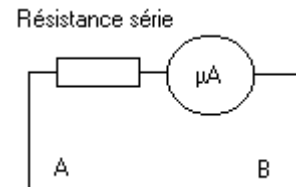
L'ampèremètre se caractérise par une très faible résistance afin de ne pas perturber le circuit observé (imaginer le produit RI si l'ampèremètre avait R non négligeable)

Le voltmètre se caractérise par une très grande résistance, toujours pour ne pas perturber le circuit observé. R est très grand, typiquement sur un contrôleur universel 20 000 Ω par volt

Synoptique de l'ampèremètre



Synoptique du voltmètre



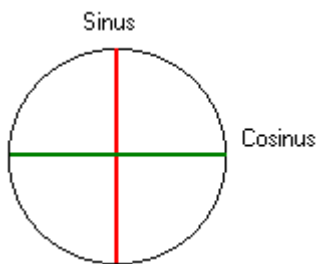
Le courant alternatif : Définition



Nous avons vu dans la section précédente consacrée au courant continu, que celui-ci était caractérisé par un mouvement d'ensemble unidirectionnel des électrons. Plus clairement, ceux-ci circulent d'un pôle vers un autre et ce continûment.
L'étude du courant alternatif fera appel à quelques notions de trigonométrie (rien de méchant, rassurez-vous) que je vous propose de revoir immédiatement.

Notion de Sinus - Cosinus.

Les fonctions sinus et cosinus sont des fonctions comme les autres, au même titre de $f(x) = 2x$.
Regardez, grâce à cette figure comme il est simple de s'en souvenir



Nous traçons un cercle de rayon "r" qui vaudra toujours 1.

L'axe vert est l'axe des cosinus
L'axe rouge est l'axe de sinus.

Et maintenant que vais-je bien pouvoir faire de ceci ?

Je cherche à déterminer le sinus et le cosinus d'un angle de 60° .

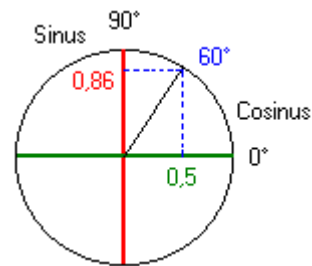
Avec la méthode graphique, rien de plus simple.

Je trace le cercle de rayon 1, le positionne avec un rapporteur mon angle de 60° et je réalise la projection du point obtenu sur le cercle sur les axes sinus et cosinus. Il ne me reste plus qu'à prendre une règle et à mesurer.

Je mesure 0,5 sur l'axe des cosinus et 0,86 sur l'axe des sinus, donc

$$\sin(60) = 0,86$$

$$\cos(60) = 0,5$$



C'est bien joli mais à quoi cela sert-il ?

Et bien par exemple à calculer la longueur de vos haubans d'antenne quand vous connaissez la hauteur du pylône et l'angle que vous voulez donner. Nous y reviendrons

A ce propos, nous avons évoqué la fonction $f(x) = 2x$.

Quest-ce que cela signifie ?

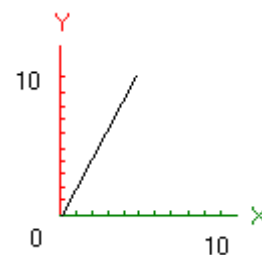
C'est très simple. Je fais varier x de 1 à 10 par exemple et je calcule à chaque fois la valeur de $f(x)$

Ce qui donne :

$x =$	1	2	3	4	5
$f(x) =$	2	4	6	8	10

Vous avez compris le principe. Maintenant traçons le résultat, les x sur l'axe des x , $f(x)$ sur l'axe des Y .

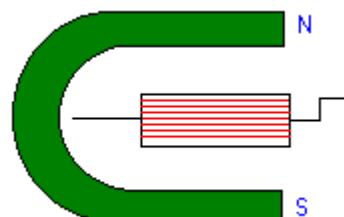
Bon ceci juste pour la culture générale.



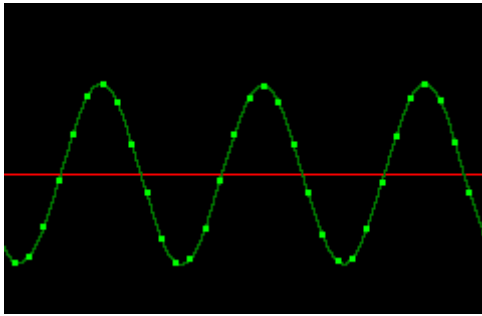
Pour expliquer ce qu'est le courant alternatif, rien ne vaut la pratique, nous allons voir comment nous pourrions le produire nous-même.

Nous réalisons un bobinage muni d'une manivelle pour le faire tourner (nous ferons abstraction des problèmes mécaniques, ce n'est pas l'objet). Nous plaçons l'ensemble entre les pôles d'un gros aimant.

Nous relierons les fils de notre solénoïde à un oscilloscope et en avant, nous faisons tourner aussi régulièrement que possible notre manivelle.



Formation Technique F4 & F8 – Les courants



Et nous obtenons ceci sur notre écran qui représente l'allure de la tension induite dans notre bobinage. Si vous vous demandez comment un tel prodige à pu se produire, je vous recommande de relire attentivement le chapitre consacré à l'électromagnétisme !

Quelques explications quand même :

Nous avons entraîné notre manivelle à une vitesse angulaire ω de 1 tour par seconde.

L'aimant produit un champ magnétique B

Notre solénoïde est composé de N spires de section S.

Nous savons que le flux sera égal à

$$\Phi = B S N$$

Mais ce flux n'est pas constant, puisque notre bobinage tourne et qu'il n'offre pas toujours la plus grande section au champ magnétique. Nous dirons que le solénoïde a tourné

d'un angle $\alpha = \omega t$

Le flux vaudra donc :

$$\Phi = B S N \cos(\omega t)$$

Par ailleurs nous savons que toute variation de flux implique une fem induite qui aura pour valeur:

$$u = u_m \sin(\omega t)$$

Tout ce qui se trouve à gauche n'est pas à retenir, il s'agit juste de comprendre le phénomène de production et de faire un rappel sur l'électromagnétisme.

Retenez que tout champ magnétique tournant induit dans un bobinage une fem . (la fem étant la force électromotrice tandis que le courant est la force magnétomotrice)

Les notions essentielles à retenir :

Toute tension alternative sinusoïdale sera de la forme

$$u = u_m \sin(\omega t)$$

Nous étudierons au chapitre suivant ce que sont ω , la période, la fréquence

U en volt

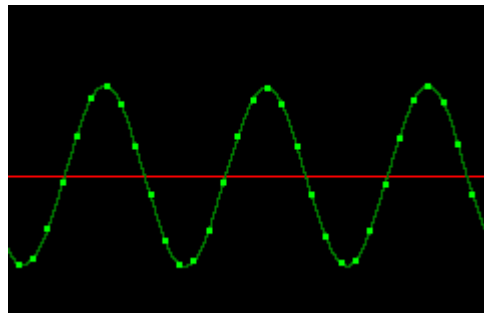
Um en volt, c'est la tension maximale atteinte

ω = pulsation = $2 \pi f$ en radians/seconde

f = fréquence en Hertz

t = temps en seconde

L'allure d'un courant ou d'une tension sinusoïdale est comme ceci ---->



Observez l'axe rouge qui scinde notre sinusoïde en deux parties égales, à chaque fois que cet axe est traversé, le courant change de sens, c'àd que les électrons partent en sens inverse.

Nous nous arrêterons ici pour ce chapitre tant les notions vues sont importantes et nouvelles.

Ne vous bloquez pas sur les formules ou sur la trigonométrie, retenez par cœur uniquement le paragraphe intitulé "**Notions essentielles à retenir**".

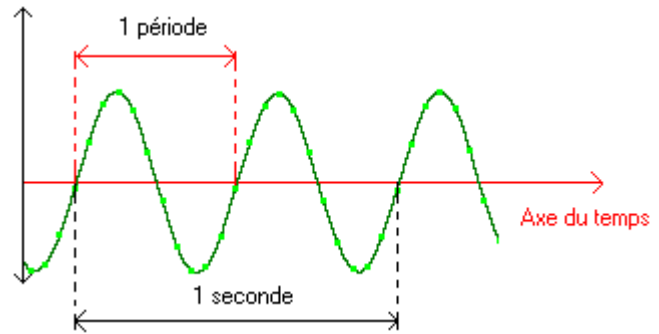
Fréquence, période, pulsation



Nous avons vu au chapitre précédent quelle était l'allure, vue sur un oscilloscope, d'une sinusoïde. Nous allons la regarder de plus près et définir de nouveaux termes.

Formation Technique F4 & F8 – Les courants

Reprenons notre sinusoïde.
L'axe rouge représente le temps, (oui celui qui s'écoule inexorablement).
Le phénomène que nous observons se déroule dans le temps.
L'axe noir représente l'axe de l'amplitude en Volt du signal.



La période :

Vous constatez sur le dessin ci-dessus que le phénomène observé est périodique, c'est-à-dire qu'il se répète dans le temps. Si nous mesurons le temps nécessaire au déroulement complet d'un cycle nous obtenons la période de notre signal. Cette période sera mesurée en secondes (plus souvent en sous-multiples de la seconde) et s'écrira : **t**

La fréquence :

Un temps de 1 seconde est représenté sur le dessin ci-dessus. Il est facile de compter combien de cycles complets se sont déroulés durant cet intervalle de temps. (Dans notre exemple : 2) Le nombre de cycles par unité de temps s'appelle la fréquence (dans notre cas 2 Hz). La fréquence, notée *f* se mesure en Hertz (Hz). Ceci explique pourquoi les anciens de la radio utilisaient le cycle par seconde (c/s) comme unité.

Relation fréquence période :

$$f = \frac{1}{T} \quad T = \frac{1}{f}$$

Avec *f* en Hertz (Hz)
T en seconde

Petits exercices de compréhension:

Je suis radioamateur et j'émetts un signal non modulé sur 7 MHz.
Quelle est la période de mon signal ?

7 MHz représentent 7 000 000 Hz donc la période de mon signal sera de
 $T = \frac{1}{7\,000\,000} = 0,1428 \cdot 10^{-6} \text{ s} = 0,1428 \mu\text{s}$
Ce temps représente le temps nécessaire à l'établissement complet d'une sinusoïde.

Je suis toujours radioamateur (c'est pour la vie) et je détecte sur un appareil spécial une émission non désirée de mon émetteur ayant 1 ns de période. ($1 \cdot 10^{-9} \text{ s}$)
Sur quelle fréquence se trouve cette émission ?

Appliquons la relation :
 $f = \frac{1}{1 \cdot 10^{-9}} = 1000 \text{ MHz} = 1 \text{ GHz}$

Et la pulsation ?

Vous savez déjà qu'elle est notée ω

$$\omega = 2 \pi f$$

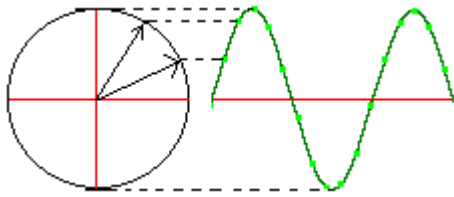
ω en radians / seconde

$\pi = 3,14$ (valeur approchée)
f = fréquence en Hz

ω est la vitesse angulaire de notre signal.
Qu'est-ce que cela veut bien dire ?

Vous avez remarqué que notre signal est une fonction périodique, c'est-à-dire qu'il se répète dans le temps. Ce signal est de forme sinusoïdale (c'est-à-dire faisant intervenir la fonction sinus). Dans le chapitre "Définition", nous avons représenté la fonction sinus par un vecteur dans un cercle. Pour chaque valeur d'angle, notre vecteur prend une valeur différente. Nous pouvons donc représenter notre signal comme un vecteur tournant à la vitesse

Formation Technique F4 & F8 – Les courants



Nota :

Le sens dans lequel nous tournons s'appelle le sens trigonométrique et il est en sens inverse des aiguilles d'une montre. A savoir

angulaire ω .

s'exprime en radians / seconde.

pour faire un tour complet, soit 360° , il faut 2π rd

donc $1/2$ (180°) tour vaut π

et $1/4$ (90°) de tour vaut $\pi/2$

Et puisque nous y sommes, définissons la longueur d'onde:

Puisque nous sommes radioamateurs, nous émettons des signaux, plus précisément des ondes électromagnétiques. Ces ondes parcourent une certaine distance dans l'espace.

La longueur d'onde d'un signal est la distance parcourue pendant un temps égal à sa période.

Avec

λ en mètres

c = vitesse de la lumière = $3 \cdot 10^8$ m/s

f = fréquence en Hz

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

Constat : nos signaux voyagent à la vitesse de la lumière.

Exemple :

Quelle est la longueur d'onde du signal que j'émetts sur 144 MHz ?

$$\lambda = \frac{3 \cdot 10^8}{144 \cdot 10^6} = 2,083 \text{ m}$$

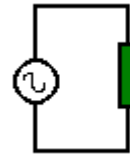
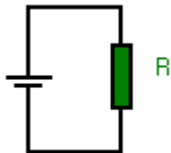
Sachez que dans notre beau pays EDF nous fournit une tension alternative de 230 V +/- la tolérance à une fréquence de 50 Hz ce qui fait une période de 20 ms. Il n'en est pas de même partout, par exemple aux USA la fréquence est de 60 Hz, en aéronautique la production d'énergie embarquée tourne à 400 Hz.

Valeurs efficaces



Nous en savons un peu plus désormais sur le courant alternatif sinusoïdal. Nous avons observé que sa valeur n'était jamais constante contrairement à celle d'un courant continu. Comment déterminer ne serait-ce que l'effet Joule avec un tel courant variable ?

Observons les deux montages suivants :

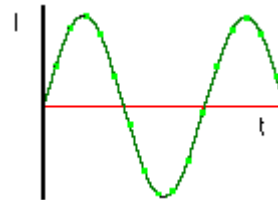


Dans le cas ci-dessus une résistance R est alimentée par un générateur de tension continue.

Un courant $I = U/R$ va s'établir et ce courant, par effet Joule, provoquera un échauffement de la résistance.

et dans le cas ci dessus, la même résistance R est alimentée par un générateur de tension alternative.

Un courant $i = u/R$ va s'établir et ce courant, par effet Joule, provoquera un échauffement de la résistance.



On voit clairement qu'il sera difficile de comparer les effets de ces courants sur une même durée car ils sont très différents. Nous aurions besoin d'un coefficient nous permettant, une fois appliqué à l'un des courants d'effectuer des comparaisons.

Les physiciens ont répondu à cette épineuse question par ceci :

La puissance transformée en chaleur dans un élément résistif sera déterminée par les **valeurs efficaces** du signal alternatif appliqué.

Calcul de I_{eff} et U_{eff}

Connaissant les valeurs maximales (lues sur un oscilloscope par exemple), nous appliquerons

$$U_{eff} = \frac{U_m}{\sqrt{2}}$$

$$I_{eff} = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$$

Pour mémoire racine de 2 = 1,41

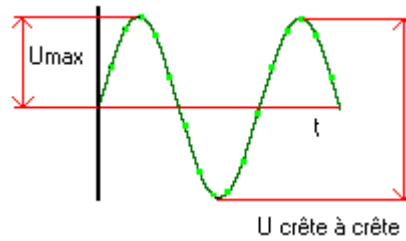
Important:

Formation Technique F4 & F8 – Les courants

la tension du réseau EDF de 230 V est une valeur efficace. Prenez la bonne habitude de travailler avec les valeurs efficaces efficace. Votre contrôleur universel affiche des valeurs efficaces, votre oscilloscope des valeurs max.

Des confusions à éviter:

Observez bien que la tension max se mesure entre l'axe du temps et l'amplitude maximale. Vous trouverez parfois dans la littérature des tensions notée $U_{c\grave{a}c}$ (crête à crête) qui serviront à mesurer des puissances d'enveloppe.



Un exemple :

On mesure sur un oscilloscope une tension crête à crête de 648 V. Quelles sont les valeurs de la tension max et efficace ?

La tension max sera égale à la tension crête à crête divisée par 2 soit

$$U_{\max} = U_{c\grave{a}c} / 2 = 648 / 2 = 324 \text{ V}$$

$$U_{\text{eff}} = U_{\max} / (\text{racine } 2) = 324 / 1,41 = 230 \text{ V}$$

Le déphasage

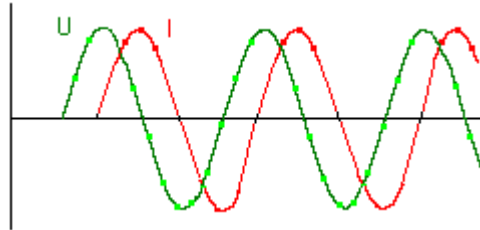


Avant d'aborder les thèmes suivants consacrés aux comportements des condensateurs et inductances en alternatif, il convient de se remémorer ou de découvrir de manière simple ce que signifie le déphasage.

Nous allons découvrir (très bientôt) que dans nos circuits alimentés par du courant alternatif, le courant et la tension ne sont pas en phase. Ceci peut sembler un peu mystérieux, regardons toujours à l'aide de notre oscilloscope ce que cela donne



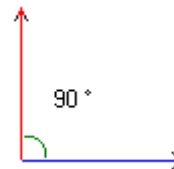
La tension est représentée en vert, l'intensité en rouge.



Nous voyons ici que la tension démarre franchement avant le courant, peu nous importe pour le moment de savoir à quoi ceci est dû, contentons-nous de constater le phénomène.

Pourrions nous représenter différemment ce déphasage ?

oui d'une manière très simple qui consiste à utiliser un vecteur pour chaque grandeur et à les séparer de l'angle du déphasage. Regardez cet exemple

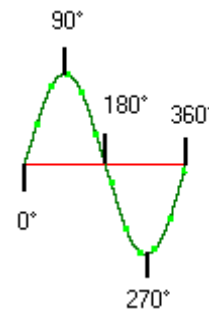


Nous avons un vecteur rouge d'une certaine longueur qui représente une grandeur, un vecteur bleu d'une certaine longueur qui représente une autre grandeur physique, ces vecteurs sont à 90° l'un de l'autre.

Appréhendons sur un cycle ce que représentent les angles :

et essayons de nous souvenir de la notation en radians que l'on retrouve souvent

0°	90°	180°	270°	360°
0	$\Pi/2$	Π	$3\Pi/2$	2Π

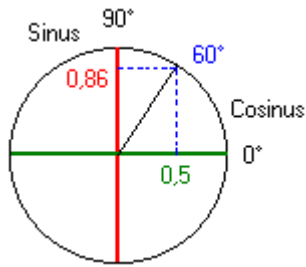


Et de plus en plus fort ...

Imaginons que nous soyons confrontés au problème suivant :
Nous avons deux grandeurs physiques, nous savons qu'elles sont liées par un déphasage, nous ne connaissons qu'une seule de ces grandeurs.
A partir de ces éléments, est-il possible de déterminer la valeur inconnue ?

Ceci est tout à fait réalisable, nous avons seulement besoin de revoir quelques notions simple de trigonométrie.

Formation Technique F4 & F8 – Les courants

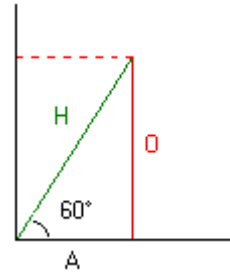


Vous vous souvenez de cet exemple que nous avons étudié ?
 Nous allons simplifier les choses en débarrassant ce dessin de tout ce qui encombre.

Voilà le résultat, ne vous affolez pas, il est identique au précédent. Nous avons rajouté des lettres désignant les côtés, à savoir :

H pour l'hypoténuse
 O appelé côté opposé à l'angle de 60°
 A appelé côté adjacent à l'angle de 60°

Vous noterez que nous avons un angle de 90° entre les segments O et A.



Bien, que pouvons-nous faire de tout cela ?

Résoudre un petit problème simple par exemple. En voici les termes :
 Nous connaissons la longueur de H, nous connaissons la longueur de A, nous connaissons la valeur de l'angle formé par A et H, nous cherchons la longueur de O.

La trigonométrie nous dit :

$$\sin(a) = \frac{\text{côté opposé}}{\text{hypoténuse}}$$

ce que nous cherchons est le côté opposé.
 transformons ceci comme cela et

$$\sin(a) \times \text{hypoténuse} = \text{côté opposé.}$$

Appliquons à un exemple numérique :

Notre segment A mesure 5 m, notre segment B mesure 10m, l'angle a = 60°, quelle est la longueur de O ?

D'après ci-dessus

$$\text{Côté opposé} = \sin(a) \times \text{hypoténuse}$$

$$O = \sin(60) \times 10$$

$$O = 0,86 \times 10 = 8,6 \text{ m}$$

Les valeurs des sinus et cosinus peuvent être trouvées avec un simple calculette (ou avec une règle et un compas sur un dessin).
 Retenez bien que cela ne soit pas indispensable pour votre licence les relations suivantes

Retenez que la somme des angles d'un triangle est égale à 180 °

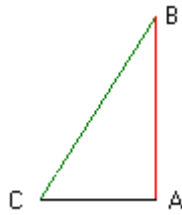
$$\sin(a) = \frac{\text{côté opposé}}{\text{hypoténuse}} \quad \cos(a) = \frac{\text{côté adjacent}}{\text{hypoténuse}} \quad \text{tangente} = \frac{\sin}{\cos} = \frac{\text{côté opposé}}{\text{côté adjacent}}$$

Et Pythagore alors ?

Nous allons voir un autre grand (très grand) théorème de géométrie qui nous sera indispensable dans les chapitres suivants, il s'agit du théorème de Pythagore

Rien n'est plus simple que le théorème de Pythagore, n'en ayez pas peur, il va vous rendre d'immenses services, ne serait-ce que pour tailler les haubans de votre antenne à la bonne longueur

Formation Technique F4 & F8 – Les courants



Regardez ceci, à gauche, c'est un triangle rectangle (ceci signifie qu'il y a un angle droit (90°) dans ce triangle)

Le **théorème de Pythagore** nous dit que dans un triangle **rectangle**, le carré de la longueur de l'hypoténuse est égal à la somme des carrés des longueurs des deux autres côtés. En d'autres termes, si le triangle ABC est rectangle en A, alors **$BC^2 = AB^2 + AC^2$**

Vous retiendrez:

car c'est ceci que nous utiliserons le plus fréquemment dans la suite de l'étude en alternatif.

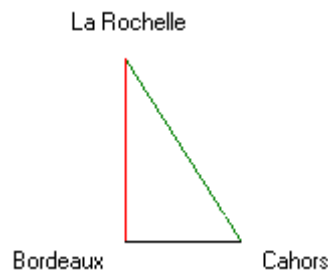
$$BC = \sqrt{AB^2 + AC^2}$$

Vous demandez certainement pourquoi nous avons revu toutes ces notions et c'est bien légitime. Voici un début d'explication :

Depuis longtemps vous savez que l'on ne mélange pas les serviettes et les torchons; il en va de même dans bien d'autres domaines comme nous allons le voir ici.

Supposons que vous habitez La Rochelle (comme moi) et que vous ayez à vous rendre à Cahors. Vous connaissez la distance La Rochelle Bordeaux, la distance Bordeaux Cahors mais pas la Rochelle Cahors.

Il paraît évident que si nous additionnons les distances que nous connaissons, le résultat sera supérieur à la réalité car la distance La Rochelle Cahors est bien inférieure à la distance cumulée La Rochelle Bordeaux, Bordeaux Cahors.



Pour connaître la distance exacte séparant ces deux villes, nous pourrions utiliser plusieurs méthodes toutes aussi efficaces les unes que les autres.

- 1 - la méthode graphique, nous dessinons à l'échelle et mesurons avec une règle
- 2 - la trigonométrie (sin , cos)
- 3 - le théorème de Pythagore.

Il en sera exactement de même pour la suite quand nous allons être confrontés à des circuits présentant des déphasages entre tension et courant. Nous ne pourrions plus ajouter simplement les grandeurs, il faudra tenir compte de l'angle de déphasage, exactement comme l'exemple routier ci-dessus.

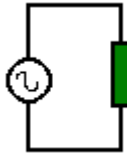
Voilà c'est tout pour aujourd'hui, si vous ne deviez retenir qu'une chose, retenez le théorème de Pythagore. Nous sommes désormais armés pour la suite.

La résistance en courant alternatif



Nous allons aborder le thème des comportements de nos composants face au courant alternatif. Pour ce chapitre ce sera la résistance.

Le schéma de base et de principe :



Nous allons relier un oscilloscope à deux voies sur ce montage, deux voies signifiant, schématiquement, que nous possédons deux oscilloscopes en un seul boîtier.

La voie A sera reliée aux bornes de la source, nous examinerons la tension délivrée, la voie B, quant à elle sera connectée aux bornes de la résistance, nous examinerons le courant.

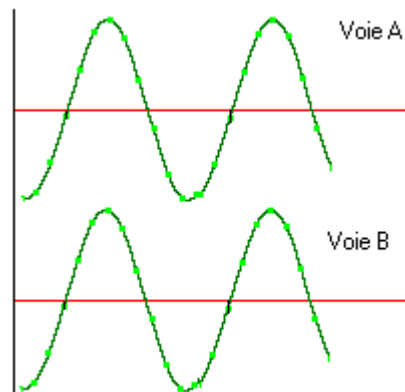
Nous réalisons le montage suivant composé d'une source alternative et d'une résistance R dite pure c'est-à-dire n'offrant qu'une composante résistive. (nous verrons qu'hélas les composants ne sont jamais "purs" et qu'une résistance est souvent accompagnée d'une composante inductive)

A ce propos, pourquoi allons nous examiner le courant en nous connectant aux bornes de R ? Parce que le courant "i" traversant cette résistance va produire une chute de tension, cette chute de tension sera l'exact reflet du courant.

Le fait d'avoir deux voies nous permettra d'observer sur un même écran et simultanément deux phénomènes distincts.

Qu'observons nous ?

Qu'en ajustant les amplitudes de l'une et l'autre trace, nous pouvons les superposer pour ne plus former qu'un seul signal visible sur notre écran d'oscilloscope.



Interprétation :

Si nous pouvons superposer nos deux signaux, c'est que ceux-ci ne sont pas déphasés l'un par rapport à l'autre, en d'autres termes, la tension et le courant apparaissent simultanément, croissent simultanément, s'inversent simultanément.

Nous retiendrons :

Une résistance pure alimentée par un courant alternatif n'introduit pas de déphasage entre tension et courant. U et I sont en phase

Ce qui implique les relations suivantes :

$$I = \frac{U}{R}$$

L'impédance d'une résistance sera égale à sa résistance :

Formation Technique F4 & F8 – Les courants

	$Z = R$
avec U et I en valeurs efficaces - R et Z en Ω	La puissance consommée dans la résistance sera :
	$P = U I$ $P = R I^2$

Nous voici amené à définir un nouveau terme que nous venons de citer, à savoir l'impédance (Z).

Ceci doit vous rappeler quelque chose car c'est la définition de la résistance (en continu). En étendant cette notion, nous dirons que l'impédance est la résistance appliquée au courant alternatif.

Alors pourquoi avoir donné un autre nom ?

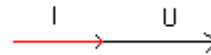
L'impédance sera égale au rapport de l'amplitude de la tension du circuit à l'amplitude du courant qui le traverse.

Parce qu'en alternatif, le fait de "résister" au passage du courant n'implique pas forcément une consommation de puissance, ceci est une autre histoire que nous verrons plus tard dans le chapitre "Puissance" en alternatif

Et graphiquement, peut-on faire quelque chose ?

Nous pouvons représenter la tension et le courant par des vecteurs (les vecteurs sont proportionnels aux amplitudes respectives de U et de I).

On note que U et I sont positionnés sur le même axe, ce qui signifie qu'il n'y a pas de déphasage entre eux



Les inévitables limitations:

Nous retiendrons qu'en alternatif l'impédance vaut la résistance pour une résistance à condition que celle soit pure ce qui n'est pratiquement jamais le cas. Toute résistance, par construction, finit par présenter des termes réactifs et c'est bien embêtant lorsque l'on pratique les UHF et au dessus. Une bien modeste résistance dans un montage UHF est connectée au circuit par l'intermédiaire de ses pattes et celles-ci se comportent comme des inductances (vous verrez un peu plus loin), d'autre part des capacités apparaissent aussi. Nous nous retrouvons avec un composant qui n'a plus du tout un comportement prévisible... Pour lutter contre cela, il faut réaliser des câblages limitant les connexions au minimum, utiliser des composants spéciaux (CMS et composants UHF) et des techniques de conception adaptées aux fréquences à traiter. En deux mots : Pas simple.

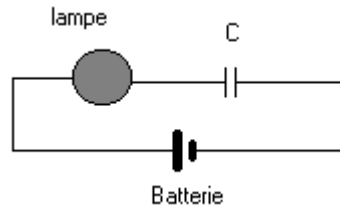
Malgré ce qui vient d'être dit plus haut, retenez qu'en alternatif l'impédance d'une résistance vaut sa résistance, ce sera bien suffisant. Donc **$Z = R$** .

La réactance capacitive



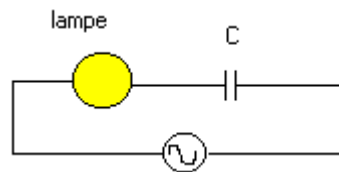
De quoi est-il bien question ?
Le titre barbare à souhait doit vous laisser perplexe, allons examiner la question.

Nous avons vu dans la section consacrée au courant continu ce qu'était un condensateur et quel était son comportement tant en continu qu'en alternatif. Pour mémoire rappelons qu'il laisse passer le courant alternatif et qu'il bloque le courant continu.
Pour vous en convaincre s'il en est besoin, réalisez le montage suivant et observez :



Vous constatez que la lampe n'éclaire pas, manifestement quelque chose empêche le courant de circuler.

Maintenant, faites une légère modification qui consiste à enlever la batterie et à la remplacer par une source de tension alternative et constatez par vous même :



La lampe s'éclaire ! Ceci confirme clairement (si j'ose dire) les propriétés du condensateur.

Mais l'histoire ne s'arrête pas là :

Notre condensateur en alternatif va présenter une autre caractéristique plutôt surprenante, il va être sensible à la fréquence de la source de tension et cette "sensibilité" va jouer sur sa **réactance**.

Encore un nouveau terme !
La réactance du condensateur sera sa propriété à s'opposer au passage du courant alternatif

La réactance sera notée **X** et s'exprimera en Ω (tout ce qui freine est en Ω !)

$$X = \frac{1}{C \omega}$$

Avec X en Ω
C en Farads

$\omega = 2 \Pi f$
f en Hertz

Un exemple d'application :

Nous désirons connaître la réactance d'un condensateur de 100 pF à la fréquence de 50 MHz

Sachant que $X = 1/C \omega$
il vient :

$$X = \frac{1}{100 \cdot 10^{-12} \times 2 \times \Pi \times 50 \cdot 10^6}$$

$$X = \frac{1}{100 \times 2 \times \Pi \times 50 \cdot 10^{-6}} = 31,8 \Omega$$

Sans être un mathématicien de génie, on comprend vite que plus la fréquence f va croître, plus X diminuera.

Dans le même ordre d'idée, on notera que la réactance est également fonction de la capacité, donc à une fréquence donnée f, deux condensateurs de valeurs différentes auront des réactances différentes.

On peut essayer de visualiser graphiquement comment évolue la réactance du condensateur en fonction de la

Fréquence en

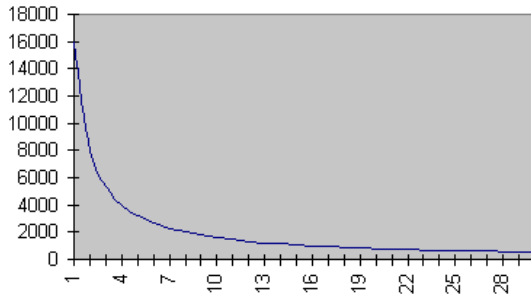
Réactance en

Formation Technique F4 & F8 – Les courants

fréquence. (faites le vous même avec les valeurs du tableau, vous reconnaîtrez facilement les courbes en $1/x$).

Dans cet exemple le condensateur à une capacité de 10 pF ($10 \cdot 10^{-12}$ F).

MHz	Ω
1	15924
5	3185
10	1592
15	1062
20	796
25	637



En image, voici l'allure de la courbe représentant l'impédance d'un condensateur de 10 pF pour une fréquence évoluant de 1 MHz à 29 MHz. En abscisse la fréquence en MHz et en ordonnées la réactance en ohm.

On retiendra que pour une valeur de C donnée, aux basses fréquences, la réactance est élevée et qu'au fur et à mesure que la fréquence croît, la réactance diminue.

La réactance, c'est une chose mais ce condensateur, nous réserve t-il autre chose ?

Ben oui ! (c'est la dernière).

Non content d'avoir un comportement fonction de la fréquence et de la capacité, il offre (sic) une autre caractéristique intéressante: **il déphase**

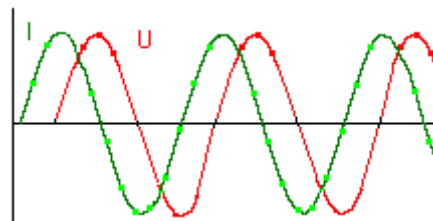
Vous devez vous souvenir qu'en continu, quand on applique une tension (continue) sur le condensateur, un courant circule pendant l'accumulation de charge. Une fois le condensateur chargé, le courant cesse et on peut mesurer une tension aux bornes de notre condensateur.

Intuitivement on comprend qu'il y a d'abord établissement du courant dans le condensateur puis établissement de la tension (je schématise)

On retiendra qu'un condensateur soumis à une tension alternative avance le courant sur la tension. Cette avance vaut 90°

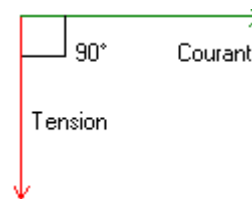
Si nous observons la tension et le courant aux bornes d'un condensateur dans un circuit alternatif, voici ce que nous voyons.

En vert, le courant
En rouge, la tension



La représentation vectorielle :

Afin de pouvoir faire des calculs simplement en s'appuyant sur la méthode graphique, on dessine ceci



Les abus de langage :

Il vous arrivera d'entendre parler de l'impédance d'un condensateur. Cette expression n'est pas correcte mais comme elle est passée dans le vocabulaire courant, il est maintenant difficile de s'en débarrasser.

Et pour finir :

Un condensateur (supputé sans perte) ne consomme pas de puissance.

C'est une propriété très importante car si le condensateur présente bien une réactance (il s'oppose au passage du courant alternatif), il ne consomme pas de puissance

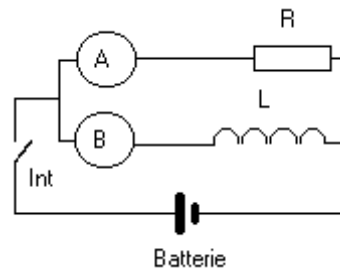
Ce qu'il faut en retenir :

- la formule de la réactance
- Le déphasage de $\pi/2$ (90°) de la tension sur le courant (courant en avance sur tension)

Formation Technique F4 & F8 – Les courants

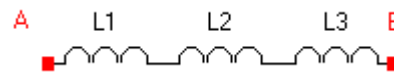
La réactance inductive

Nous avons introduit la notion d'inductance dans la section courant continu, chapitre "Electromagnétisme". Nous avons également montré grâce à une expérience simple ce qu'était l'auto-induction. Pour mémoire, le schéma a été reproduit à droite. Nous constatons que la lampe en série avec l'inductance ne brillait pas immédiatement et qu'à l'ouverture du contact Int, elle s'éteignait progressivement. Ces phénomènes étaient dus à la self (de l'anglais "self induction").



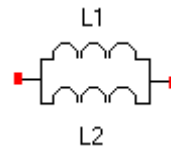
Avant d'aborder les propriétés des selfs en courant alternatif, quelques notions simples :

Si nous mettons en série plusieurs inductances (L1, L2, L3), l'inductance équivalente sera



$$L_t = L_1 + L_2 + L_3$$

Si nous mettons en parallèle plusieurs inductances (L1, L2), l'inductance équivalente sera



$$L_t = \frac{L_1 L_2}{L_1 + L_2}$$

Vous retrouvez les mêmes formules de calcul que pour les résistances. Le coefficient de self-induction est noté L, son unité est le Henry

Le Henry est une grosse unité, dans nos gammes de fréquences nous aurons plutôt l'occasion de jouer avec des valeurs de l'ordre du μH .

Quel va être le comportement de notre self en alternatif ?

A l'instar de ce que faisait le condensateur, notre self va être sensible à la fréquence de la source qui l'alimente, et cette "sensibilité" interviendra sur sa **réactance**. La réactance de l'inductance sera sa propriété à s'opposer au passage du courant alternatif.

La réactance sera notée **X** et s'exprimera en Ω

$$X = L \omega$$

Avec X en Ω
L en Henry (symbole : H)

$$\omega = 2 \pi f$$

f en Hertz

Un exemple de calcul serait le bienvenu:

Nous possédons une inductance de $10 \mu\text{H}$ et nous désirons connaître sa réactance à la fréquence de 50 MHz.

Nous savons que **$X = L \omega$**

il vient :

$$X = 10 \cdot 10^{-6} \times 2 \times \pi \times 50 \cdot 10^6$$

$$X = 3140 \Omega$$

A l'inverse du condensateur, on constatera que sur une

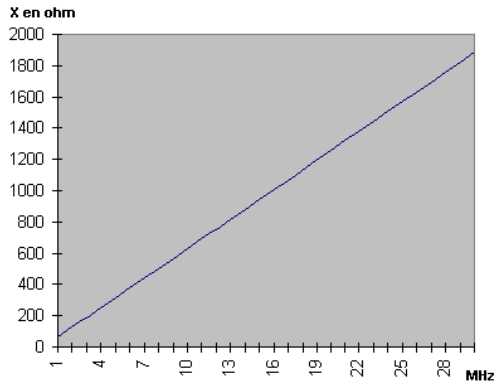
On notera que la réactance d'une self est également fonction de son coefficient de self-induction L

Formation Technique F4 & F8 – Les courants

self, plus la fréquence croît, plus la réactance croît.

Pour vous en convaincre voici dans le tableau de droite les valeurs que prend la réactance d'une self de 10 μH quand on fait varier la fréquence de 1 à 25 MHz

Fréquence en MHz	Réactance en Ω
1	63
5	314
10	628
15	942
20	1256
25	1570



Comme pour la réactance capacitive, voici en image, l'allure de la réactance inductive en fonction de la fréquence. On remarque d'une part que cette variation est linéaire et d'autre part que la réactance inductive croît quand la fréquence croît ce qui est exactement le comportement opposé à celui du condensateur. Dans l'exemple représenté ici, la self a une valeur de 10 μH et la fréquence évolue de 1 MHz à 30 MHz.

Est-ce que notre self va se révéler aussi facétieuse que notre condensateur ?

Eh oui ! Car comme le condensateur elle va déphaser, mais attention, pas dans le même sens !

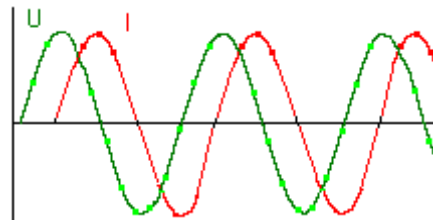
Le condensateur retardait la tension sur le courant (on dit que le courant est en avance), la self, au contraire, va retarder le courant sur la tension, on dira que le courant est en retard.

Si vous reprenez l'expérience du début, vous constatez que la self introduit un retard à l'allumage de l'ampoule et au contraire à l'extinction, elle prolonge son éclat. On pourrait, intuitivement, penser que la self stocke de l'énergie quand celle-ci lui parvient et la restitue quand la source primaire disparaît. C'est ce qui se produit, la self commence par emmagasiner de l'énergie sous forme magnétique.

Nous allons reprendre notre oscilloscope et observer comment se comportent le courant et la tension.

En vert la tension

En rouge le courant

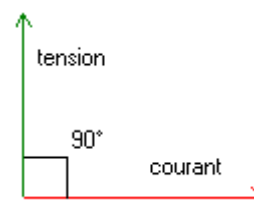


La représentation vectorielle:

Retenez que la self déphase le courant de 90° , ou $\pi/2$ en arrière sur la tension.

Une self "pure" (sans composante ohmique) ne consomme pas de puissance.

Une self présente une réactance variable en fonction de son coefficient d'auto-induction et de la fréquence.



Vous connaissez désormais l'essentiel pour attaquer l'étude des circuits où nous ne ferons que mettre en application les principes fondamentaux que nous venons d'étudier.

Formation Technique F4 & F8 – Les courants

L'impédance



- Nous avons vu (et compris) ce qu'était la réactance pour les condensateurs et les inductances, nous avons étudié le comportement des résistances pures en alternatif.
- Nous savons que la résistance pure ne produit pas de déphasage tension-courant mais qu'en revanche, le condensateur avance le courant et la self le retarde.
- Jusqu'à présent nous avons travaillé sur les éléments isolés, que se passe-t-il si nous combinons ces trois éléments?

Si nous combinons une résistance, un condensateur et une self, nous réalisons, quel que soit l'arrangement (série, //), un circuit extrêmement utilisé en radiofréquence.

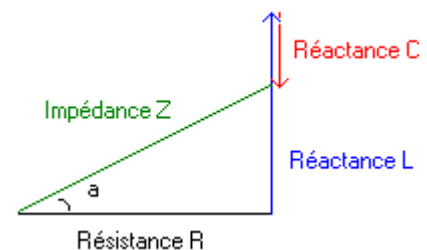
Or il se trouve que ce circuit possède une autre caractéristique importante, il présente une impédance au courant alternatif. L'impédance sera la propriété du circuit à s'opposer au passage du courant alternatif dès lors que l'on combine des éléments possédant une réactance (condensateurs, inductances) et une résistance.

Intuitivement on sent bien que le comportement antagoniste des selfs/condensateurs va produire quelque chose et c'est ici que nous allons avoir besoin de notre ami Pythagore.

L'impédance sera notée Z et s'exprimera en Ω

Un début d'explication :

J'ai, grâce à différents instruments de mesure et calculs, déterminé les réactances X_L et X_C (de la self et du condensateur) à une fréquence f . J'ai réalisé un montage mettant en jeu ces trois éléments. J'ai la possibilité de faire un graphique qui me montre le fonctionnement de mon circuit



Examinons ce graphique. Nous voyons différents vecteurs identifiés par des couleurs différentes. La longueur de ces vecteurs est proportionnelle à la valeur de la grandeur électrique.

en noir : la résistance R
en bleu : la réactance de la self X_L
en rouge : la réactance du condensateur X_C
en vert : l'impédance du circuit Z

On constate que si l'on prend l'axe des résistances comme référence de déphasage = 0° , l'axe des réactances est bien à 90° . Pour le vecteur Bleu indiquant une réactance inductive, le vecteur est orienté vers le haut, tandis que le vecteur rouge de la réactance capacitive est orienté vers le bas, toujours à 90° de l'axe des résistances.

La réactance capacitive se retranche à la réactance inductive (toujours) puisque, souvenez-vous, les déphasages sont opposés. Il apparaît une résultante (qu'elle soit capacitive ou inductive), ce sera la réactance dominante. L'impédance sera la combinaison vectorielle de la réactance résultante et de la résistance.

L'angle noté "a" sur le dessin correspond au déphasage entre la tension et le courant

Nous pourrions calculer Z par différents moyens, soit la méthode graphique (la règle suffit), soit par Pythagore (on déterminera la valeur de l'hypoténuse correspondant à Z) ou la trigonométrie.

Formation Technique F4 & F8 – Les courants

Les abus de langage:

Vous entendrez souvent parler de l'impédance d'un condensateur ou d'une self. On devrait essentiellement parler de la réactance de la self ou du condensateur. Ceci n'est pas bien grave d'autant que ces composants ne sont pas parfaits et qu'une self est obligatoirement résistive.

Rappelons que l'on calcule les réactances par

$$X_C = 1 / C \omega$$

$$X_L = L \omega$$

Avec $\omega = 2 \pi f$

Nous venons de définir l'impédance, qu'en est-il de la loi d'Ohm ?

La loi d'Ohm décrite pour le courant continu ne pourra pas s'appliquer aux circuits alternatifs sans quelques aménagements.

Le principal facteur est que la résistance seule ne suffit plus à représenter l'opposition au passage du courant.

Mais nous venons de découvrir que l'impédance, elle est représentative de cette opposition.

Nous retiendrons :

$$U = Z I$$

$$I = \frac{U}{Z}$$

$$Z = \frac{U}{I}$$

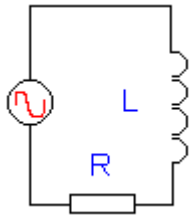
Les valeurs de U et I sont des valeurs efficaces

Circuits "Série"



Vous le savez déjà, il existe deux grands types d'arrangements possibles : série ou parallèle. Dans ce chapitre l'étude portera sur les circuits série qui sont simples à analyser.

Le circuit série le plus simple :



Voici notre circuit composé d'un générateur de tension alternative de fréquence f , d'une résistance R et d'une inductance L .

Que va t'il se passer dans un tel circuit ?

On peut imaginer qu'il va y circuler un courant, que des chutes de tension apparaîtront aux bornes des éléments présents, qu'une puissance sera consommée.

Mais ce n'est pas tout :
Comme nous sommes en présence de courant alternatif, il y a fort à parier que la tension ne sera pas en phase avec le courant.

Essayons de quantifier :

Nous savons que le courant I sera égal au quotient de la tension U sur l'impédance Z , rien de nouveau. Il semble donc judicieux de déterminer cette fameuse Z . Or nous ne sommes pas sans ignorer que R et X_L (la réactance de la self) ne peuvent s'additionner algébriquement, nous devons passer par le théorème de Pythagore.

Notre circuit est un circuit "série" ce qui implique que le courant est la grandeur commune à tous les éléments du circuit. Nous utiliserons donc comme axe de référence celui du courant. Sur cet axe nous porterons des vecteurs représentant les tensions aux bornes des éléments de notre circuit.

Pour la résistance, la chute de tension à ses bornes sera égale à $R.I$

Pour la self la tension aux bornes sera égale au produit $X_L.I$ (réactance x courant) ce qui peut s'écrire

$L \omega I$.

Pour un condensateur ce serait X_C soit

I

$C\omega$

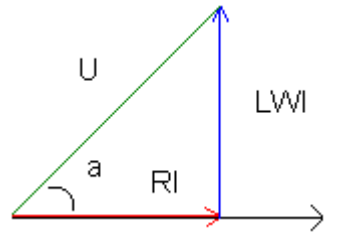
Retenez bien ce qui se trouve à gauche et ne vous laissez pas dérouter par ces notations. Souvenez-vous qu'en continu la chute de tension aux bornes d'une résistance est égale à RI , il n'y a pas de raison qu'il en aille différemment en alternatif. La seule différence est qu'avec une self ou un condensateur on ne prend pas R mais X la réactance.

Nous avons tous les éléments pour calculer :

Formation Technique F4 & F8 – Les courants

Connaissant les valeurs de R et L et le courant, j'ai pu calculer $L \omega I$ qui représente la tension aux bornes de la self. De même j'ai aisément calculé RI représentant la chute de tension aux bornes de la résistance. Sachant que la self déphase le courant de 90° par rapport à la tension, j'ai tracé mon vecteur.

remarquez au passage que la tension aux bornes de la résistance est en phase avec le courant.

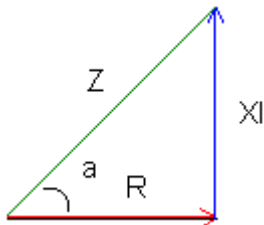


Le vecteur U représente la tension délivrée par mon générateur. Comme vous le savez, on ne peut pas faire une somme algébrique des tensions $L \omega I$ et RI celles-ci n'étant pas en phase. On effectue une somme **géométrique**.

L'angle noté "a" représente le déphasage qui existe dans ce circuit entre le courant et la tension. Comme ce circuit est selfique, le courant sera en retard sur la tension.

Et avec des formules :

Nous allons simplement appliquer Pythagore



Dans la représentation vectorielle ci-dessus, nous constatons que le courant est commun. Ce dessin est aussi significatif de l'impédance globale du circuit. Xl représente la réactance de la self, R la résistance, Z l'impédance du circuit. Si nous appliquons Pythagore, il vient :

$$Z^2 = R^2 + X^2$$

avec $X = L \omega$

Nous prenons la racine carrée de Z^2 pour obtenir Z, il vient

$$Z = \sqrt{R^2 + L^2 \omega^2}$$

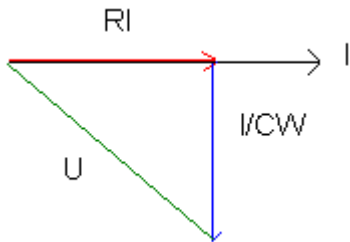
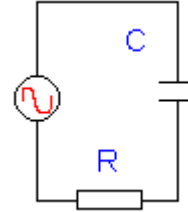
Vous pouvez retenir la formule, ce n'est pas indispensable, par contre sachez-retrouver le cheminement.

Formation Technique F4 & F8 – Les courants

Voyons ce qui se passe avec un condensateur :

Peu d'évolutions par rapport au circuit précédent si ce n'est que le condensateur a remplacé la self. La seule différence notable sera liée au déphasage qui sera en sens inverse.

Nous représenterons notre circuit comme ceci



RI est la chute de tension aux bornes de R , $I/C\omega$ est la tension aux bornes du condensateur, U est la tension délivrée par le générateur. Les remarques faites pour la self sont rigoureusement applicables pour le condensateur. L'impédance du circuit sera

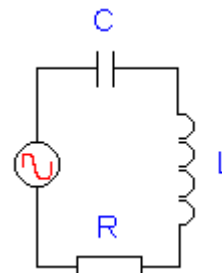
$Z^2 = R^2 + X^2$
pour obtenir Z , nous prenons la racine de Z^2 et il vient :

avec $X = 1/c\omega$

$$Z = \sqrt{R^2 + \frac{1}{C^2\omega^2}}$$

Et pour finir :

il ne nous reste plus qu'à connecter un condensateur, une résistance et une inductance en série pour aboutir au fameux et célèbre circuit RLC série.
Le schéma :



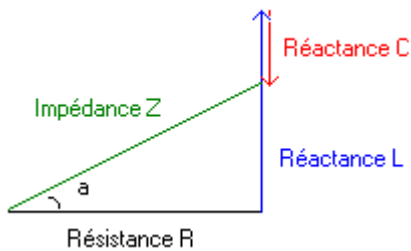
Que pouvons imaginer ? :

Formation Technique F4 & F8 – Les courants

Nous savons que le condensateur et la self ont des comportements antagonistes pour ce qui concerne le déphasage tension/courant. On peut intuitivement penser qu'ils pourront partiellement ou totalement annuler leurs effets.

Bien que le phénomène ne soit pas simple à représenter mentalement, c'est quand même ce qui se passe. C'est un peu comme le tire à la corde, l'équipe la plus forte entraîne la plus faible dans son camp.

Voyons cela sur un graphique :



Comme déjà expliqué dans le chapitre concernant l'impédance, on voit que les réactances se retranchent. Sur ce dessin, vous pouvez imaginer que les vecteurs représentent les tensions aux bornes des composants. les valeurs seront les suivantes :

$$U_L = L \omega I$$
$$U_R = R I$$
$$U_C = I / c \omega$$

U_L est la tension aux bornes de la self
 U_R est la tension aux bornes de la résistance
 U_C est la tension aux bornes du condensateur

Notons :

Si la réactance de la self est, à une fréquence f de travail du circuit, plus élevée que la réactance de la capacité, c'est celle-ci qui dominera, le circuit sera selfique, le courant sera en retard sur la tension d'un angle noté φ

Si la réactance de la capacité est, à une fréquence f de travail du circuit, plus élevée que la réactance de la self, c'est celle-ci qui dominera, le circuit sera capacitif, le courant sera en avance sur la tension d'un angle noté φ

Et une formule qui synthétise tout cela :

nous l'avons vu, les réactances se retranchent (c'est normal, elles ont des comportements opposés sur le déphasage), la formule va le faire apparaître clairement et c'est toujours une application du théorème de Pythagore

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right)^2}$$

Formation Technique F4 & F8 – Les courants

Pas de panique, c'est très simple.

$$L \omega - \frac{1}{C \omega}$$

représente simplement les vecteurs réactance self/capa qui se retranchent. On élève au carré pour respecter Pythagore et c'est fini

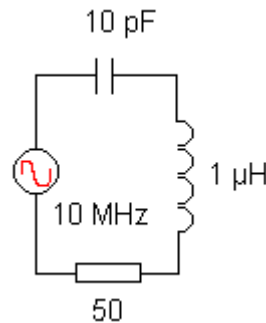
Plus simplement retenez :

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$$

Un exemple ne serait-il pas nécessaire ?

Nous avons le montage suivant composé d'une self de 1 μ H, d'une résistance de 50 Ω et d'un condensateur de 10 pF. Le tout est alimenté par un générateur délivrant une tension alternative à la fréquence de 10 MHz.

Quelle est l'impédance de ce circuit ?



Il nous suffit d'appliquer ce que nous savons et de remplacer les lettres par leurs valeurs.

Afin de décomposer le calcul, nous allons calculer chaque réactance à la fréquence de 10 MHz.

$$X_L = L \omega = 1 \cdot 10^{-6} \times 2 \times \pi \times 10 \cdot 10^6$$

$$X_L = 63 \Omega$$

$$X_C = 1 / C \omega = 1 / (10 \cdot 10^{-12} \times 2 \times \pi \times 10 \cdot 10^6)$$

$$X_C = 1592 \Omega$$

$$R = 50 \Omega$$

Désormais nous pouvons soit appliquer la méthode graphique, soit le calcul. Comme vous pouvez le constater, ce n'est pas compliqué. Dans ce circuit **et** à cette fréquence, la réactance capacitive domine, le courant sera en avance sur la tension

$$Z = \text{racine} (50^2 + (63 - 1592)^2)$$

$$Z = 1529 \Omega$$

Mes bons amis, je vais attirer votre attention sur les derniers points étudiés, grâce à l'exemple ci-dessus.

Supposons que la tension alternative alimentant ce circuit est de 100 V (toujours à 10 MHz). Suivez-moi bien

Le courant qui circule $I = \frac{U}{Z}$

$$I = \frac{100}{1529} = 0.065 \text{ A}$$

La tension aux bornes du condensateur $\frac{1}{I}$

$$U_C = 1592 \times 0.065 = 103.5 \text{ V}$$

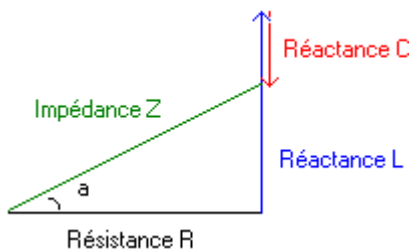
Formation Technique F4 & F8 – Les courants

$U_C = X_I = \frac{\quad}{C\omega} \times I$	
La tension aux bornes de la self	$U_L = 63 \times 0.065 = 4.12 \text{ V}$
$U_L = X_I = L \omega I$	
La tension aux bornes de la résistance	$U_R = 50 \times 0.065 = 3.25 \text{ V}$
$U_R = R I$	

Nous vérifions bien que la somme algébrique des tensions est supérieure à la somme géométrique ce qui confirme que les tensions ne sont pas en phase.

Un dernier effort et c'est fini !

Nous avons sans cesse parlé de déphasage, d'avance ou de retard mais sans jamais quantifier ce déphasage, peut-être est-il utile de connaître cette valeur.



Une fois que l'on a la valeur de la tangente, n'importe quelle calculatrice fait l'affaire pour tirer l'angle. Transcrivons ces notions de côtés en grandeurs électriques et nous aurons résolu notre problème

Comment procéder ?

Toujours grâce à la trigonométrie.

Reprenons notre diagramme. ce que nous cherchons à calculer est l'angle noté "a". Que connaissons-nous ? La résultante des réactances $L \omega - (1/C\omega)$ et la résistance R. Ces deux vecteurs correspondent respectivement au côté opposé et au côté adjacent de l'angle "a".

$\frac{\text{côté opposé}}{\text{côté adjacent}} = \text{tangente}$

$$Tg = \frac{L\omega - \frac{1}{C\omega}}{R}$$

C'est fini pour aujourd'hui et c'est bien suffisant. Nous parlerons dans un prochain chapitre de la résonance tant des circuits série que parallèle, ainsi que de la puissance, ne vous impatientez pas.

Circuits "parallèle"

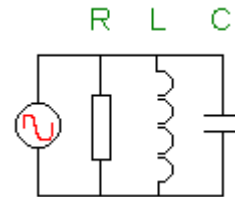


Nous avons vu comment calculer l'impédance d'un circuit série dans le précédent chapitre. Si les circuits série sont assez simples à étudier, il n'en est pas de même avec les circuits parallèle. Notre étude sera donc limitée car au prochain chapitre, je vous présenterai une méthode simple bien qu'un peu fastidieuse applicable à tous les circuits pour déterminer impédance et déphasage.

Le circuit :

Voilà l'engin, il est plus théorique que pratique car la self qui est toujours résistive devrait être représentée avec une résistance série.

On voit vite que dans ce circuit, l'élément commun sera la tension et que les courants circulant dans chaque branche n'auront pas la même phase.



Pourquoi les circuits // sont-ils plus compliqués à analyser que les circuits série ?

Vous vous souvenez du calcul des résistances en //, vous étiez obligé de passer par l'inverse de la résistance pour pouvoir calculer la résultante, puis de nouveau passer par l'inverse pour obtenir la résistance équivalente. Il en est de même ici mais avec des réactances.

Retenez que l'inverse de la résistance s'appelle la conductance

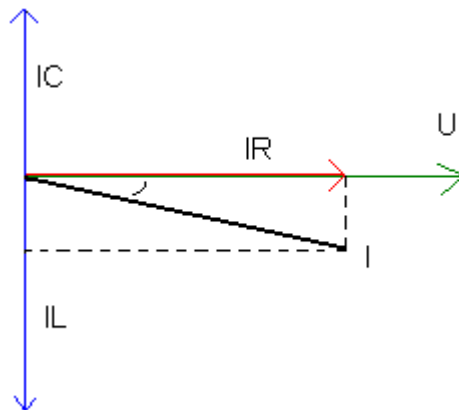
$$G = \frac{1}{R}$$

Passons à notre circuit:

Nous allons utiliser l'axe des tension comme référence et tracer les différents vecteurs représentatifs du courant circulant dans chaque branche.

IL sera le courant dans la self
 IR sera le courant dans la résistance
 IC sera le courant dans le condensateur

I sera le courant résultant
 U la tension aux bornes



Comme vous pouvez le constater, rien de nouveau sous le ciel de l'électricité. On notera toutefois que :

IR est en phase avec U
 IL est en retard de 90° sur U
 IC est en avance de 90° sur U

Si nous voulons connaître la valeur du courant total, nous passerons inéluctablement par une addition vectorielle

$$\vec{IT} = \vec{IR} + \vec{IL} + \vec{IC}$$

La barre supérieure indique un vecteur

Formation Technique F4 & F8 – Les courants

Voyons ce qui se passe sans les vecteurs:

Nos souvenirs de la loi d'Ohm nous disent que $I = U/R$ d'une part et d'autre part que le courant dans la self $I_L = U/X$ soit

$$I_L = U / L\omega$$

Le courant dans le condensateur I_C sera égal à $I_C = U/X$ soit

$$I_C = U / (1/C\omega) \text{ soit :}$$

$$I_C = UC\omega$$

Le courant dans la résistance sera quant à lui

$$I = U/R.$$

Si nous posons :

$$I^2 = IR^2 + (I_L - I_C)^2$$

Nous sommes toujours dans le vrai.

Et si nous bricolons en remplaçant I par sa valeur tirée de la table ci-dessus on obtient :

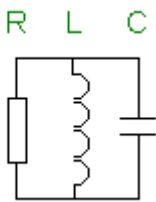
$$I^2 = U^2 / R^2 + (U/L\omega - UC\omega)^2$$

mettons U en facteur

$$I^2 = U^2 [1/R^2 + (1/L\omega - C\omega)^2]$$

Il ne reste plus qu'à tirer la racine et nous obtenons I et du coup la valeur de l'impédance du circuit Z .

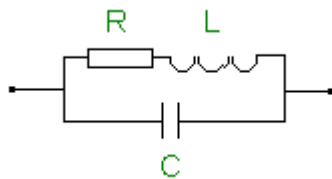
Impédance du circuit parallèle à la résonance :



$$Z = R$$

Nous allons grandement simplifier les choses en abordant uniquement et assez schématiquement l'impédance du circuit // à la résonance. C'est un chapitre ultérieur mais je présume que vous avez déjà une petite idée sur la question. Donc, à la résonance, les courants dans L et C sont identiques mais opposés, il ne reste plus en terme d'impédance que la valeur de la résistance.

Voyons un cas particulier pourtant très réel :



Voici la situation : Nous nous retrouvons en présence d'une self ayant une résistance ohmique ce qui est la réalité physique car aussi petite soit-elle, cette résistance existe. L'ensemble se trouve en parallèle avec un condensateur.

Nous nous proposons de déterminer l'impédance à la résonance. Pour réaliser ce prodige, on passe par une transformation du circuit série en parallèle et on aboutit à :

$$Z = \frac{(L\omega)^2}{R}$$

ou

$$Z = Q \cdot X_L$$

Z : ohm
 L : inductance en H
 ω : $2\pi f$
 R : ohm
 Q : coeff de qualité
 X_L : réactance de L en ohm

Fin de ce chapitre présentant les circuits //, nous en verrons les caractéristiques importantes dans les chapitres suivants

Méthode de détermination de l'impédance pour les circuits série et/ou parallèle



Si les circuits série n'offrent pas de difficultés à l'analyse, les circuits //, pour l'amateur, sont bien plus complexes à traiter.

Aussi une méthode applicable et généralisable à tous ces circuits serait la bienvenue.

C'est ce que nous allons examiner ensemble, sachant que nous sommes dans la recette de cuisine mais que cette recette fonctionne pour tous les circuits à une entrée.

Si nous avons voulu éviter l'aspect "recette", il eut fallu s'accoutumer au calcul imaginaire.

Quelques révisions (ou découvertes) :

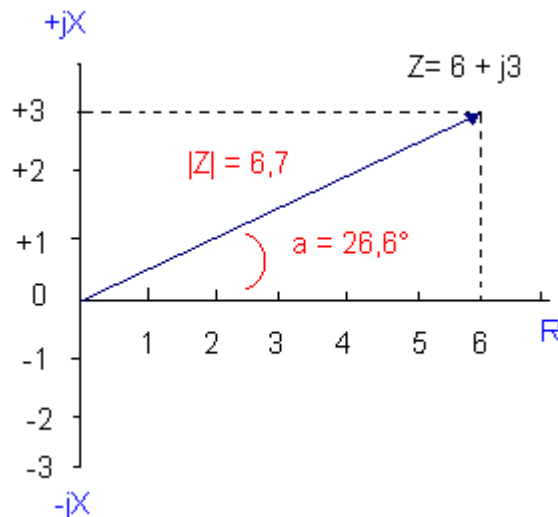
Quand nous avons déterminé l'impédance de nos circuits série, nous avons noté cette impédance sous la forme $6,7 \Omega$, déphasage tension courant de $26,6^\circ$.

Cette notation s'appelle une notation en coordonnées **polaires**. Graphiquement nous pouvons représenter ceci comme cela.

On peut aussi noter cette impédance sous forme dite "**rectangulaire**" et qui se décompose en deux valeurs :

1 ère partie : la valeur de la partie résistive (6 Ω dans l'exemple)

2 ème partie : la valeur et le signe de la réactance (+3 Ω dans l'exemple)



Les valeurs que nous avons calculées avec nos formules d'impédance pour les circuits série nous fournissaient un résultat en coordonnées polaires, c'est-à-dire que Z (l'impédance du circuit) était égale à l'hypoténuse du triangle rectangle ayant pour base la résistance et pour hauteur la réactance.

Ce système est parfait mais ne nous donne pas de vision immédiate de la situation car nous ne savons pas quelle est la nature de la réactance (capacitive/inductive).

En revanche la notation en coordonnées rectangulaires nous donne immédiatement ces indications, ce qui nous fait défaut est la valeur du déphasage mais que l'on peut bien sûr calculer aisément.

En résumé chaque notation qui représente les mêmes grandeurs a ses avantages et inconvénients. Vous retrouverez souvent la notation rectangulaire, autant vous y habituer.

Pour quelques détails de plus :

Voici, tiré de l'exemple ci-dessus la valeur de Z **$Z = 6 + j3$**

Z est la valeur de l'impédance série du circuit, 6 représente la valeur résistive en ohm, et 3 la partie réactive, toujours en ohm.

et le "**j**" ?

Le "**j**" indique que nous avons affaire à une notation vectorielle et que nous ne pourrions jamais additionner $6+3$. (les vecteurs 6 et 3 sont à 90° l'un de l'autre, regardez le dessin).

Le **+** indique une réactance inductive, le **-** une réactance capacitive

Les nombres qui portent cette "marque" sont dit "nombres complexes", par extension, nous traiterons d'impédances complexes, c'est simple non ?

Formation Technique F4 & F8 – Les courants

Les opérations sur les nombres complexes demandent quelques connaissances qui débordent plus que largement du cadre fixé, qui plus est comme déjà dit, nous allons appliquer des recettes de cuisine.

Mais, afin de peaufiner la compréhension, essayons de calculer, à partir de l'impédance complexe, la valeur polaire :

$$Z = 6 + j3$$

J'applique pythagore et hop

$$Z = \text{racine} (6^2 + 3^2)$$

$$Z = \text{racine} (36 + 9) = \text{racine de } (45) = 6,7 \Omega.$$

Vous voyez, ça marche

Conventions :

Il s'agit uniquement ici de données utiles à votre culture générale, il est toutefois bon de connaître ce qui suit pour bien comprendre ce que l'on va faire dans le cadre de cette méthode

Résistance R

$$Z = R + j0$$

Inductance L

$$Z = 0 + jL\omega$$

Capacité C

$$Z = 0 - j \frac{1}{C\omega}$$

Ne soyez pas effrayé, c'est juste une convention d'écriture. Vous noterez qu'il n'y a rien ici de nouveau. Si vous prenez la résistance le $j0$ signifie qu'il n'y a pas de réactance; pour l'inductance, sa résistance = 0 et le $+j$ devant sa réactance $L\omega$ indique que la tension est en avance sur le courant

Pour ce qui concerne la capacité, même système, il n'y a pas de résistance, c'est indiqué par le 0 et la réactance du condensateur est précédée de $-j$ indiquant que la tension sera en retard sur courant, en d'autres termes que le courant sera en avance sur la tension.

Donc nous constatons que notre impédance est, pour tout type de composant, composée de deux parties distinctes. On les appellera :

1 - la partie réelle qui est la partie résistive de l'impédance

2 - la partie imaginaire qui est la partie réactive de l'impédance

On retiendra $Z = R + jX$ ou $Z = R - jX$

Essayons appliquer nos connaissances à nos trois composants de base :

J'ai une résistance de 50Ω , quelle est sa notation en impédance série ?

Là pas de question à se poser, on sait que l'impédance d'une résistance est égale à sa résistance donc $Z=R$ donc

$$Z = 50 + j0$$

J'ai un condensateur de 100 pF , mon circuit fonctionne à la fréquence de 50 MHz , quelle sera la notation ?

Là par contre, changement car il faut tenir compte de la fréquence à laquelle est soumise le condensateur, ceci apparaît dans le terme ω

1 - Calculons la réactance de C

Formation Technique F4 & F8 – Les courants

$$X = \frac{1}{C\omega} = \frac{1}{100 \cdot 10^{-12} \times 2 \times \pi \times 50 \cdot 10^6}$$

il vient $X = 32 \Omega$, il ne reste plus qu'à écrire

$$Z = 0 - j32$$

J'ai une self de $10 \mu\text{H}$ soumise à une tension alternative de 50 MHz , quelle sera la notation ?

Même principe que pour le condensateur, nous savons que $X = L\omega$.

1 - calculons la réactance de L

$$X = L\omega = 10 \cdot 10^{-6} \times 2 \times \pi \times 50 \cdot 10^6 = 3140 \Omega$$

$$\text{et } Z = 0 + j3140$$

Ce n'est pas difficile, ce n'est pas nouveau, vous avez déjà fait beaucoup de calculs similaires. Petite explication que nous allons utiliser dans la recette de cuisine mais qu'il n'est pas nécessaire de connaître, c'est juste pour la culture générale. Je connais l'impédance complexe de la forme $Z = 48 + j25$ d'un circuit

1 - Quelle est la valeur de l'impédance du circuit ?

Facile, nous appliquons Pythagore et il vient :
 $Z = \text{racine}(48^2 + 25^2) = 54 \Omega$

2 - Quel est le déphasage tension courant et dans quel sens

Le sens est donné par le signe devant la réactance, ici la tension sera en avance sur le courant (circuit selfique).

Pour le déphasage nous savons que la tangente = X/R soit $25/48 = 0.52$

Pour obtenir la valeur de l'angle, nous utilisons une calculette (celle de Windows convient très bien) et nous cherchons la fonction Arctangente. Toujours sur la calculette windows, il suffit de cliquer sur INV puis TAN ce qui donne : $27,5^\circ$

3 - j'ai entendu parlé du conjugué, de quoi s'agit-il ?

Il se peut qu'à un moment, nous ayons besoin de simplifier une expression. Reprenons notre exemple où $Z = 48 + j25$. Le conjugué de cette expression sera $48 - j25$.

Exemple :

Imaginons que nous ayons l'expression suivante :

$$Y = \frac{1}{48 + j25}$$

Nous voulons simplifier et nous multiplions par le conjugué, il vient :

$$Y = \frac{48 - j25}{(48 + j25)(48 - j25)}$$

$$Y = \frac{48 - j25}{48^2 + 25^2} = \frac{48 - j25}{2929}$$

Nous en savons assez pour passer à la recette !

La recette : notre objectif est d'appliquer une méthode simple nous permettant de calculer l'impédance et le déphasage d'un circuit connaissant la fréquence de travail et les éléments constitutifs du circuit.

Principe n° 1 :

Nous analyserons notre circuit en partant du premier composant, la charge, puis en rajoutant les éléments les uns après les autres en remontant vers les points de connexion. Il s'agira d'une analyse séquentielle.

Principe n° 2 :

Quand nous rajouterons un composant en parallèle, nous passerons par les admittances (vous le faites sans le savoir en continu quand vous calculez les résistances en //). Ici cela signifiera qu'avant de rajouter un composant, on calcule l'inverse de l'impédance ($1/Z$) qui est l'admittance **Y**, que l'on ajoute l'admittance du nouveau composant et que l'on calcule l'impédance par $Z = 1/Y$.

Principe n° 3 :

L'inverse de l'impédance est l'**admittance** notée **Y** valant $1/Z$ en Siemens
L'inverse de la résistance est la **conductance** notée **G** valant $1/R$ en Siemens
L'inverse de la réactance est la **susceptance** notée **B** valant $1/X$ en Siemens

Principe n° 4 :

Pour passer de Z à Y ou de Y à Z nous appliquerons **systématiquement** les formules suivantes sachant que toute impédance complexe sera de la forme $Z = R + jX$ ou $Z = R - jX$

Formation Technique F4 & F8 – Les courants

Partant de $Z = R + jX$

$$Y = \frac{R}{R^2 + X^2} - j \frac{X}{R^2 + X^2}$$

Partant de $Y = G + jB$

$$Z = \frac{G}{G^2 + B^2} - j \frac{B}{G^2 + B^2}$$

Résumé et synthèse de la méthode

Les équations

Calcul de Z pour	R (1)	$Z = R + j0$
	C (2)	$Z = 0 - \frac{j}{C\omega}$
	L (3)	$Z = 0 + jL\omega$
Passage de l'impédance à l'admittance	de Z vers Y (4)	$Y = \frac{R}{R^2 + X^2} - j \frac{X}{R^2 + X^2}$
Passage de l'admittance vers l'impédance	de Y vers Z (5)	$Z = \frac{G}{G^2 + B^2} - j \frac{B}{G^2 + B^2}$

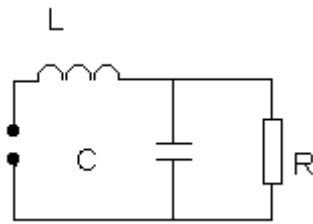
Démarche	1	Poser le 1er composant (la charge) Calculer son impédance $Z_1 = R_1 + jX_1$ par formule (1-2-3)	
	2	Ajouter le 2nd composant Calculer son impédance $Z_2 = R_2 + jX_2$ par formule (1-2-3)	
	3	Question :	
		à placer en série ?	à placer en // ?
		Ajouter les impédances termes résistifs avec termes réactifs. $Z_t = Z_1 + Z_2 = R_t + jX_t$ avec $R_t = R_1 + R_2$ et $X_t = X_1 + X_2$	
4	Calculer Y_1 par formule (4) Calculer Y_2 par formule (4) Ajouter les admittances avec conductance avec conductance, susceptance avec susceptance $Y_t = Y_1 + Y_2 = G + jB$ avec avec $G_t = G_1 + G_2$ et $B_t = B_1 + B_2$		
5	Repasser aux impédances si nécessaire par formule (5)		
	Ajouter composant suivant en reprenant étape 2		

C'est infiniment plus simple qu'il n'y paraît. Comme toujours, nous allons mettre ceci en application avec un exemple. Pour vous aider et éviter de fastidieux calculs (!) voici deux feuilles de calcul Excel4 à télécharger, l'une vous permet de

Formation Technique F4 & F8 – Les courants

calculer les réactances, l'autre vous permet de passer des impédances aux admittances et réciproquement.

Le problème :



$$\begin{aligned} L &= 1\mu\text{H} \\ R &= 50\ \Omega \\ C &= 1\ \text{pF} \\ f &= 1\ \text{GHz} \end{aligned}$$

Cet exemple a été tiré du livre "**The ARRL UHF/Microwave experimenter's manual**" que je vous engage à lire.

Nous avons le circuit ci contre à analyser. Nous désirons connaître l'impédance aux points de connexion du circuit et le déphasage s'il existe entre tension et courant.

Notre circuit fonctionne à la fréquence de 1 GHz

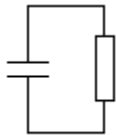


1 ère étape :

positionnons le premier élément, à savoir la résistance et calculons son impédance complexe.

Ceci ne pose pas problème, c'est la définition

$$\mathbf{Z_R = 50 + j0}$$



2 ème étape :

positionnons le deuxième élément, le condensateur en //.

Calculons la réactance ($1/C\omega$) du condensateur à 1 GHz, il vient 159 Ω .

Posons la valeur de l'impédance complexe $\mathbf{Z_C = 0 - j159}$

Maintenant comme ces deux composants sont en //, pour déterminer la résultante, nous devons passer par les admittances.

Préalablement calculons à partir des impédances les admittances de R et C

Pour mémoire dans le cas du condensateur, ($Z_C = 0 - j159$), 0 est la partie résistive (R) et 159 la partie réactive (X)

Pour la résistance nous savons que

$$\mathbf{Z = 50 + j0}$$

Calculons les deux composantes de l'admittance, G et B

$$G_R = \frac{50}{50^2 + 0^2} = 0.02\ \text{S}$$

et $B=0$ (car $j0$)

nous écrivons :

$$\mathbf{Y_R = 0,02 - j0}$$

Pour le condensateur nous savons que

$$\mathbf{Z = 0 - j159}$$

$$B_C = \frac{159}{159^2 + 0^2} = 0,00629\ \text{S}$$

et $G = 0$ (car $R=0$)

nous écrivons

$$\mathbf{Y_C = 0 + j0,00629}$$

nota : vous avez remarqué que le fait de passer des impédances aux admittances change le signe de la réactance.

Nous pouvons additionner les admittances ce qui donne :

Formation Technique F4 & F8 – Les courants

$$Y_t = Y_R + Y_C = (0,02 -j0) + (0 + j0,00629) = \mathbf{0,02 + j0,00629}$$

Nous sommes en possession de l'admittance totale de notre circuit RC

Calculons maintenant l'impédance de notre circuit, pour ce faire nous allons appliquer la formule idoine permettant de passer de Y à Z.

Pour passer de Y à Z nous appliquons :

$$Z = \frac{G}{G^2 + B^2} - j \frac{B}{G^2 + B^2}$$

ce qui donne :

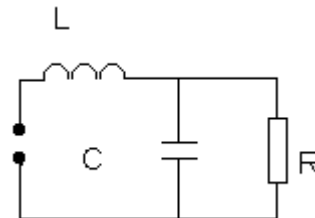
$$Z = \frac{0,02}{0,02^2 + 0,00629^2} - j \frac{0,00629}{0,02^2 + 0,00629^2}$$

ceci est l'impédance du condensateur en // avec la résistance

$$\mathbf{Z = 45,5 - j14,3}$$

3^{ème} étape :

Bon maintenant, nous allons connecter l'inductance en série et calculer l'impédance.



Cette fois-ci l'inductance est connectée **en série**. Nous pourrions donc ajouter les impédances sans autre forme de procès.

Calculons l'impédance série de notre self

D'abord calculons la réactance selfique $Z=L\omega$

$$Z = 1.10^{-6} \times 2 \times \pi \times 1.10^9 = 6280 \Omega$$

Nous allons écrire maintenant l'impédance série de notre self, il vient :

$$\mathbf{Z = 0 + j6283}$$

Additionnons maintenant l'impédance de notre self à celle obtenue lors du calcul précédent, il vient :

$$Z_t = Z + Z_l$$

$$Z_t = \mathbf{(45,5 - j14,3) + (0 + j6283) = 45,5 + j6269}$$

ici on additionne algébriquement les résistances, donc dans cet exemple $45,5 + 0 = 45,5$ et on procède de même pour les réactances comme ici $-14,3 + 6283 = 6269$.

Il ne nous reste plus qu'à calculer le déphasage tension courant.

Nous avons vu qu'il nous suffisait, à partir de l'impédance complexe d'appliquer X/R pour obtenir la valeur de la tangente. Nous pouvons, par la fonction arctangente, calculer directement la valeur de l'angle.

$$\text{Arctangente } \frac{X}{R} = \frac{6269}{45,5} = \text{arctangente}(137,8) = \mathbf{89,6^\circ}$$

Arrêtons nous là, d'abord parce que je suis fatigué,deuxièmement parce que ces notions demandent à être digérées.

C'était peut-être un peu long et laborieux, pas très pédagogique, mais bon, après tout je ne suis pas prof, seulement accompagnateur de candidat radioamateur. Dernier point, ceci ne fait pas partie du programme pour la licence amateur, (et fort heureusement) mais ce chapitre vous permettra, plus tard, d'appréhender bcp mieux ce qui se passe dans vos coupleurs et lignes de transmission quand vous passerez dans la catégorie "senior" (humour !)

Formation Technique F4 & F8 – Les courants

La résonance



Encore un terme barbare !

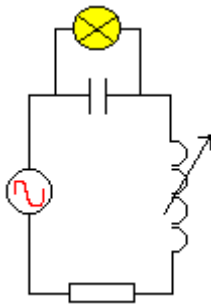
Nos circuits série ou parallèle ont une propriété fondamentale, ils résonnent ! (nous nous raisonnons). De quoi peut-il bien s'agir ?

Nous allons maintenant voir la propriété essentielle de ces circuits sans laquelle la radioélectricité n'existerait pas. Vous avez déjà expérimenté les phénomènes de résonance mécanique à un moment ou l'autre de votre vie, ne serait-ce que quand l'état vous a habillé, nourri et logé gratuitement pendant un an. A cette occasion on vous a dit qu'il était interdit de marcher au pas sur un pont.

En effet on peut imprimer des chocs mécaniques avec la marche "au pas" susceptibles de faire entrer en résonance le pont et de le détruire.

Nos circuits électriques vont résonner électriquement, cette fois-ci l'effet sera bénéfique et nous l'utiliserons dans nos émetteurs et nos récepteurs.

Commençons par voir les effets de la résonance avec un exemple pratique :



Nous réalisons le montage suivant, c'est un classique circuit série. L'inductance est variable et nous avons placé une ampoule aux bornes du condensateur. Notre circuit est alimenté par une tension alternative.

1 - Nous positionnons la self à sa valeur la plus basse ce qui revient à dire qu'elle est pratiquement supprimée et nous alimentons le montage.

Rien ou presque ne se produit, la lampe rougit à peine.

2 - Nous augmentons progressivement la valeur de l'inductance

A un moment l'éclat de la lampe augmente, et atteint son maximum pour une position bien précise du curseur de la self

3 - Nous continuons d'augmenter la valeur de L

L'éclat diminue très rapidement pour pratiquement disparaître

Interprétation et résultat des mesures :

Nous avons également placé un voltmètre alternatif aux bornes de l'ampoule. Quand l'éclat a atteint son maximum, nous avons pu constater que la tension aux bornes de l'ampoule était bien supérieure à la tension délivrée par le générateur ! Miracle ?

Non physique seulement !

Que se passe-t-il dans notre circuit ?

Quand la self est à 0, le condensateur qui présente une certaine réactance limite le courant dans le circuit comme la résistance d'ailleurs. Le courant est en avance sur la tension.

Progressivement nous augmentons L. La réactance de L qui était de 0 ou presque augmente.

A un moment, la réactance de L égale celle de C. Les courants dans les deux composants sont égaux mais en opposition de phase (ils s'annulent), le courant global n'est plus limité que par la résistance R, il est donc, à ce moment, maximum.

Notre self et notre condensateur ont à ce moment une réactance qui n'est pas négligeable, nous savons que la tension U aux bornes du condensateur est égale à :

$$U_C = X I \text{ soit}$$

$$U_C = \frac{I}{C \omega}$$

$$\text{et } U_L = L \omega I.$$

Formation Technique F4 & F8 – Les courants

Et voilà d'où vient cette "surtension". Elle ne se produit que dans cette circonstance, quand $X_C = X_L$

Quand ce phénomène se produit, nous dirons que le circuit entre en résonance ou résonne

Il y aura résonance dans un circuit RLC ou LC qu'il soit "série" ou "parallèle" quand et uniquement quand la réactance de la self sera égale à la réactance du condensateur. On traduira cela par deux relations extrêmement importantes :

$$L\omega = \frac{1}{C\omega}$$

Cette relation traduit l'égalité des réactances de la self et du condensateur

$$LC\omega^2 = 1$$

Cette relation n'est que le développement de la formule de gauche et ne traduit que le même phénomène

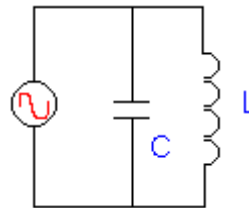
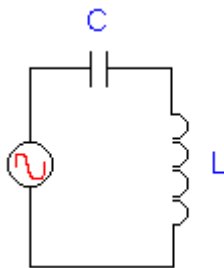
Avec L en H *** C en Farad **** $\omega = 2\pi f$ *** f en Hertz

Nous connaissons désormais le principe, voyons en les effets pour les circuits série et parallèle :

Principe de base : Tout circuit série ou parallèle à une et une seule fréquence de résonance.

Pour ce qui suit nous négligerons R, et nous ferons cette fois varier la fréquence du générateur de manière à observer le comportement de notre circuit, sous la fréquence de résonance, à la fréquence de résonance et au dessus de la fréquence de résonance.

Circuit Série	Circuit parallèle
---------------	-------------------



Nos deux circuits utiliseront les mêmes composants, à savoir :

f = 50 MHz

C = 10 pF

L = 1 μH

X_L est la réactance de la self

X_C est la réactance du condensateur

Z l'impédance du circuit

La dernière ligne indique le comportement du circuit.

Nous allons calculer les réactances du condensateur et de la self ainsi que l'impédance totale du circuit. Du déphasage nous tirerons le comportement global du circuit.

F	10 MHz	50 MHz	90 MHz
X_L	63	314	565
X_C	1592	314	177
Z	1529	0	388
	capacitif	résistif	selfique

F	10 MHz	50 MHz	90 MHz
X_L	63	314	565
X_C	1592	314	177
Z	65	infini	257
	selfique	résistif	capacitif

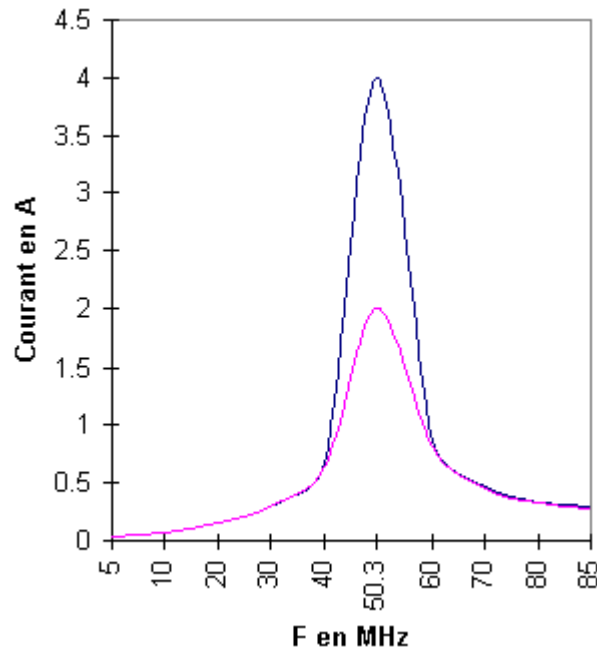
Sur le circuit série, on constate qu'à la résonance l'impédance tend vers 0 (s'il n'y a pas d'élément résistif), ce qui implique que le courant sera maximum. Sous la fréquence de résonance, le circuit est

Sur le circuit parallèle, on constate qu'à la résonance l'impédance est maximum, le courant minimum. On notera toutefois qu'il y a surintensité dans les éléments réactifs (L et C). Sous la fréquence de résonance le circuit est selfique (le plus grand courant passe par la self), au dessus de la fréquence de résonance, le circuit est

Formation Technique F4 & F8 – Les courants

capacitif (le courant est en avance sur la tension) car la réactance du condensateur est plus élevée que celle de la self, au dessus de la fréquence de résonance, c'est l'inverse, le circuit est selfique.

capacitif (le plus grand courant passe par le condensateur qui a une réactance plus faible).



Nous allons utiliser la courbe que vous voyez ci-dessus

Pour les circuits "série" elle indique la variation du courant en fonction de la fréquence.

Pour les circuits "parallèle", elle indique les variations d'impédance en fonction de la fréquence.

Ici deux courbes de résonance sont représentées, la courbe bleue est représentative d'un circuit comportant peu de résistance, la courbe violette est issue d'un circuit deux fois plus résistant que le précédent. Comme on l'imagine facilement plus la résistance est faible plus le courant est important dans un circuit série et plus l'impédance sera grande dans un circuit //.

Résumé des propriétés des circuits série, //

à la résonance	Circuit série	Circuit parallèle
I	maximum	minimum
U	surtension	
Z	minimum	maximum

A quoi cela peut-il nous servir ?

Nous allons utiliser ces circuits pour faire des filtres, pour réaliser des oscillateurs, pour mettre en évidence une fréquence parmi "n" fréquences, pour faire des multiplicateurs de fréquence etc. Ces circuits sont les éléments de base de toute la radioélectricité.

Après ce chapitre reposant, nous allons voir quelques relations mathématiques concernant la résonance.

Fréquence de résonance - facteur de qualité



Nous avons étudié au chapitre précédent la résonance dans les circuits série et // sans toutefois quantifier cela. De plus nous nous sommes placés dans un monde imaginaire et merveilleux où les pertes et les facteurs parasites n'existaient pas. Hélas, la vie n'est pas ainsi faite et nous allons revenir à la réalité. Dans ce chapitre, nous allons déterminer la fréquence de résonance d'un circuit et son facteur de qualité Q.

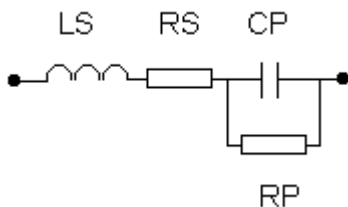
Nous avons pris l'habitude de raisonner en alternatif comme en continu à propos des composants. En continu une résistance est une résistance, il n'y a rien de mystérieux. En alternatif une résistance n'est pas seulement une résistance, cela peut aussi devenir une self non négligeable quand la fréquence croît et en même temps une capacité. Un condensateur peut s'avérer selfique et une inductance n'est jamais pure car elle est aussi résistive. Plus ennuyeux une self possède une capacité plus ou moins répartie entre spires.

Bref, les choses ne sont pas aussi simples qu'il y paraît.

Autre phénomène lié à l'alternatif, **l'effet de peau** (skin effect).

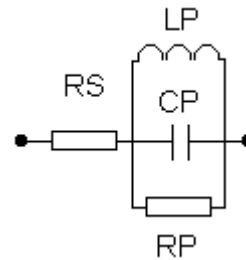
En continu le courant circule dans tout le corps des conducteurs, en alternatif le courant ne circule que sur la périphérie des conducteurs. De ce fait la résistance ohmique de ces conducteurs n'est pas constante mais croît avec la fréquence.

le condensateur réel



La fréquence maximale d'utilisation d'un tel condensateur est limitée par l'inductance série LS qui peut annuler la réactance capacitive CP et/ou résonner avec CP

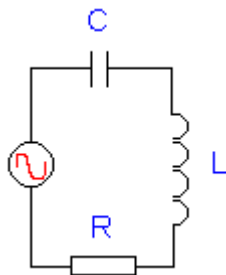
L'inductance réelle



CP est la capacité parasite distribuée entre spires, RS la résistance série, RP est la résistance distribuée le long de la bobine. Aux basses fréquences notre self est fortement capacitive

Dans ce qui suivra, nous considérons tout ceci sous la forme d'une seule et unique résistance qui prendra en compte toutes les résistances parasites

Reprenons notre circuit série :



Nous voici face à notre classique circuit série. Ici c'est la fréquence du générateur qui est variable et nous allons la faire varier de 5 à 85 MHz.

A chaque fois nous calculerons les réactances du condensateur, de la self ce qui nous permettra de calculer l'impédance du circuit. Z et U connues, nous calculerons I et la tension aux bornes de L et C. OK ?

Valeurs des éléments du circuit:

L = 1 µH * C = 10 pF *** R = 50 Ω *** f = variable de 5 à 85 MHz *** U = 100 V**

Formation Technique F4 & F8 – Les courants

MHz	5	20	50.3	70	85
XL	31	126	316	440	534
XC	3183	796	316	227	187
Z	3152	671	50	218	350
I (A)	0.0317	0.149	2	0.458	0.285

Utilisez la feuille de calcul Excel pour effectuer ces calculs. Bon maintenant que nous avons ces données, calculons les tensions aux bornes de R, C et L en appliquant simplement la loi d'Ohm qui dit que :

$$U = ZI, U = X_c.I \text{ et } U = X_L.I$$

MHz	5	20	50.3	70	85
UL	0.98	18.8	632	201.5	152.2
Uc	100.9	118.6	632	104	53.3
UR	1.858	7.45	100	22.9	14.25

Nous constatons que notre circuit résonne sur 50.3 MHz quand les réactances $X_L = X_c$, rien de nouveau. Nous constatons également que la tension est très importante, à la résonance, aux bornes de L et C. Pouvons nous interpréter cela ?

Tout se passe comme si nous avons un coefficient multiplicateur de la tension fournie par le générateur.

Poursuivons dans cette voie:

A la résonance nous avons aux bornes de L et de C une tension de 632 V. Notre générateur alimente le montage sous une tension de 100V. Faisons le ratio, il vient

$$\text{ratio1} = \frac{632}{100} = 6.32$$

Si nous observons attentivement nos chiffres dans les tableaux ci-dessus et que nous faisons le même ration mais pour la self et la résistance nous trouvons :

$$\text{ratio2} = \frac{316}{50} = 6.32$$

Bingo ! Nous mettons en évidence un coefficient multiplicateur qui se manifeste à la résonance. Ce coefficient est connu sous le nom de coefficient de qualité du circuit, on l'appelle également le Q du circuit.

Quantification de Q pour un circuit SERIE

$$Q = \frac{X_L}{R}$$

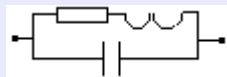
avec X_L et R en Ω et Q : grandeur sans unité

Quantification de Q pour un circuit PARALLELE

$$Q = \frac{R}{X}$$

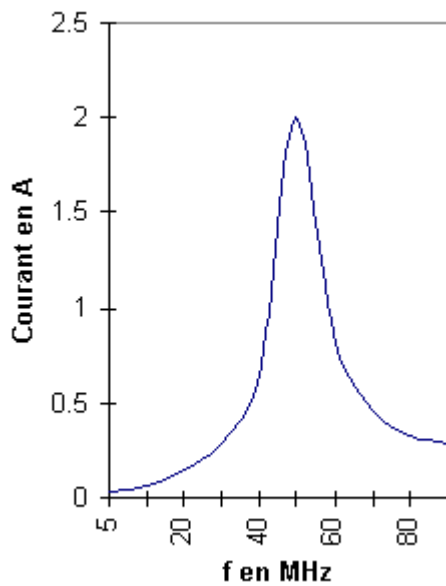
On constate que c'est l'inverse d'un circuit. A la résonance $X_L = X_c$, on prendra pour la calcul indifféremment l'une ou l'autre

Quantification de Q pour circuit MIXTE

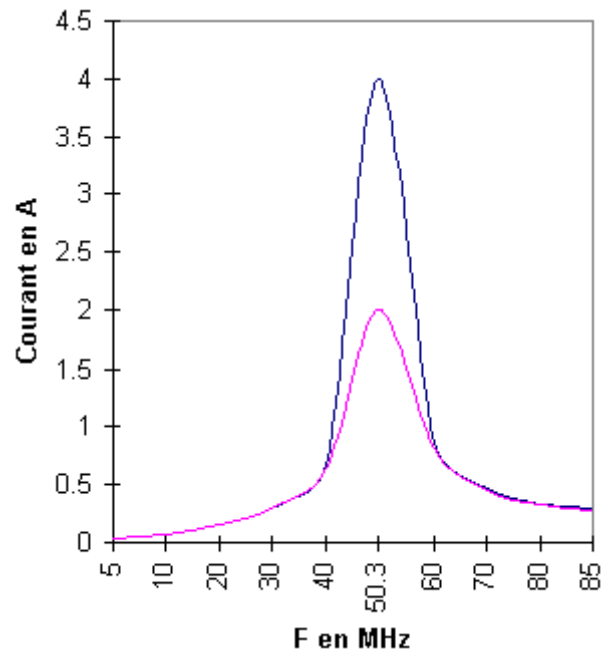


$$Q = \frac{X_L}{R}$$

Formation Technique F4 & F8 – Les courants



Voici l'allure de la courbe du courant dans notre circuit. Les points de mesure ne sont pas nombreux ce qui explique ce tracé un peu taillé à coups de serpe. Nous savons que le courant est limité, pour le circuit série, par la résistance globale du circuit (parasite + ohmique). Dans notre cas nous l'avons évaluée à 50 Ω . Si nous avions eu seulement 25 Ω de résistance l'allure de la courbe eut été différente



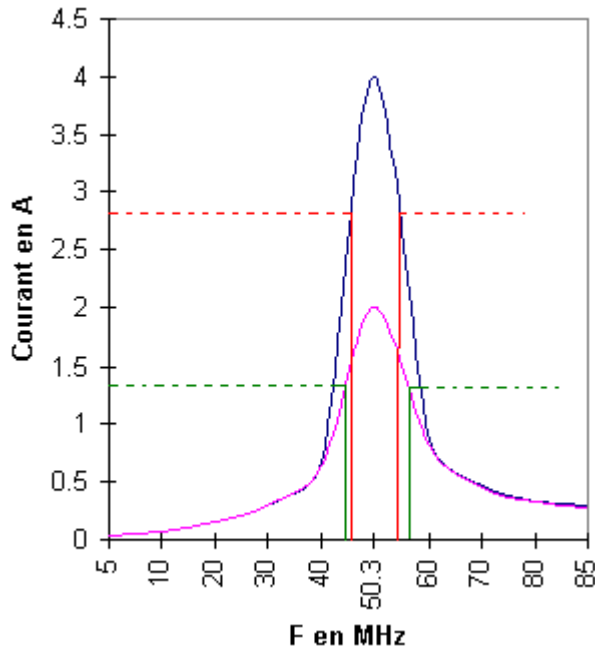
Voici la nouvelle courbe avec une résistance globale de 25 Ω . On constate :
1 - Que le courant est bcp plus important (rapport des résistances)
2- Que la courbe est bcp plus raide (en rose la précédente)

Ceci va nous amener vers un nouveau concept qui est la bande passante.
(entre parenthèses, vous en entendez bcp parler, vous qui êtes internaute, sachez qu'il serait préférable de parler de débit de connexion que de bande passante...)

Définition :

La bande passante sera l'écart de fréquence compris entre les deux fréquences F1 et F2 ou le maximum de tension diminue de 3dB.

Formation Technique F4 & F8 – Les courants



Nous n'avons pas défini le décibel, retenir pour le moment que 3 dB correspondent à une chute de l'amplitude de 1,41 (racine de 2). Voyons cela en images.

Nous reconnaissons notre courbe de courant du circuit série résonant à 50 MHz.

En bleu la courbe avec un Q de 12.64

En rose la courbe avec un Q de 6.32.

Nous avons tracé les points où l'amplitude chute de 3 dB et projeté ces points sur l'axe des fréquences.

Nous remarquons que le circuit qui possède le Q le plus élevé est celui qui a la bande passante la plus faible, donc celui qui est le plus sélectif.

La sélectivité sera souvent recherchée dans nos circuits.

Nous écrivons que la bande passante à -3dB est égale au quotient de la fréquence de résonance par le coefficient de qualité du circuit.

B : Bande passante en MHz

f₀ : Fréquence de résonance en MHz

Q : Facteur de qualité ou surtension - grandeur sans unité

$$B = \frac{f_0}{Q}$$

Quelques compléments de culture générale sur la bande passante:

On parle toujours de bande passante à -3 dB car c'est devenu une norme, sachez cependant que l'on peut calculer la bande passante pour toute autre valeur, comme par exemple -6 dB. Comme vous l'imaginez la formule précédente d'une si élégante simplicité va subir quelques aménagements car ces fameux 3dB amenaient à une simplification bien commode.

$$B = \frac{f_0}{Q} \sqrt{a^2 - 1}$$

Une nouveauté le coefficient "a" qui vaut justement racine (2) à -3dB (pratique non ?). Vous constatez qu'effectivement que a² vaut 2 et que racine (2-1)=1 et que racine de 1 = 1.

Si nous avions voulu calculer la bande passante à -6dB (rapport de 2), nous aurions obtenu : racine(2² - 1)=1,73.

Cette notion de sélectivité des circuits est importante, dans nos montages nous aurons soit besoin de beaucoup de sélectivité, ce qui impliquera des circuits à fort Q, soit au contraire des systèmes à large bande demandant des coefficients de qualité bas.

Nos circuits résonnent, nous le mesurons, nous le constatons mais sur quelle fréquence ?

Nous avons déjà dit que la condition de résonance était liée, que ce soit pour les circuits série ou parallèle à l'annulation mutuelle des réactances. Ceci ne signifie pas qu'il n'y a pas de réactance, bien au contraire, cela veut dire que ces réactances sont égales et opposées.

en termes mathématiques :

$$L\omega = \frac{1}{C\omega}$$

Formation Technique F4 & F8 – Les courants

Réécrivons notre équation comme suit :
Ce sera la condition de résonance

$$LC \omega^2 = 1$$

Sachant que $\omega = 2 \pi f$ nous pouvons écrire :

$$LC 4 \pi^2 f^2 = 1 \quad \text{ou encore}$$

$$f^2 = \frac{1}{LC 4 \pi^2}$$

extrayons la racine pour obtenir f et nous obtenons:

Cette formule est plus connue sous le nom de formule de Thomson et vous démontre que la fréquence de résonance d'un circuit LC dépend hormis la constante 2π de la valeur de la self et du condensateur.

$$f = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}}$$

Approche pratique du calcul de la fréquence de résonance

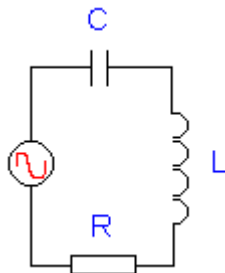
La formule ci-dessus n'est pas forcément très commode à manipuler avec son inverse et sa racine. En y regardant bien, on voit que $1/2 \pi$ est une constante et que nous pouvons modifier la formule pour la rendre plus pratique, plus particulièrement dans le cadre d'un examen. Nous pouvons également utiliser un coefficient multiplicateur de manière à n'utiliser que des unités courantes comme le pF, le μ H et le MHz. Tout ce conduit à retenir :

$$C L f^2 = 25330$$

Précision concernant l'amortissement des circuits :

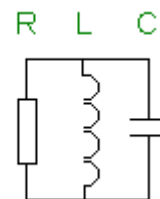
Nous venons de voir l'importance de la bande passante et corrélativement du "Q" des circuits qu'ils soient série ou parallèle. Nous avons également noté l'importance de la résistance R de ces circuits qui détermine justement en grande partie ce fameux "Q". Examinons les exigences pour les circuits série ou //.

Circuit Série



Si R est élevée, le courant sera limité, le facteur de qualité faible, le circuit sera fortement amorti. Il faudra donc limiter dans les circuits "série" R quand on souhaitera un Q élevé.

Circuit parallèle //



Si R est faible, le Q sera faible et l'impédance déterminée par la valeur de R. On demande à un circuit // d'avoir une impédance élevée. On amortit un circuit // en abaissant la valeur de R.

Nous venons de voir un des phénomènes les plus exploités en radioélectricité. Retenez bien la formule pratique qui vous évitera le jour "J" de grandes opérations sur votre calculette.+

La puissance en alternatif



Ce chapitre consacré à l'alternatif va nous faire découvrir quelques nouveaux termes.

Revenons un instant au continu :

Nous nous souvenons qu'en continu la puissance était égale au produit de la tension par le courant circulant dans le circuit. A l'occasion de l'étude des circuits alternatifs nous avons dit que la loi d'Ohm s'appliquait à la condition (entre autres) d'utiliser les valeurs efficaces des grandeurs en jeu.

Par ailleurs nous avons vu qu'en alternatif tension et courant n'étaient pas en phase dès lors que des réactances étaient présentes dans le circuit. Tout ceci va nous amener à définir trois types de puissance en alternatif.

Les puissances en alternatif :

La puissance apparente qui s'exprimera en VA (volt ampère). Cette puissance ne prend pas en compte le déphasage qui pourrait exister dans le circuit.

$$P_a = U I$$

La puissance réelle ou **active**, la vraie, s'exprime en Watt et intègre le déphasage tension courant par le biais du cosinus de l'angle noté φ .

$$P = U I \cos(\varphi)$$

La puissance réactive, serait la puissance consommée par les réactances, le conditionnel s'impose car nous savons que les réactances ne consomment pas de puissance. Elle s'exprimera en VAR (Volt Ampère Réactifs)

$$P_r = U I \sin(\varphi)$$

Relation liant les 3 puissances

$$P_a = \sqrt{P^2 + P_r^2}$$

Le facteur de puissance k ou cos (φ)

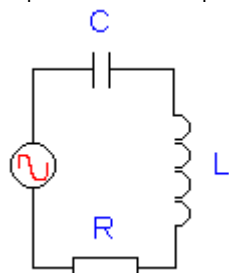
On appelle facteur de puissance "k" en alternatif le COS (φ) de l'angle de déphasage tension-courant

Relation entre P_a , P et k :

Pour obtenir la puissance active connaissant la puissance apparente et le facteur k, nous appliquerons la formule de droite. k ne peut être qu'égal ou inférieur à 1.

$$P = k \cdot P_a$$

repreons un exemple



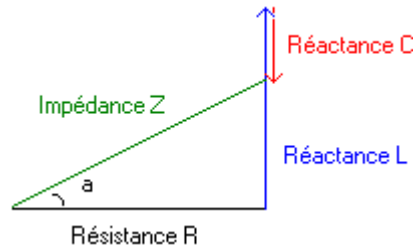
Le générateur de tension alternative fournit une tension de 100 V à ce circuit.

Nous pouvons à l'aide des calculs effectués précédemment calculer les différentes puissances.

MHz	5	20	50.3	70	85
XL	31	126	316	440	534
XC	3183	796	316	227	187
R	50	50	50	50	50
Z	3152	671	50	218	350
I (A)	0.0317	0.149	2	0.458	0.285

Formation Technique F4 & F8 – Les courants

Préalablement à tout calcul, nous devons déterminer le facteur de puissance. rappelons que nous pouvons symboliser notre circuit comme ceci.



Donc avec un peu de trigonométrie que nous connaissons ou de mémoire nous appliquons :

$$Tg = \frac{L\omega - \frac{1}{C\omega}}{R}$$

ce qui nous fournit la valeur de la tangente d'où nous tirons par la fonction arctangente l'angle.

et nous calculons pour chaque fréquence ce qui donne :

MHz	5	20	50.3	70	85
φ	-89°	-88°	0°	77°	81°
Z	3152	671	50	218	350
I (A)	0.0317	0.149	2	0.458	0.285

Il ne nous reste plus qu'à calculer nos puissances.

MHz	5	20	50.3	70	85
Pa	3.17	14.9	200	45.8	28.5
P	0.055	0.52	200	10.3	4.46
Pr	3.16	14.89	0	44.6	28.15

Que peut-on constater ?

Si nous prenons le cas du 70 MHz, nous voyons que la puissance apparente consommée est de 45.8 VA, la puissance active 10.3 W et la puissance réactive 44.6 VAR. Le déphasage courant tension est de 77°, le courant dans le circuit de 0.458 A.

- la seule puissance réellement consommée est la puissance active (10,3W)
- la puissance réactive existe bien à un instant "t" mais est refournie au générateur, le bilan est nul.
- à la résonance la puissance apparente égale la puissance active car le déphasage est nul.

La seule réalité physique dont vous devez tenir compte est la puissance active

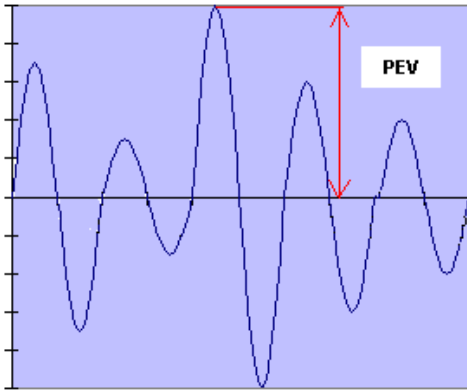
Encore un mot sur la facteur de puissance:

Vous avez dû entendre parler du fait qu'EDF faisait relever le $\cos(\varphi)$ chez certains de ses clients. Ce n'est pas une plaisanterie et EDF ne prend pas ceci à la légère. En effet chez les industriels qui utilisent de nombreuses machines ce qui impliquent souvent des installations plutôt inductives, le $\cos(\varphi)$ est très bas. Comme la tension réseau est fixe, pour fournir de la puissance ($U \cdot I \cdot \cos(\varphi)$) il faut du courant; plus le courant croît plus les pertes en ligne RI^2 croissent et c'est pourquoi EDF demande à ses clients de remonter le $\cos(\varphi)$ de manière à diminuer, à puissance équivalente le débit. Chez les clients "selfiques" cela se réalise en ajoutant des batteries de condensateurs qui ayant une réactance opposée annule le déphasage.

Parlons des puissances utilisées en émission d'amateur :

Formation Technique F4 & F8 – Les courants

Les radioamateurs, même s'ils paraissent de temps en temps curieux utilisent essentiellement le concept de puissance active ou efficace. Toutefois les annonceurs publicitaires se plaisent à utiliser une autre forme de puissance qui est la puissance PEP de l'anglais Peak Envelope Power.



Quel en est l'avantage ?

un signal FM à enveloppe constante ne pose pas de problème en revanche un signal modulé qui évolue entre des maxima et des minima est plus difficile à quantifier.

Après avoir moi aussi confondu puissance crête et puissance PEP, voici la définition qu'en donne l'ARRL Handbook.

La puissance PEP est la puissance moyenne fournie à la ligne de transmission d'une antenne par un émetteur durant un cycle à la crête de l'enveloppe de modulation.

Traduit mathématiquement cela donne :

$$PEP = \frac{(PEV \times 0,707)^2}{R}$$

Avec PEP en W
PEV en Volt (tension crête)

Notez donc que les watts PEP sont des watts efficaces

La PIRE ou EIRP et la PAR ou ERP :

Moins exotique et beaucoup plus utile voici la PIRE (de toutes !), la **Puissance Isotrope Rayonnée Equivalente** que nos amis anglo-saxons appelle EIRP ou Equivalent Isotrop Radiated Power.

Si votre émetteur fournit une puissance de 100 W à une antenne ayant 6 dB de gain, il est intéressant de savoir quelle serait la puissance équivalente dans un aérien isotropique, càd un aérien rayonnant de la même façon dans toutes les directions. Il s'agit d'un aérien totalement hypothétique d'un gain unitaire, càd de 0dB. Nous verrons tout cela dans la section "Antenne".

Définition et calcul de la PIRE *** Puissance Isotrope Rayonnée Equivalente

C'est le produit de la puissance transmise à l'antenne multipliée par le gain par rapport à l'isotrope de l'antenne en rapport (pas en dBi).

$$PIRE = P \times G$$

Avec P en W
Gain isotropique en rapport

Exemple :

Vous avez acheté une antenne portant la mention Gain = 6dBi.
Vous le verrez plus tard, 6dB correspondent à un rapport de 4 en puissance.
Votre émetteur délivre 100 W à l'antenne et vous n'avez pas (heureux veinard) de perte dans le coaxial.

Votre PIRE sera :

$100 \times 4 = 400 \text{ W}$.
ce qui revient à dire qu'utiliser vos 100 W avec votre antenne de 6dBi est équivalent à utiliser 400 W dans une antenne isotropique. En d'autres termes, un correspondant quelconque vous recevrait avec la même intensité dans un cas d'installation comme dans l'autre.

Définition et calcul de la PAR *** Puissance Apparente Rayonnée

C'est le produit de la puissance transmise à l'antenne multipliée par le gain par rapport au dipôle de l'antenne en rapport (pas en dBi).

$$PAR = P \times G$$

Avec P en W
Gain par rapport au dipôle en rapport

Exemple :

Vous avez acheté une antenne portant la mention Gain = 4dBd ce qui correspond à un rapport de sensiblement 2,5
Votre émetteur délivre 100 W à l'antenne et vous n'avez pas (heureux veinard) de perte dans le coaxial.

Votre PAR sera :

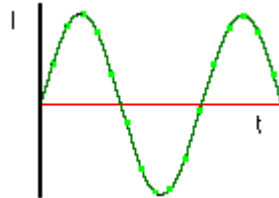
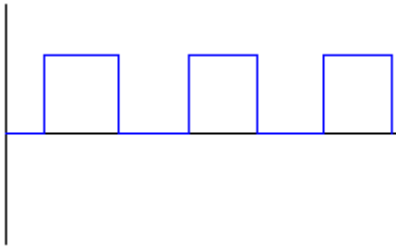
$100 \times 2,5 = 250 \text{ W}$.

La puissance peut s'exprimer aussi en décibel (dB) par rapport au watt ou à un sous-multiple, le milliwat. Il s'agira du dBW et du dBm. Nous en reparlerons dans le chapitre consacré aux décibels.

Courants non sinusoidaux



Encore une nouveauté ! Nous avons jusqu'ici pensé que tous les signaux étaient parfaitement sinusoidaux, c'est presque vrai mais comme la nature est joueuse, nous allons de temps en temps trouver des signaux très éloignés de la forme idéale. Ce sera parfois recherché et bénéfique, ce sera parfois involontaire et préjudiciable.



Regarder ces deux figures, à priori tout les distingue et elles n'ont rien en commun, d'accord ? Et pourtant pas si sûr... Un grand physicien nommé Fourier a démontré que tout signal périodique pouvait se décomposer en une somme de sinusoides qu'il convenait de placer judicieusement en amplitude, fréquence et phase. Ceci nous amène tout naturellement à parler des **harmoniques**.

D'abord on dit **UN** harmonique, eh oui c'est masculin. Ce n'est pas spécifique à la radio, on retrouve cela partout, nous verrons quelques exemples tout à l'heure.

Définition :

L'harmonique est un multiple entier d'un signal de fréquence f .
l'harmonique 2 du signal de fréquence f sera égale à $2f$

$$H_2 = 2 f$$

$$H_n = n f$$

Manifestation des harmoniques dans la vie courante.

Le saviez-vous que vous étiez les Jourdain des harmoniques ? Car vous en produisez sans répit ! Prenons l'exemple des instruments de musique. Faisons effectuer un sol par un piano et un sol par un violon. Vous identifiez sans ambiguïté les instruments même si ceux-ci jouent la même note, de même fréquence. Ceci est dû aux harmoniques présents. La fréquence fondamentale est la même mais la répartition spectrale des harmoniques est différente. Il en va de même avec votre voix, on appelle cela le timbre ! (de là à être timbré !). Revenons à la radioélectricité.

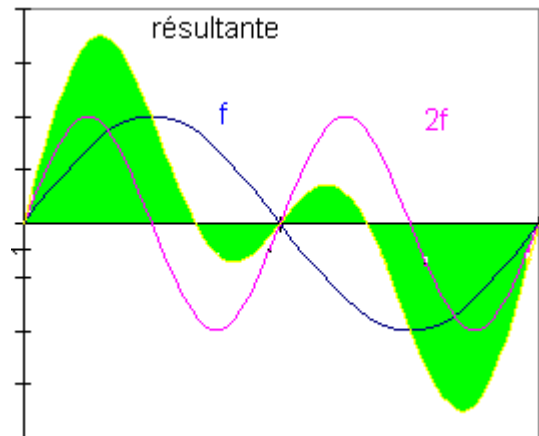
Nous venons d'aborder un autre thème en évoquant la répartition spectrale, voyons préalablement, pour mémoire, comment on peut décomposer tout signal périodique en sinusoides reliées entre elles par une relation harmonique.

Un signal périodique sinusoidal est de la forme avec A_m amplitude maximum du signal, $\omega = 2 \pi f$ et ϕ le déphasage.

$$S = A_m \sin (\omega t + \phi)$$

Formation Technique F4 & F8 – Les courants

Il n'est pas interdit de mettre plusieurs générateurs en série. Si nous mettons deux générateurs de tensions sinusoïdales en série, l'un de fréquence f et l'autre de fréquence $2f$, sans déphasage et d'amplitude identique, voici ce que nous obtiendrons. Sur le graphique, la sinusoïde bleue est de fréquence f , la violette est de fréquence $2f$ et l'aire en vert représente la somme de $f+2f$. Vous pouvez vous amuser avec Excel à reproduire ces courbes et à faire varier tous les paramètres (fréquence, amplitude, phase)



et notre ami Fourier de concrétiser cela par cette formule.
Retenez simplement le dessin qui sera certainement plus parlant pour vous et notez qu'il suffit de prendre une règle et un crayon et d'additionner les valeurs des 2 sinusoïdes pour obtenir la résultante

$$S = A_m \sin(\omega t + \phi) + B_m \sin(2\omega t + \phi_2) + C_m \sin(3\omega t + \phi_3) + X_m \sin(n\omega t + \phi_n)$$

Pourquoi parler des harmoniques ?

Car que ce soit volontaire ou non, il s'agit d'un phénomène omniprésent dans le monde de la radioélectricité. Les quelques applications décrites ci-dessous vous en persuaderont.

Nous avons un oscillateur de fréquence 10 MHz, nous souhaiterions obtenir du 30 MHz, comment faire ?

Il nous suffira de faire passer ce 10 MHz dans un système non linéaire comme par exemple un amplificateur non linéaire qui produira en sortie la fondamentale f et un bon nombre d'harmoniques. Nous n'aurons plus qu'à filtrer $3f$ et à l'amplifier

Mon émetteur réglé sur 50 MHz perturbe la réception en bande FM de mon voisin

Il y a fort à parier que l'harmonique 2 ($2f$) du 50 MHz soit 100 MHz soit responsable de cette gêne. Un filtre supprimera cette émission indésirable.

J'ai construit un récepteur mais il me semble que je reçois des stations qui ne sont pas dans la bande que j'écoute.

Les harmoniques de l'oscillateur de mon récepteur se mélangent à d'autres stations et produisent par somme ou soustraction l'apparition de ces signaux. (Nous reverrons cela dans le chapitre consacré aux récepteurs)

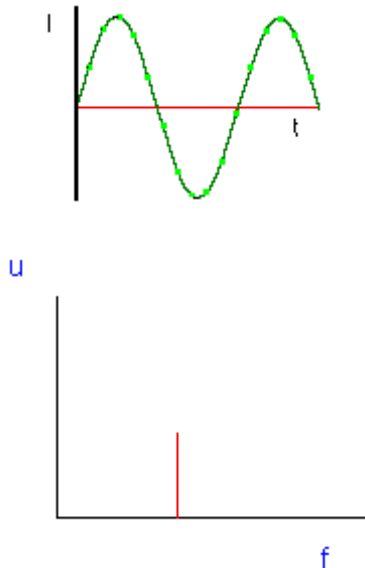
J'ai installé dans ma station une horloge numérique que j'ai réalisée. Depuis mes récepteurs reçoivent quantité de signaux non modulés qui me perturbent.

On peut supposer que cette horloge possède une base de temps réalisée à partir d'un quartz avec des circuits intégrés. Cet oscillateur fonctionnant en signaux carrés génère une quantité énorme d'harmoniques qui sont reçus par mes systèmes de réception.

Revenons à nos moutons car la liste ci-dessus est loin d'être exhaustive. Essayons d'examiner les harmoniques sous l'aspect spectral.

Jusqu'à présent nous n'avons qu'observé l'aspect temporel des variations d'amplitude de nos signaux, c'est-à-dire que nous avons observé, grâce à l'oscilloscope par exemple, les variations de leur amplitude, en fonction du temps.

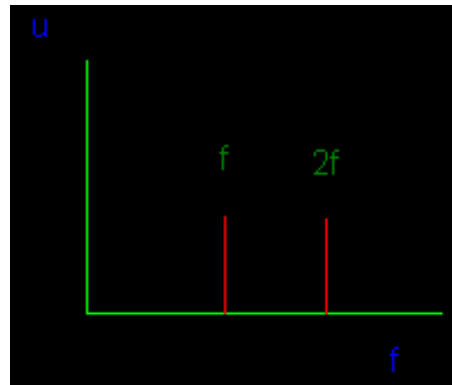
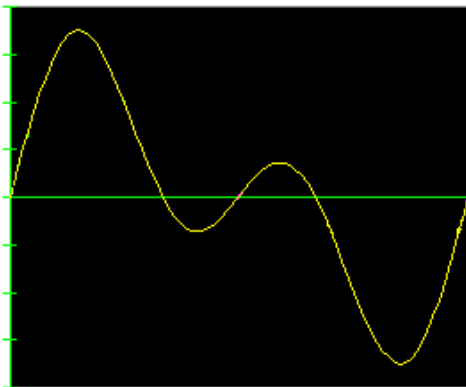
Formation Technique F4 & F8 – Les courants



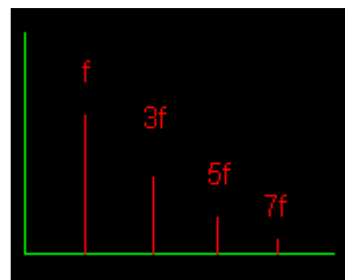
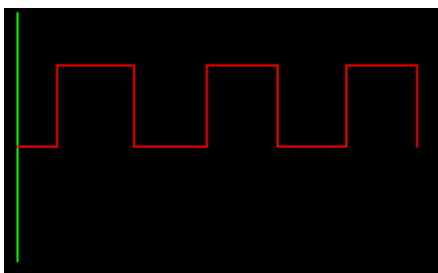
ici nous observons les variations de l'intensité en fonction du temps.
Le temps est positionné sur l'axe de "x" et le courant sur l'axe des "y". Ceci est une représentation commode mais incomplète. Si à la place du temps mettions la fréquence du signal, quels enseignements pourrions-nous en tirer ?

et voilà ! (ne vous inquiétez pas si I a été remplacé par u).
Analysons un peu la chose. Sur l'axe "x" nous avons les fréquences, sur l'axe "y", nous retrouvons les amplitudes comme sur l'oscilloscope. Cette représentation nous permet de mesurer d'une part l'amplitude du signal appliqué à l'entrée de l'appareil de mesure appelé analyseur de spectre et d'autre part la fréquence et surtout la répartition spectrale. Nous faisons de l'analyse fréquentielle. Dans notre exemple qui n'est pas très parlant, nous avons affaire à un signal parfaitement sinusoïdal qui ne comporte qu'une seule composante.

Maintenant, reprenons l'exemple qui avait mis en évidence les harmoniques. Le dessin de gauche vous montre ce qu'affiche, pour ce signal composé de $f + 2f$, un oscilloscope et à droite ce qu'affiche un analyseur de spectre.



Voici le spectre d'un signal carré, comme précédemment, à gauche la vue temporelle, à droite la vue fréquentielle.



Notez au passage que ce signal ne contient que des harmoniques de rang impair, les harmoniques pairs sont absents.
Explications plus bas ...

Relation entre forme de l'onde et répartition spectrale :

Courants Formation F4&F8.doc	Compilation & ajouts F5XG pour ARRT, d'après F6RCP http://perso.orange.fr/f6crp/elec/index.htm	Page 105/113
---------------------------------	---	--------------

Formation Technique F4 & F8 – Les courants

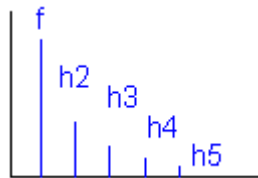
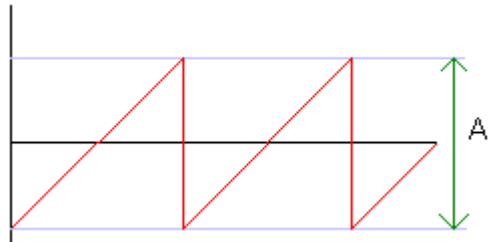
Comme vous venez de le voir dans l'exemple précédent, notre signal carré est totalement dépourvu d'harmoniques pairs. Comment savoir si un signal quelconque contiendra ou pas ces harmoniques pairs et quelle sera l'amplitude relative de ces harmoniques ?

Voici les quatre formes d'ondes fondamentales, avec leur spectre.

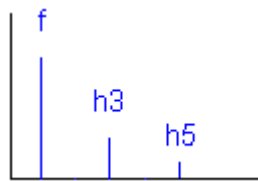
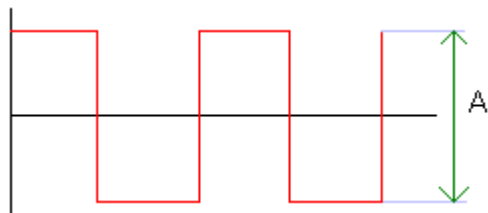
Les formules vous indiquent l'amplitude de l'harmonique de rang "n".

Par exemple, prenons le 1er cas et calculons l'amplitude de l'harmonique de rang 3 sachant que l'amplitude du signal de base est de 10V.

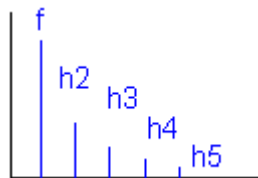
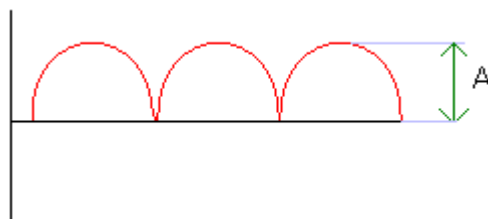
$$\text{il vient } V_3 = \frac{10}{3.14 \times 3} = 1.06 \text{ V}$$



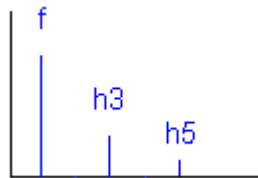
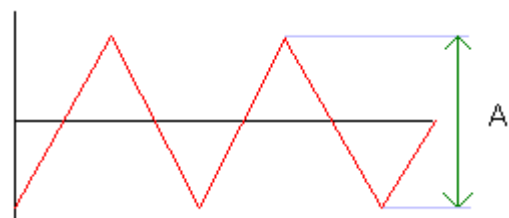
$$V_n = \frac{A}{n \pi}$$



$$V_n = \frac{2A}{n \pi}$$



$$V_n = \frac{4A}{\pi} \frac{1}{4n^2 - 1}$$

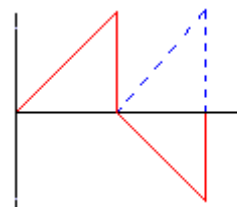


$$V_n = \frac{4A}{(\pi n)^2}$$

Voyons maintenant comment savoir si un signal contient ou pas les harmoniques pairs:

Nous dirons que tout signal à symétrie demi-onde ne contient que des harmoniques impairs

Ce n'est pas particulièrement clair, voici quelques explications complémentaires basées sur un exemple. A votre droite un signal (en rouge). Prenons le symétrique de l'alternance négative et traçons le. Il vient ce que vous voyez en bleu pointillé. Maintenant, faisons glisser vers la gauche ceci et nous constatons que l'alternance positive est totalement recouverte et identique à ce symétrique. Nous en concluons que notre signal ne contient pas d'harmoniques pairs. CQFD



Bien, nous allons nous arrêter ici pour aujourd'hui. Il ne nous reste plus qu'un chapitre consacré au transformateur à étudier et nous serons parvenus au terme de l'étude du courant alternatif.

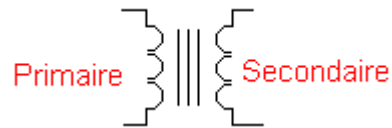
Le transformateur



Nous voici parvenus au terme de l'étude du courant alternatif avec ce chapitre consacré au transformateur, élément capital de nos circuits. Nous utiliserons le transfo dans les alimentations mais aussi dans nos circuits radiofréquence quand il s'agira de transmettre de l'énergie d'un circuit vers un autre par couplage magnétique.

Le principe :

Un transformateur est constitué de deux enroulements indépendants appelés primaire et secondaire, bobinés sur un noyau magnétique commun.



A quoi cela sert-il ?

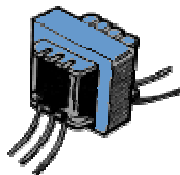
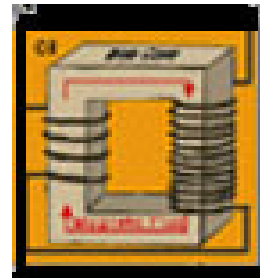
Le transformateur, qui ne fonctionne qu'en alternatif, alimenté au primaire par une tension alternative U , nous permettra d'obtenir au secondaire, soit une tension plus élevée soit une tension moins élevée.

En radiofréquence, nous pourrions bénéficier de ces effets de réduction-augmentation sur les impédances des circuits.

Principe de fonctionnement du transformateur:

L'enroulement primaire est alimenté par une tension sinusoïdale, le circuit est donc fermé. Cet enroulement peut être représenté comme une inductance L de réactance X et un courant I y circule. Ce courant alternatif I , produit à son tour un flux sinusoïdal dans le circuit magnétique du transformateur.

Nous l'avons dit, le circuit magnétique est commun et au niveau du secondaire, chaque spire qui est traversé par ce flux variable est le siège d'une force électromotrice e . C'est ainsi qu'apparaît la tension secondaire.



Vous pouvez observer à votre gauche l'allure des transformateurs les plus usuels.

Conventions :

Les grandeurs physiques du primaire seront notées avec l'indice 1

On considérera le transformateur comme parfait, c'est-à-dire exempt de pertes.

Les grandeurs physiques se rapportant au secondaire seront notées 2

Le transformateur est dispositif réversible.

Formation Technique F4 & F8 – Les courants

Constitution :

Le noyau magnétique, qui est fermé, est constitué de tôles empilées les unes sur les autres, on dit qu'il est feuilleté, ceci pour réduire les pertes par courant de Foucault. Ces tôles sont réalisées à partir de tôles de fer avec adjonction de silicium pour réduire cette fois-ci les pertes par hystérésis.

Les enroulements sont réalisés à base de fil conducteur isolé. On trouve donc au moins deux enroulements, l'un appelé primaire, l'autre appelé secondaire, ces enroulements sont totalement isolés entre eux. Un transformateur peut comporter plusieurs enroulements secondaires.

Le rapport de transformation :

Nous avons dit que notre transformateur avait la capacité d'augmenter, de diminuer ou de restituer à valeur égale la tension primaire (dans ce dernier cas il s'agira d'un transfo d'isolement). Il existe donc une relation liant ces deux tensions (primaire et secondaire) et cette relation fait apparaître le **rapport de transformation** noté "m". Cette relation dit que le rapport des tensions secondaire sur primaire est égale au rapport du nombre de spires du secondaire sur nombre de spires du primaires.

$$m = \frac{U_2}{U_1} = \frac{N_2}{N_1}$$

avec m grandeur sans unité
U en volt
N = nombre de spires

Et pour les courants primaire et secondaire ?

Voyons cela sous l'angle pratique. Nous admettrons que le bilan énergétique de notre transformateur soit le suivant : $P_1 = P_2$.

Ceci ne peut être vrai que dans la mesure où nous négligeons les pertes mais dans la pratique c'est presque correct. Si donc $P_1 = P_2$ (puissance consommée au primaire = puissance restituée au secondaire), nous écrivons le $P_1 = U_1 * I_1$ et $P_2 = U_2 * I_2$

Si notre transformateur est abaisseur de tension, pour obtenir la puissance, il faudra que le courant augmente, c'est la simple application de la loi d'Ohm. En revanche si notre transformateur est élévateur, il faudra que le courant secondaire soit inférieur au courant primaire pour satisfaire la condition.

Donc intuitivement on pense que le courant régira en sens inverse de la tension (pour l'aspect quantitatif bien sûr!) et donc inversement au rapport de transformation.

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{1}{m}$$

$$m = \frac{I_1}{I_2}$$

Notez bien que le rapport des courants est l'inverse du rapport des tensions ou du nombre de spires du transformateur

Nous pensons quand il s'agit de transformateur à l'utilisation la plus classique qui consiste à abaisser ou augmenter la tension réseau, or le transformateur n'est pas utilisé uniquement pour cela. Imaginez que vous ayez un amplificateur BF et que l'impédance de sortie de cet amplificateur soit de 200 Ω , en face de cela vous utilisez un haut-parleur de 4 Ω . Même sans avoir encore vu le chapitre dédié aux adaptations d'impédances, il vous semble évident que quelque chose ne va pas aller. On peut (on doit) dans ce cas de figure réaliser une adaptation et on la réalise grâce à un transformateur.

Et maintenant les impédances

Nous appellerons Z_1 l'impédance du primaire et Z_2 l'impédance du secondaire.
Essayons de calculer le rapport Z_1/Z_2

$$\frac{Z_2}{Z_1} = \frac{U_2 / I_2}{U_1 / I_1} = \frac{U_2}{U_1} \times \frac{I_1}{I_2}$$

Nous remarquons que $U_2/U_1 = m$ et que

$$m = \sqrt{\frac{Z_2}{Z_1}}$$

Formation Technique F4 & F8 – Les courants

$$I_1/I_2 = m$$

donc $Z_2/Z_1 = m^2$

Ce résultat est à retenir, servez-vous de l'exemple qui suit.
Nous devons relier la sortie de notre amplificateur de 200Ω à notre haut-parleur de 4Ω .
Quel devra être le rapport de transformation de notre transformateur ?

$m = \text{racine}(4/200) = 0,14$, càd que notre secondaire devra avoir 7 fois moins de spires ($1/0,14$) que notre enroulement primaire, notre transfo devant être abaisseur dans ce cas là.

Le monde réel :

Nous avons supposé notre transformateur parfait, hélas comme vous avez déjà dû le remarquer dans cette vie, rien n'est parfait et le transformateur n'y échappe pas.

Le transformateur a des pertes par courants de Foucault, et vous remarquerez, plus particulièrement sur les petits modèles que même à vide càd sans charge au secondaire, le transfo chauffe !

Les fils composant les enroulements sont résistants, c'est incontournable. Plus le courant demandé croît, plus la chute de tension RI croît, plus l'effet joule croît, moins la tension disponible au secondaire est importante.

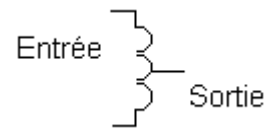
Le transformateur est également affligé de perte par hystérésis. Tout ceci conduit à une perte de rendement du transformateur.

Le rendement se calcule en divisant la puissance sortie au secondaire par la puissance consommée au primaire.

L'auto transformateur :

Il existe un type de transfo appelé auto-transformateur.

J'attire votre attention sur le fait qu'il ne s'agit pas d'un véritable transfo offrant une isolation complète de la source, l'auto-transfo a un point commun réseau-utilisation et peut s'avérer dangereux. Sur le principe on déplace un curseur sur l'enroulement primaire, c'est tout.



La puissance et les transformateurs :

La puissance des transformateurs s'exprime en VA (volt ampère). Ce n'est pas une curiosité, ceci permet de s'affranchir des inévitables déphasages tension courant et d'exprimer ainsi une puissance maximum susceptible d'être fournie par le transfo.

Rappelons qu'aux pertes près, $P_1 = P_2$. Le rendement des transformateurs classiques avoisine les $0,85 - 0,9$ soit $85 \text{ à } 90 \%$.

Les transformateurs en HF :

Vous utiliserez fréquemment les transformateurs en HF. Ils servent souvent sur un enroulement à constituer un circuit résonnant, l'énergie est ensuite transmise par le secondaire à l'étage suivant.

Les tores qui ont été longtemps ignorés par les radioamateurs français sont de plus en plus utilisés. L'utilisation de tores, hormis l'aspect financier, n'offre que des avantages.

Le rayonnement et les fuites sont supprimés, les blindages ne sont plus nécessaires, c'est compact et facile à réaliser.

Vous trouverez souvent dans le circuit magnétique un noyau permettant de faire varier L donc la fréquence d'accord du circuit. Il existe des noyaux en ferrite et des noyaux en aluminium qui ont exactement le comportement opposé. Ceci est résumé dans le tableau ci dessous.

Action	Noyau ferrite	Noyau alu
Enfoncer	F diminue	F augmente
Sortir	F augmente	F diminue

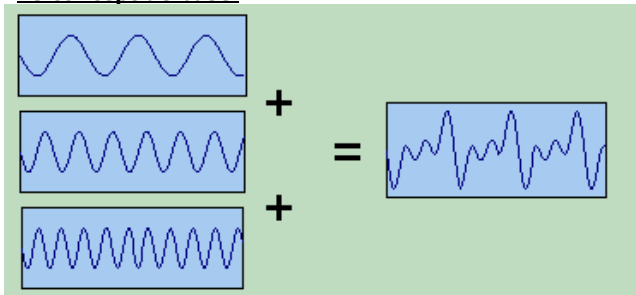
Le transformateur est un composant indispensable, il nous aidera à résoudre bon nombre de problèmes d'adaptation d'impédances, en autres sans négliger, par ailleurs, son rôle "historique" d'élevateur ou abaisseur de tension.

Les séries de Fourier

Introduction :

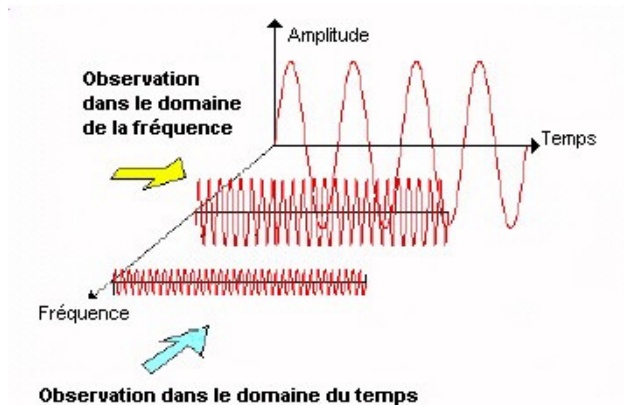
En tant que radioamateurs, nous en avons entendu parler sans trop savoir de quoi il s'agissait. Et pourtant, depuis l'avènement de la microinformatique et l'arrivée en masse du traitement du signal dans nos transceivers, ces fameuses séries sont plus que jamais à l'ordre du jour. Nous les utilisons sans le savoir, dans nos DSP (filtrage), dans nos PC (carte son et traitement du signal), sur nos écrans (images JPG), la liste n'est pas exhaustive. [Cette page est avant tout une tentative de vulgarisation des séries de Fourier](#), il existe tant en librairie que sur le net une abondante documentation que je vous invite à consulter pour entrer plus concrètement dans le sujet.

Le concept de base.



Le baron Fourier (Jean Baptiste Joseph 1768 - 1830) nous a appris que l'on pouvait créer des formes d'ondes très complexes en ajoutant seulement entre elles des courbes sinus et cosinus. A titre d'exemple voici un signal complexe et sa décomposition. Il s'agit d'un signal de fréquence fondamentale f auquel on ajoute un signal $2f$ et $3f$ de mêmes phase et amplitude.

Aspect temporel, aspect fréquentiel du signal



On peut observer un signal électrique sous différents angles comme tente de le démontrer cette image. Si vous vous placez face à l'axe du temps, vous observerez l'amplitude des signaux en fonction du temps, c'est la vue que vous fournira un oscilloscope. Si vous vous placez face à l'axe des fréquences, vous observerez l'amplitude du signal en fonction de la fréquence, c'est la vue fournie par un analyseur de spectre.

Si vous reprenez la vue précédente d'un signal complexe, vous comprenez immédiatement que la vue en fonction du temps ne peut vous fournir aucune indication sur les composantes spectrales du signal. C'est à partir de maintenant que les séries de Fourier deviennent intéressantes.

L'indispensable rappel de trigonométrie

Il n'est pas indispensable d'avoir les cheveux dressés sur la tête en lisant cette tête de chapitre, nous sommes dans le cadre d'un loisir, l'émission d'amateur, pas d'un examen. Essayons de reprendre quelques notions simples:

Les fonctions Sinus et Cosinus :

Prenez la calculatrice Windows (**Démarrer - Programmes - Accessoires - Calculatrice**).

Tapez 0 puis cliquez sur le bouton SIN, l'afficheur indique : 0
Tapez 30 puis cliquez sur le bouton SIN, l'afficheur indique : 0,5
Tapez 90 puis cliquez sur le bouton SIN, l'afficheur indique : 1

Vous voyez c'est simple quand même. La valeur minimum pour cette fonction

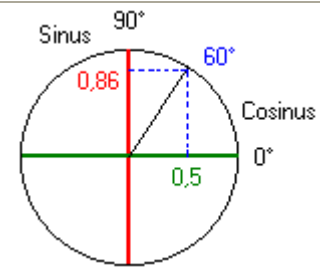
Méthode graphique pour déterminer le sinus ou cosinus d'un angle.

Formation Technique F4 & F8 – Les courants

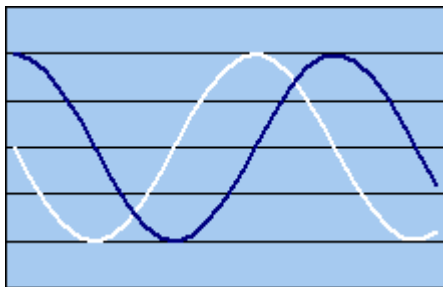
est 0 et la valeur max est 1. Il serait intéressant de voir ce qui se passe quand on dépasse 90°. Testons :

Tapez 135 puis cliquez sur le bouton SIN, l'afficheur indique : 0,707
Tapez 180 puis cliquez sur le bouton SIN, l'afficheur indique : 0

Tapez 235 puis cliquez sur le bouton SIN, l'afficheur indique : -0,81
Tapez 270 puis cliquez sur le bouton SIN, l'afficheur indique : - 1
Tapez 330 puis cliquez sur le bouton SIN, l'afficheur indique : -0,5
Tapez 355 puis cliquez sur le bouton SIN, l'afficheur indique : -0,087



Et maintenant traçons la courbe avec les points obtenus, le résultat est celui-ci :



La courbe blanche représente les sinus tandis que la courbe bleue représente les cosinus. La seule différence entre les deux, c'est le décalage de 90°.

Eh bien quand vous mettez une porteuse sur 7,0 MHz pour régler votre boîte de couplage, votre émetteur produit une suite de sinusoides, il y en a même 7 millions par seconde

Donc un signal alternatif pourra s'écrire dans sa forme la plus simple comme suit :

$$b = a \sin (\omega t) \text{ ou } b = a \sin (2 \pi f t)$$

b est le signal périodique, a est un coefficient qui caractérise l'amplitude, ω représente la pulsation et vaut $2 \pi f$, t représente le temps

Les harmoniques

$$f(t) = \sum_{n=1}^N \sin(n \omega t)$$

Au passage, signalons que harmonique est un nom masculin, il faut donc écrire (et dire) un harmonique. Donc un harmonique est un multiple entier d'une fréquence f. Par exemple si f vaut 10 Hz, l'harmonique 2 de f vaut 20 Hz, l'harmonique 3 vaut 30 Hz, h4 (harmonique de rang 4) vaut 40 Hz, h5 vaut 50 Hz et hn vaut n f (n fois la fréquence f).

On peut écrire cela sous une forme quand même plus condensée comme indiqué sur la figure ci-contre. Pas de panique, cette formule indique simplement que le signal f est la somme du signal fondamental et des harmoniques jusqu'au rang N. On peut développer en écrivant que c'est équivalent à :

$$f(t) = \sin(1\omega t) + \sin(2\omega t) + \sin(3\omega t) + \sin(N\omega t)$$

Si vous aimez Excel, vous pouvez vous amuser à entrer ces formule (n'oubliez pas de faire varier t) 4 fois par exemple , et ensuite d'ajouter les résultats. Vous constaterez que le signal résultant est bien la somme de 4 sinusoides

Comment tenir compte des amplitudes des harmoniques ?

Dans l'exemple précédent il était admis implicitement que les harmoniques avaient la même amplitude que le signal fondamental ce qui est aller un peu vite en besogne. Nous constaterons fréquemment (et heureusement) que l'amplitude des harmoniques décroît comme le rang augmente. Ceci dit, il faut introduire un facteur dans la formule qui permette de prendre cela en compte. Le coefficient "a" vient d'être introduit suivi de l'indice n car à chaque harmonique de rang "n" correspondra une amplitude "a". Si vous devions réécrire la formule comme au-dessus, cela donnerait : $f(t) = a_1 \sin(1\omega t) + a_2 \sin(2\omega t) + a_3 \sin(3\omega t) + a_n \sin(N\omega t)$

Formation Technique F4 & F8 – Les courants

Fonctions sinus et cosinus

$$f(t) = \sum_{n=1}^N a_n \sin(n\omega t)$$

Cette image nous montre quelque chose de nouveau. Le signal ne démarre pas à "0" à l'instant "0". La somme de fonctions sinus ne permet pas cela car quand $t=0$, $\sin(0)$ vaut 0, on voit donc qu'il faut trouver autre chose. Ce sera chose faite en pouvant additionner des fonctions cosinus aux fonctions sinus. Bien naturellement, ceci va avoir un effet sur la formule et comme il peut exister aussi une composante continue, nous allons aussi rajouter un autre coefficient. Voici le résultat:

Le coefficient a_0 représente la composante continue quand elle existe. Pour le reste, rien de bien nouveau si ce n'est que l'on intègre la possibilité de travailler avec des fonctions cosinus. La formule est maintenant complète et universelle

Les coefficients

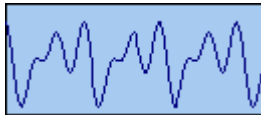
$$\sqrt{a_n^2 + b_n^2}$$

Nous retiendrons que les a_0 , a_n et b_n sont appelés les coefficients des séries de Fourier.

a_n et b_n représentent les composantes d'amplitude de rang n du spectre. Pour un rang "n" on calculera la valeur par la relation ci-devant.

Décomposition d'un signal composite

Nous venons de revue les généraux, ce intéresserait maintenant, ce



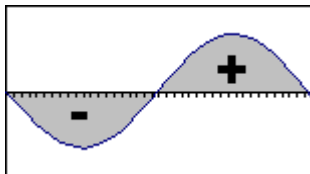
$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^N a_n \sin(n\omega t) + \sum_{n=1}^N b_n \cos(n\omega t)$$

passer en principes qui nous serait

partant d'un signal complexe riche en harmoniques, de décomposer celui-ci et de déterminer l'amplitude et la phase de chacun de ses harmoniques, en un mot de réaliser un analyseur de spectre.

Pour ce faire, nous allons voir quelques propriétés extrêmement intéressantes des fonctions trigonométriques.

Une idée de l'intégration



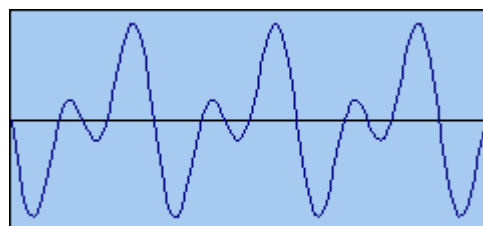
D'une manière schématique, intégrer une fonction cela revient à calculer une aire dans des limites données. Si nous observons cette sinusoïde et que l'on calcule son aire sur une période, on va s'apercevoir que celle-ci est nulle, la partie supérieure étant rigoureusement égale à la partie inférieure, cette dernière étant de signe opposé, la somme vaut 0.

Quelques propriétés intéressantes

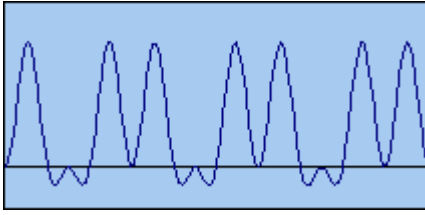
Voici un signal périodique composé de deux signaux d'amplitudes égales et contenant la fondamentale "f" et l'harmonique 2 (2f).

Nous allons maintenant multiplier ce signal par un autre signal sinusoïdal. Pour les besoins de la démonstration graphique, on se contentera de multiplier par un signal de fréquence f , $1,5 f$ et $2 f$.

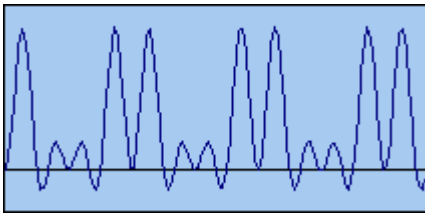
Voyons le résultat ci dessous.



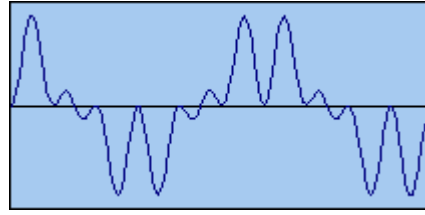
Formation Technique F4 & F8 – Les courants



1 Sur la courbe ci-dessus, nous avons multiplié le signal original par un signal sinusoïdal de fréquence f . On note que si l'on intègre cette fonction (on calcule la surface, l'aire), cette dernière est différente de 0.



3 Idem mais en multipliant f par un signal sinusoïdal $2f$ (soit l'harmonique 2), l'aire est différente de 0.



2 Même principe, mais cette fois nous avons multiplié le signal f par un signal $1,5 f$, donc un signal qui n'est pas en relation harmonique avec le signal d'origine ou ses harmoniques. On constate que l'aire vaut 0, les surfaces au dessus de l'axe sont identiques à celles en dessous.

Nous en déduisons quelques propriétés intéressantes :

- L'aire sur une période d'une fonction sinus ou cosinus vaut 0
- L'aire sur une période d'une fonction (ou onde si vous préférez) qui est le produit de deux fonctions sinus ou cosinus qui **ne sont pas** en relation harmonique vaut 0 - voir figure 2
- L'aire sur une période d'une fonction qui est le produit de deux sinus ou cosinus de même fréquence ou en relation harmonique n'est pas égal à 0 - figures 1 et 3

Donc d'une manière très schématique, pour déterminer les composantes spectrales d'un signal, il suffira de multiplier le signal d'origine par un autre signal, d'intégrer le résultat (calculer l'aire). Si cette dernière est nulle, le signal multiplicateur n'est pas un signal harmonique, on peut donc l'ignorer, si l'aire n'est pas nulle alors on passera au calcul des coefficients. On prendra ensuite l'harmonique suivant comme signal multiplicateur et on effectuera une nouvelle série de calculs.

Calcul des coefficients

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt \quad a_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin(n\omega t) dt \quad b_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos(n\omega t) dt$$

ω est la fondamentale

$$\omega_n = 2\pi f_n = 2\pi \frac{n}{T}$$

La transformée de Fourier discrète et la transformée rapide.

Vous la connaissez aussi sous son appellation anglaise de DFT, elle va consister à déterminer les composantes spectrales d'un signal en appliquant la méthode esquissée ci-dessus. Ceci va nécessiter beaucoup (mais vraiment) beaucoup de calcul. La transformée inverse permettra partant des composantes spectrales de recomposer le signal original.

Deux chercheurs d'IBM dans les années 60 ont inventé la Transformée de Fourier Rapide ou FFT en anglais (Fast Fourier Transform), cette méthode a considérablement réduit les temps de calcul, c'est elle que nous retrouvons dans notre petit monde.

En guise de conclusion :

Nous venons de faire un rapide tour des transformées de Fourier, juste de quoi comprendre le processus. Saluons la mémoire de ce scientifique qui était loin de posséder nos outils modernes et admirons son travail et son génie et rappelons-nous qu'à chaque fois que nous enclenchons le DSP d'un transceiver, nous le lui devons un peu.