9 LES CIRCUITS EN COURANT ALTERNATIF

Pourquoi ces pylônes transportent-ils 3 fils ?

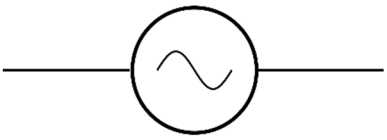
www.meed.com/knowledge-bank/top-100-projects/Pan-Arab-Grid

Découvrez la réponse à cette question dans ce chapitre.

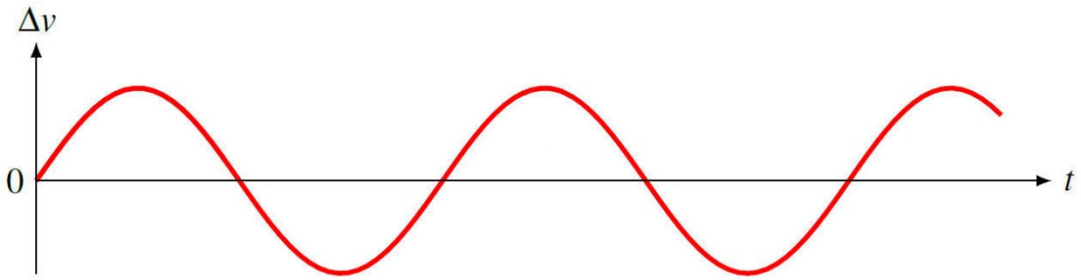
9.1 UNE SOURCE ET UNE RÉSISTANCE

La source de tension alternative

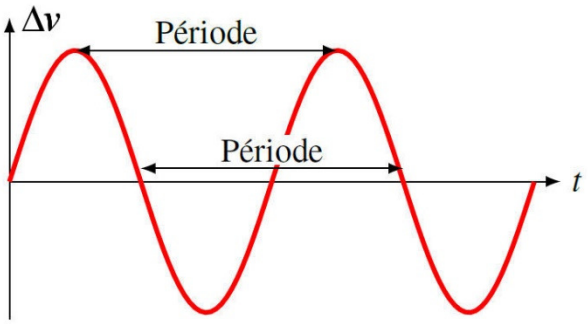
On se rappelle que le symbole d'une telle source est le symbole de droite.



Cette source va fournir une différence de potentiel qui varie de façon sinusoïdale.



La différence de potentiel varie de façon périodique. La durée d'un cycle est appelée la période (*T*). Elle indique le temps que prend la tension pour faire un cycle.



On aura aussi la fréquence (*f*). Elle indique le nombre de cycles fait par la tension en une seconde. Elle est mesurée en hertz (Hz), qui sont des s^{-1}.

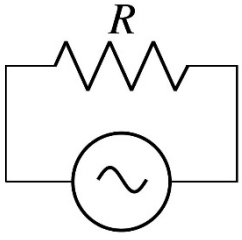
Évidemment, il y a un lien entre la période et la fréquence puisque, plus la tension fera de cycle par seconde, plus la période sera petite. Si la tension fait 10 cycles par seconde, cela signifie que chaque cycle dure 0,1 s (1 seconde/10). Si la tension fait 50 cycles par seconde, chaque oscillation dure 0,02 s (1 seconde/50). On a donc

Lien entre *T* et *f*

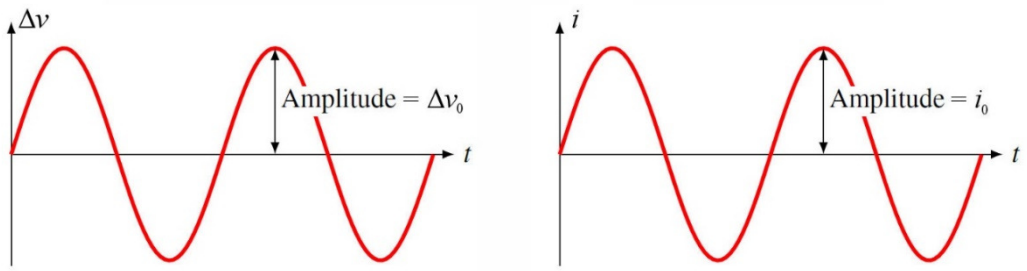
$$T = \frac{1}{f}$$

Une source branchée à une résistance

Examinons maintenant ce qui se produit quand on branche une source de tension alternative (AC) branchée à une simple résistance.



La source va alors fournir un courant. Ce courant va aussi varier de façon sinusoïdale.



Les valeurs maximales de la différence de potentiel et du courant sont les amplitudes. L'amplitude de la différence de potentiel est notée Δv_0 et celle du courant est notée i_0.

Lien entre les amplitudes

En branchant une résistance, on a le lien suivant entre les amplitudes.

Lien entre Δv_0 et i_0

$$\Delta v_0 = R i_0$$

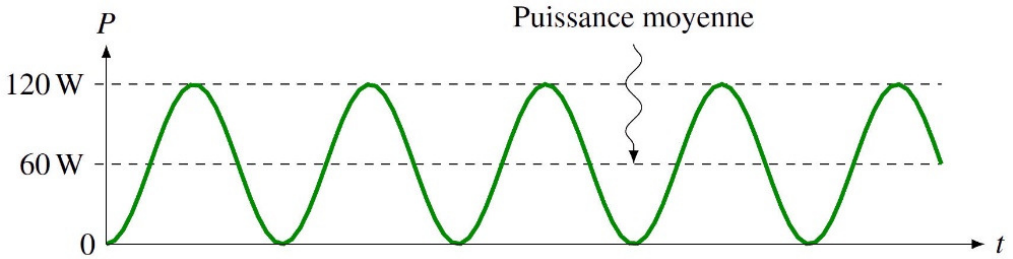
La puissance moyenne fournie par la source

Selon nos résultats des chapitres précédents, la puissance fournie par la source est

$$P = i\Delta v$$

La puissance instantanée change constamment pendant un cycle puisque Δv et i changent constamment. La puissance va alterner entre une valeur nulle et la valeur maximale $i_0 \Delta v_0$.

Par exemple, la puissance pourrait alterner entre 0 W et 120 W comme nous le montre le graphique suivant.



On voit que la moyenne de la puissance est exactement entre 0 et la valeur maximale. La puissance moyenne est donc

$$\overline{P} = \frac{1}{2} i_0 \Delta v_0$$

En utilisant $\Delta v_0 = R i_0$, on peut obtenir les 3 formules suivantes.

Puissance dissipée quand une résistance est branchée à une source alternative

$$\overline{P}_R = \frac{i_0 \Delta v_0}{2} = \frac{1}{2} R i_0^2 = \frac{\Delta v_0^2}{2R}$$

La puissance fournie par la source est dissipée en chaleur dans la résistance. On l'appelle donc aussi la *puissance dissipée par le circuit*.

Les valeurs efficaces

Il arrive très souvent qu'on décrive les courants alternatifs avec les valeurs efficaces du courant et de la différence de potentiel. Le courant efficace est défini ainsi :

> *Le courant efficace d'un courant alternatif est la valeur du courant continu qui dissipe la même puissance moyenne dans une résistance que le courant alternatif.*

On va noter ce courant *I*. Cela veut donc dire qu'on doit avoir

$$RI^2 = \frac{1}{2} R i_0^2$$

Cette formule nous amène au résultat suivant.

Valeur efficace du courant alternatif

$$I = \frac{i_0}{\sqrt{2}}$$

La différence de potentiel efficace est définie ainsi :

> *La différence de potentiel efficace d'un courant alternatif est la valeur de la différence de potentiel constante qui dissipe la même puissance moyenne dans une résistance que le courant alternatif.*

On va noter cette différence de potentiel ΔV. Cela veut donc dire qu'on doit avoir

$$\frac{\Delta V^2}{R} = \frac{\Delta v_0^2}{2R}$$

Cette formule nous amène au résultat suivant.

Valeur efficace de la différence de potentiel alternative

$$\Delta V = \frac{\Delta v_0}{\sqrt{2}}$$

On peut alors donner la formule de la puissance dissipée par le circuit en utilisant les valeurs efficaces. Ceci nous donne les formules suivantes.

Puissance dissipée quand une résistance est branchée à une source alternative

$$\overline{P}_R = I\Delta V = RI^2 = \frac{\Delta V^2}{R}$$

On revient donc aux formules obtenues avec les courants continus en utilisant les valeurs efficaces.

Comme

$$R = \frac{\Delta v_0}{i_0} = \frac{\Delta v_0 / \sqrt{2}}{i_0 / \sqrt{2}} = \frac{\Delta V}{I}$$

on a le lien suivant entre les valeurs efficaces.

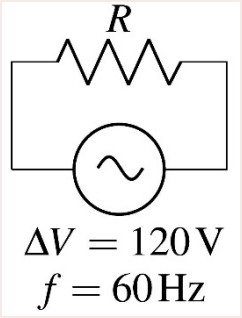
Lien entre ΔV et I

$$\Delta V = RI$$

Valeurs données par les multimètres

Notez aussi que ce sont les valeurs efficaces qui sont affichées par les multimètres quand on travaille avec du courant alternatif.

Exemple 9.1.1



Dans le circuit de droite, la puissance moyenne dissipée par la résistance est de 60 W.

a) Quelle est la valeur de la résistance ?

On trouve la résistance avec la formule de la puissance moyenne.

$$\overline{P} = \frac{\Delta V^2}{R}$$

$$60W = \frac{(120V)^2}{R}$$

$$R = 240\Omega$$

b) Quelle est l'amplitude du courant ?

La valeur efficace du courant est

$$\begin{aligned} I &= \frac{\Delta V}{R} \\ &= \frac{120V}{240\Omega} \\ &= 0,5A \end{aligned}$$

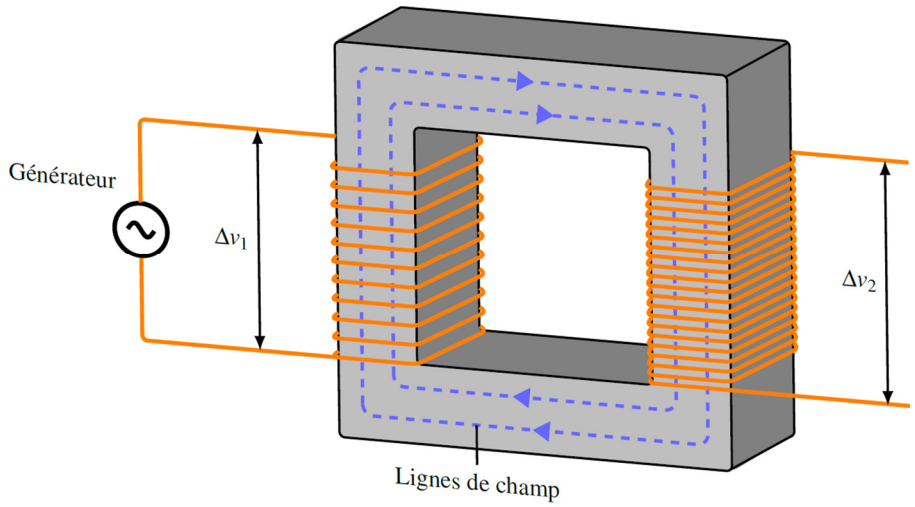
L'amplitude du courant est donc

$$\begin{aligned} i_0 &= \sqrt{2}I \\ &= \sqrt{2} \cdot 0,5A \\ &= 0,7071A \end{aligned}$$

9.2 LES TRANSFORMATEURS

Un transformateur est un appareil qui permet de changer l'amplitude de la différence de potentiel. C'est simplement par induction que ce changement se fait.

Le transformateur est formé simplement de deux bobines reliées par un cadre métallique.



Il va y avoir une différence de potentiel aux bornes d'une bobine (appelé *bobine primaire* ou *enroulement primaire*). On verra alors apparaitre, par induction électromagnétique, une différence de potentiel aux bornes de l'autre bobine (appelé *bobine secondaire* ou *enroulement secondaire*).

Quand on applique une différence de potentiel aux bornes de la bobine primaire, un courant passe dans la bobine et il y a donc un champ magnétique fait par cette bobine. On ne l'a pas vu, mais les lignes de champ sont pratiquement prisonnières dans un cadre métallique.

Les lignes de champ vont donc suivre le cadre pour aller passer à l'intérieur de la bobine secondaire pour ensuite revenir dans la bobine primaire.

Si le courant varie dans la bobine 1, le champ sera variable et le flux dans la bobine 2 sera variable. La différence de potentiel induite dans la bobine 2 sera donc

$$\Delta v_2 = -N_2 \frac{d\phi}{dt}$$

(Il y a N_2 tours de fil pour la bobine secondaire). Il va également se passer la même chose dans la bobine 1. En fait, si on fait la loi de Kirchhoff sur le circuit primaire, on doit avoir

$$\Delta v_{source} - \Delta v_1 = 0$$

Autrement dit, la différence de potentiel faite par le générateur doit se perdre dans la bobine. Elle pourrait se perdre à cause de la résistance des fils, mais il n'y a pas que ça. Le champ magnétique dans le cadre métallique passe dans les deux bobines, ce qui fait un flux dans les deux bobines. Si ce flux change, il devrait y avoir une différence de potentiel induite dans les deux bobines. Si on néglige la résistance du fil de la bobine primaire, c'est uniquement cette différence de potentiel induite par les variations de flux qui fait la différence de potentiel qu'on doit avoir aux bornes de la bobine. On doit avoir que

$$\Delta v_1 = -N_1 \frac{d\phi}{dt}$$

(Il y a N_1 tours de fil pour la bobine primaire). On a donc

$$\frac{d\phi}{dt} = -\frac{\Delta v_1}{N_1} \qquad \text{et} \qquad \frac{d\phi}{dt} = -\frac{\Delta v_2}{N_2}$$

Ce qui nous amène à

$$-\frac{\Delta v_1}{N_1} = -\frac{\Delta v_2}{N_2}$$

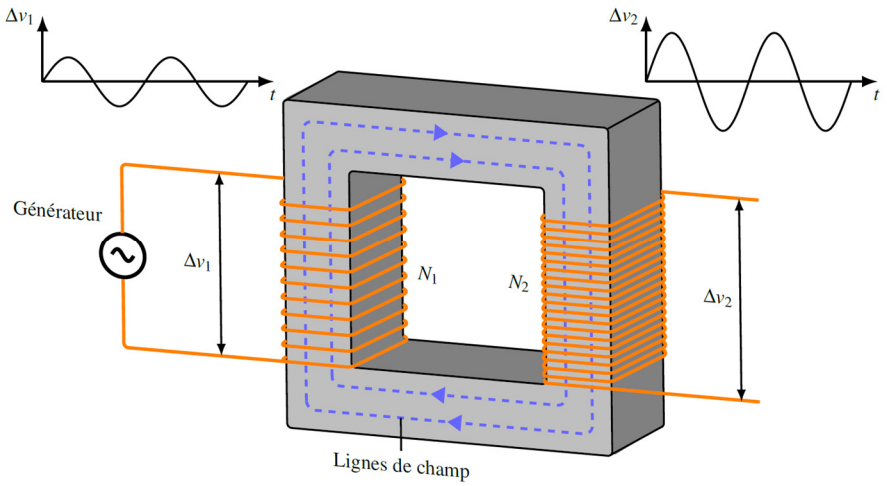
Cette équation est vraie à tout instant, incluant le moment où on atteint les valeurs maximales de la différence de potentiel. On a alors les formules suivantes.

Changement de la différence de potentiel avec un transformateur

$$\Delta v_{02} = \frac{N_2}{N_1} \Delta v_{01}$$

$$\Delta V_2 = \frac{N_2}{N_1} \Delta V_1$$

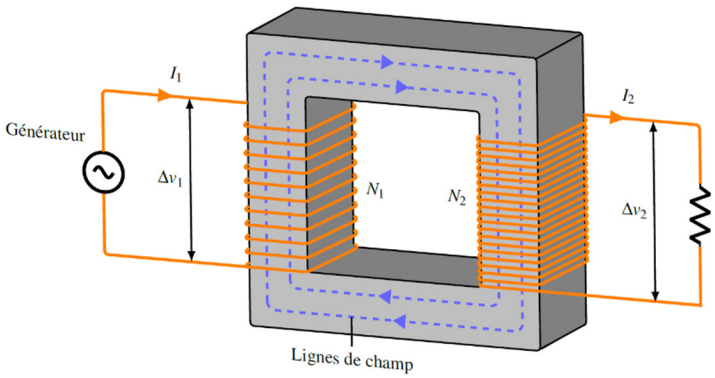
On a obtenu la seconde équation en divisant la première équation par $\sqrt{2}$ pour obtenir la relation entre les valeurs efficaces. On a donc la situation suivante.



C'est donc uniquement le nombre de tours de fils des bobines qui détermine si on va monter ou descendre l'amplitude de la tension avec un transformateur. Si $N_2 > N_1$, l'amplitude de la tension va monter et on a alors un transformateur survolteur. Si $N_2 < N_1$, l'amplitude de la tension va baisser et on a alors un transformateur dévolteur.

On ne peut pas utiliser un transformateur si la tension n'est pas alternative. Si on branche une batterie au transformateur, la différence de potentiel aux bornes de la bobine 1 sera toujours la même et il n'y aura pas de variation de courant, et donc pas de variation de champ magnétique et de flux. Il n'y aura pas donc d'induction et ainsi la différence de potentiel aux bornes de la bobine secondaire sera toujours nulle. De plus, comme il n'y a plus d'induction, seule la résistance du fil 1 pourra faire la différence de potentiel qu'on doit avoir aux bornes de la bobine primaire pour annuler la différence de potentiel de la source. Comme la résistance d'un fil n'est pas très grande, le courant sera très important et on risque alors de faire bruler le transformateur.

Le courant circulant dans le circuit primaire sera aussi différent de celui qui circule dans le circuit secondaire. Supposons donc qu'il y a une résistance branchée sur la bobine secondaire pour former un circuit.



La puissance fournie à la résistance est

$$P = I_2 \Delta V_2$$

(Ce pourrait en fait être n'importe quoi qui est branché au circuit secondaire, car la puissance est toujours $I\Delta V$.) La puissance fournie par le générateur est

$$P = I_1 \Delta V_1$$

Si on suppose qu'il ne se perd pas d'énergie dans le transformateur (en fait, il se perd à peu près 1 % de l'énergie dans un transformateur), les puissances devraient être les mêmes et on a alors

$$I_1 \Delta V_1 = I_2 \Delta V_2$$

$$I_2 = \frac{\Delta V_1}{\Delta V_2} I_1$$

$$I_2 = \frac{\Delta V_1}{\frac{N_2}{N_1} \Delta V_1} I_1$$

Ce qui nous donne

Changement de courant avec un transformateur

$$i_{02} = \frac{N_1}{N_2} i_{01}$$

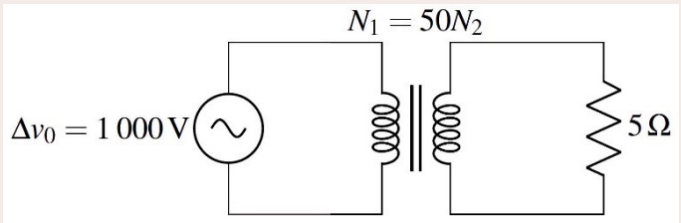
$$I_2 = \frac{N_1}{N_2} I_1$$

On a obtenu la première équation en multipliant la deuxième équation par $\sqrt{2}$ pour obtenir la relation entre les amplitudes.

Terminons en vous montrant le symbole du transformateur pour le représenter dans les circuits. Il existe quelques variantes, en voici 2.

Exemple 9.2.1

Un générateur fournissant une différence de potentiel alternative ayant une tension dont l'amplitude est de 1000 V est branché à la bobine primaire d'un générateur. On branche ensuite une résistance de 5 Ω à la bobine secondaire. Dans le transformateur, la bobine primaire a 50 fois plus de tours de fils que la bobine secondaire.



a) Quelle est l'amplitude de la différence de potentiel aux bornes de la bobine secondaire ?

On doit donc avoir

$$\begin{aligned}\Delta v_{02} &= \frac{N_2}{N_1}\Delta v_{01} \\ &= \frac{N_2}{50N_2}\cdot 1000V \\ &= 20V\end{aligned}$$

b) Quelle est l'amplitude du courant dans le circuit secondaire ?

L'amplitude de la différence de potentiel aux bornes de la résistance est la même que celle aux bornes de la bobine secondaire. Le courant dans le circuit secondaire est donc

$$\begin{aligned}i_{02} &= \frac{\Delta v_{02}}{R} \\ &= \frac{20V}{5\Omega} \\ &= 4A\end{aligned}$$

c) Quelle est l'amplitude du courant dans la bobine primaire ?

L'amplitude du courant est

$$\begin{aligned}i_{02} &= \frac{N_1}{N_2}i_{01} \\ 4A &= \frac{50N_2}{N_2}\cdot i_{01} \\ i_{01} &= 0,08A\end{aligned}$$

9.3 LE RÉSEAU ÉLECTRIQUE

Pourquoi utilise-t-on du courant alternatif ?

Dans les réseaux électriques, on utilise du courant alternatif, mais on pourrait très bien utiliser aussi le courant continu.

On installa les premiers réseaux électriques peu après l'invention de la première ampoule électrique fiable en 1879 par Edison. Le réseau implanté à New York par Edison utilisait un courant continu alors que le réseau développé par George Westinghouse utilisait un

courant alternatif. Edison s'opposait au courant alternatif, car celui-ci est plus dangereux. En effet, les courants alternatifs ont des effets plus importants sur les muscles que les courants continus, ce qui augmente les dangers de mort par électrocution, spécialement si le courant passe par le cœur. Voici d'ailleurs un tableau montrant les différences entre les deux types de courants.

	Courant continu	Courant alternatif
Seuil de tétanisation (les muscles restent contractés pour 95 % des gens)	300 mA	10 à 40 mA
Seuil de fibrillation pour le cœur (pour 95 % des gens)	150 mA (si dure plus de 2 s)	30 mA (si dure plus de 1 s)

On voit que les effets se produisent avec des courants plus faibles en courant alternatif. D'ailleurs, Edison suggéra fortement à l'état de New York, qui cherchait un moyen plus civilisé que la pendaison pour exécuter les criminels, d'utiliser une chaise électrique fonctionnant avec du courant alternatif pour illustrer à quel point le courant alternatif pouvait être dangereux. Toutefois, les avantages du courant alternatif sont indéniables. Les principaux avantages sont, en ordre d'importance :

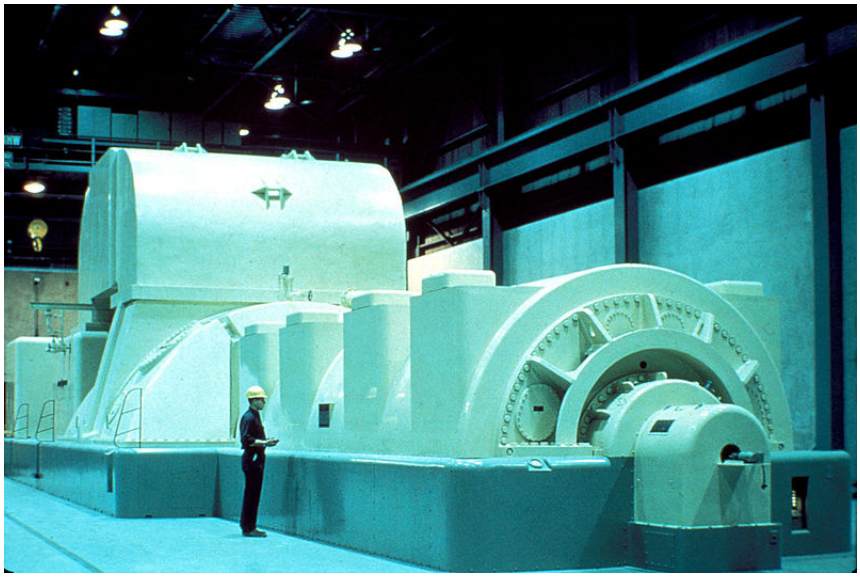
1) On peut facilement changer l'amplitude de la différence de potentiel avec un transformateur. Les transformateurs ne fonctionnent pas avec du courant continu et il est donc beaucoup plus difficile de changer la tension du courant continu. Avec de petits réseaux, il était inutile de changer la tension, mais avec de grandes lignes de transport, il est essentiel d'utiliser une tension la plus élevée possible pour le transport (on verra pourquoi un peu plus loin).

2) Les générateurs produisent déjà une différence de potentiel alternative. On n'a donc pas à le transformer en courant continu comme on doit le faire si on veut utiliser un réseau en courant continu. Cela élimine l'appareil nécessaire pour faire la transformation.

La production

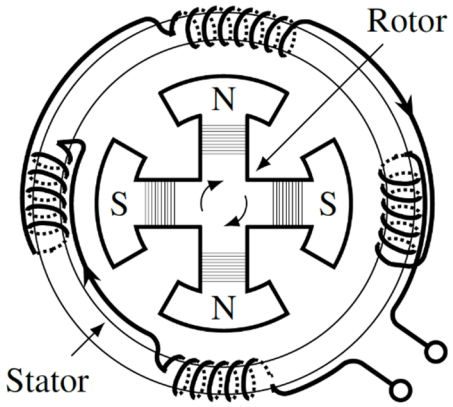
Presque toutes les centrales produisent de l'électricité avec des générateurs (la seule exception étant les panneaux solaires). La seule chose qui change, c'est la source d'énergie utilisée pour faire tourner le générateur. Très souvent, on va le faire tourner avec de la vapeur. On peut chauffer cette vapeur avec du charbon (centrale au charbon), du pétrole (centrale au mazout), avec du gaz (centrale au gaz) ou avec une réaction nucléaire (centrale nucléaire). On peut aussi utiliser le vent (éolienne) ou le passage de l'eau (centrale hydroélectrique).

Pour vous donner une idée, les générateurs utilisés à la centrale Robert-Bourassa produisent une différence de potentiel efficace de 13 800 V et une fréquence de 60 Hz (± 0,2 Hz). La puissance maximale que peut fournir un de ces générateurs est de 390 MW. Au-delà de cette valeur, le générateur devient trop difficile à faire tourner.

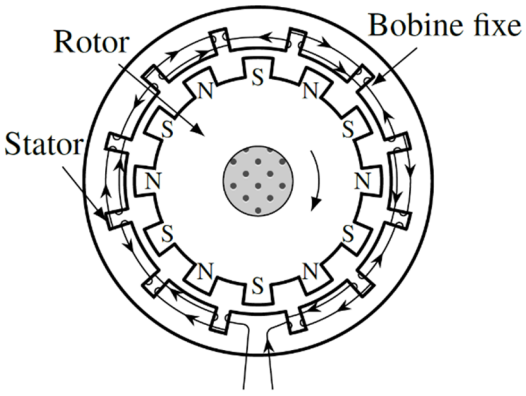


en.wikipedia.org/wiki/Electric_generator

De plus, tous les générateurs de tout le Québec doivent être synchronisés, ce qui veut dire qu'ils doivent tous arriver au maximum de la tension en même temps. Cela est très important, car un générateur déphasé par rapport aux autres pourrait recevoir du courant, ce qui le transformerait en moteur. Si, par exemple, c'est une éolienne, elle deviendrait alors un gros ventilateur. Elle consommerait alors de l'énergie plutôt que d'en produire.

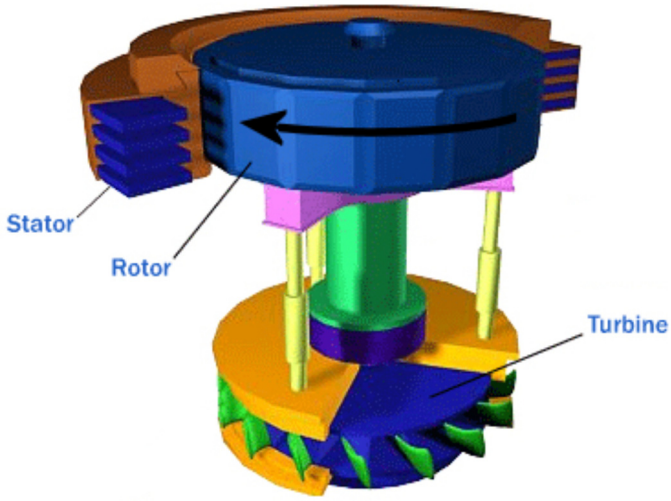


Les générateurs sont en fait des alternateurs, ce qui signifie que ce sont les aimants qui tournent (rotor) alors que les boucles de fil restent immobiles (stator).



Généralement, il y a beaucoup de pôles magnétiques. Le générateur ressemble plus à ce qu'on peut voir sur l'image de gauche.

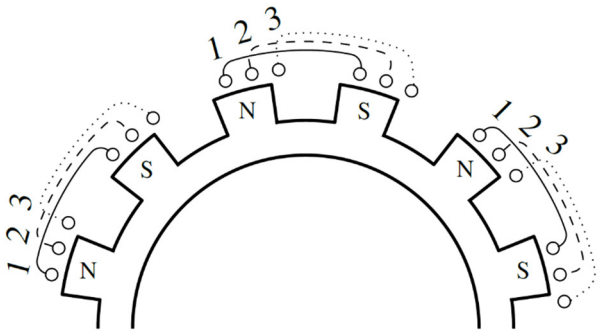
Le rotor est fixé à la turbine, où la force s'applique pour le faire tourner.



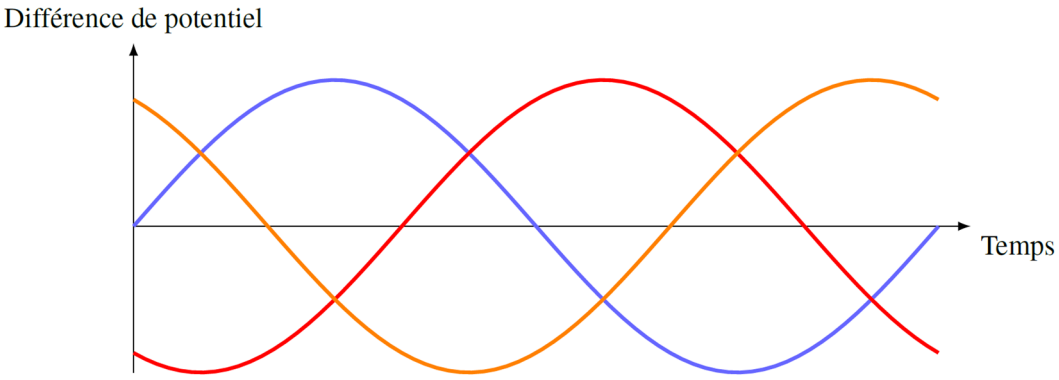
www.emt-india.net/process/power_plants/Hydro_power.htm

À la centrale Robert-Bourassa, la partie tournante du générateur (rotor et turbine) pèse 600 tonnes.

De plus, il y a trois séries de bobines dans un générateur. Chaque série de bobines est légèrement décalée par rapport à la précédente. Sur l'image suivante, on montre les trois séries de bobines (1, 2, 3) dans le stator (chaque bobine est un simple anneau sur cette figure. On voit ces anneaux de côté, ce qui veut dire qu'on voit un fil qui entre et un fil qui sort de la page pour chaque anneau).



Il y aura une différence de potentiel induite dans chacune de ces séries de bobines, mais les maximums de la différence de potentiel ne sont pas atteints en même temps dans chaque série de bobines. Le potentiel est déphasé de 1/3 de cycles par rapport aux deux autres séries de bobines. On obtient donc 3 différences de potentiel déphasées l'une par rapport à l'autre. C'est ce qu'on appelle le *courant triphasé*.



Nous pouvons voir sur cette figure la différence de potentiel aux bornes des 3 séries de bobines et voir qu'elles sont déphasées de 1/3 de cycle l'un par rapport aux autres.

Il y a deux avantages majeurs à utiliser un système à trois phases.

1) On utilise les 3 phases pour équilibrer la force contrélectromotrice sur le générateur. Avec une seule phase, le moment de force varierait trop durant un tour, ce qui entrainerait des vibrations pouvant aller jusqu'à détruire le générateur.

2) Les moteurs électriques fonctionnant avec un courant triphasé sont très efficaces.

Les alternateurs d'avions sont souvent des dispositifs triphasés.

Le transport

On va ensuite transporter l'électricité. Pour y arriver sans trop perdre d'énergie, on va premièrement monter la différence de potentiel au maximum. On fait cela pour diminuer les pertes d'énergie dans les fils. En effet, comme la puissance fournie est

$$P = \Delta V \cdot I$$

on va diminuer le courant dans les fils si on augmente la différence de potentiel. Les pertes dues à la résistance des fils.

$$P = RI^2$$

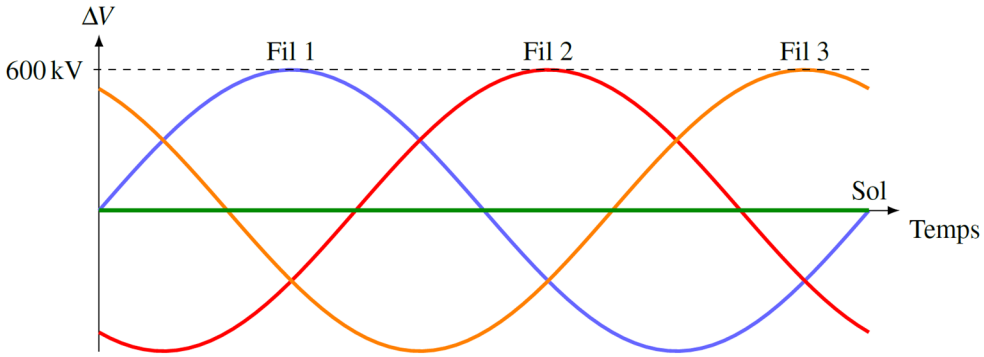
sont alors diminuées. Évidemment, on ne peut pas trop monter cette différence de potentiel, car le champ électrique fait par les fils pourrait devenir trop grand, ce qui ionisera l'air et entrainerait la production d'éclairs entre le fil et le sol ou entre les fils de transport, ce qui entrainerait des pertes d'énergie encore plus grande. Au Québec, on augmente l'amplitude de la différence de potentiel jusqu'à 600 000 V sur les grandes lignes de transport ce qui veut dire que la tension efficace est de 424 000 V.

Il y a trois fils principaux dans la ligne de transport, soit un fil pour chaque phase du courant triphasé.

(Les deux fils complètement en haut des pylônes sont des fils de protections contre la foudre.)

ants.asso-web.com/uploaded/colloquebourges/pleiniere23mai/ants-rayonnements-non-ionisants-v6.pdf

Le graphique suivant vous montre la différence de potentiel qu'il y a entre le sol et chacun de ces fils en fonction du temps.



On dit souvent que les grandes lignes d'Hydro-Québec sont des lignes à 735 000 V. Pourtant, l'amplitude est de 600 000 V sur chacun des fils. Pourquoi cette différence ? Disons en partant qu'on utilise les valeurs efficaces, mais il y a quelque chose de plus.

En fait, ce 735 000 V est la valeur efficace de la différence de potentiel entre deux fils du courant triphasé. C'est un peu plus que l'amplitude d'un seul fil parce que la soustraction de deux sinus déphasés d'un tiers de cycle donne un autre sinus donc l'amplitude est $\sqrt{3}$ fois plus grande. L'amplitude de différence entre 2 fils est donc

$$\Delta v_0 = \sqrt{3} \cdot 600kV = 1039kV$$

et la valeur efficace de cette valeur est

$$\Delta V = \frac{\Delta v_0}{\sqrt{2}} = \frac{1039kV}{\sqrt{2}} = 735kV$$

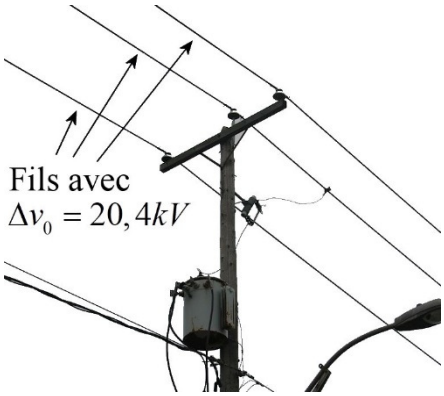
La valeur donnée par Hydro-Québec est donc la valeur efficace de la différence de potentiel entre deux fils du courant triphasé.

En arrivant en zone urbaine, on va baisser la tension de chaque fil pour que l'amplitude soit de 98 kV. Cela se fait avec des transformateurs regroupés dans des postes abaisseurs autour de la ville (image de gauche).

On appelle ces lignes des lignes à 69,3 kV/120 kV. Cela signifie que la valeur efficace de tension sur un fil est de 69,3 kV (98 kV/$\sqrt{2}$) et que la valeur efficace de la différence de potentiel entre deux fils du courant triphasé est de 120 kV. Le deuxième chiffre est toujours le premier multiplié par $\sqrt{3}$.

fr.wikipedia.org/wiki/Poste_électrique

On arrive ensuite au poste de distribution, qui est un autre poste abaisseur. L'amplitude du potentiel sur chaque fil du courant triphasé sera alors abaissée à 20,4 kV. C'est donc une ligne à 14,4 kV/25 kV. C'est cette tension qu'il y a dans les trois fils complètement en haut des poteaux de rue.

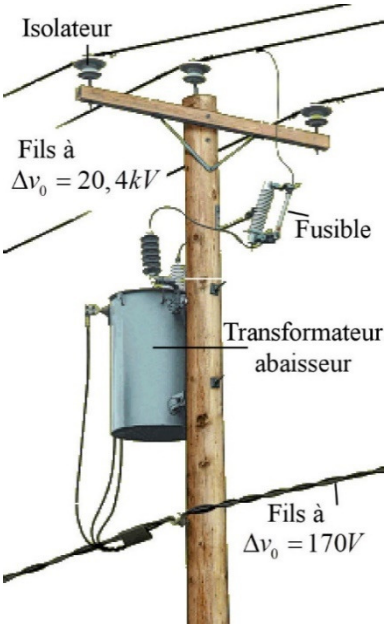


L'arrivée à la maison

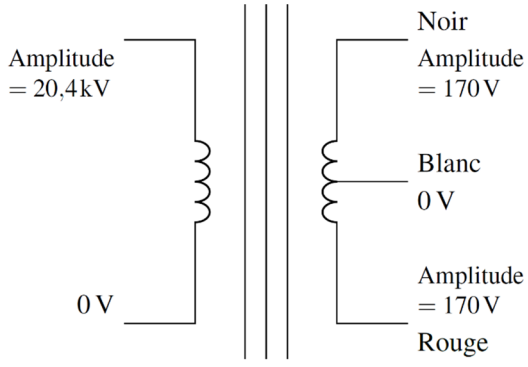
On va ensuite baisser encore la tension pour entrer les fils dans votre maison. On se branche alors à une des trois phases (ils changent de phase à chaque branchement). Il n'y a donc qu'une des trois phases du courant triphasé qui entre chez vous, et ce n'est pas nécessairement la même phase qu'il y a dans la maison de votre voisin.

À l'aide du transformateur, on abaisse la tension pour que l'amplitude de la tension ne soit plus que de 170 V, ce qui signifie que la valeur efficace de la tension est de 120 V. Le transformateur est le cylindre gris attaché au poteau.

Parfois, il y a un autre fil en bas des fils à 120 V. Ce sont simplement les fils du téléphone et du câble. Tous les fils en bas du transformateur ne sont pas vraiment dangereux, surtout qu'il y a une gaine de plastique par-dessus les fils à 120 V. Par contre, les fils en haut du poteau (il peut y en avoir 1, 2 ou 3) sont très dangereux. La tension efficace de ces fils est de 14 400 V et ils ne sont pas recouverts d'une gaine. Ne touchez surtout pas à ces fils avec quelque chose de métallique.

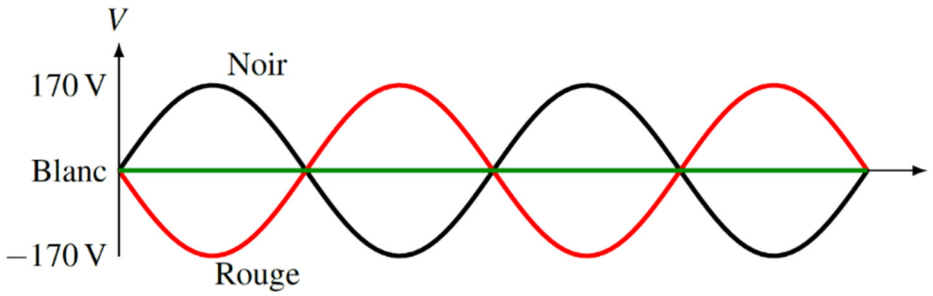


www.hydroquebec.com/comprendre/distribution/voie-aerienne.html

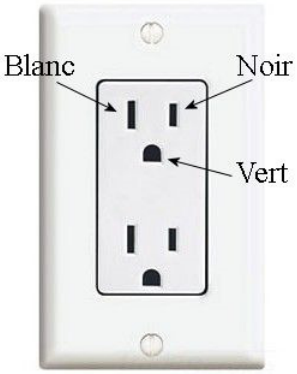


Il y a deux fils qui entrent dans le transformateur. Un de ces fils est mis à la terre et est à 0 V et l'autre a une tension alternative ayant une amplitude de 20,4 kV. Toutefois, il y a 3 fils qui sortent du transformateur. Une mise à la terre est connectée au milieu de la bobine secondaire. Ce fil est donc toujours à 0 V et il y aura un potentiel alternatif sur chacun des deux autres fils. Chacun de ces fils doit être d'une couleur très précise (indiquée sur la figure).

Les potentiels sur ces fils sont donc

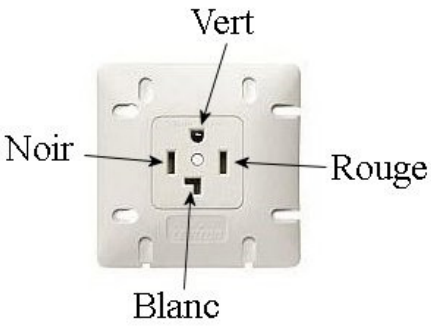


Ces trois fils, auxquels on ajoute un quatrième fil vert qui est aussi toujours à 0 V, entrent dans votre maison (on reviendra plus loin sur ce fil vert).
Dans les prises de courant, on entre en contact avec un de ces fils dans chacun des trous de la prise. Les contacts sont illustrés sur la figure.



Quand on branche l'appareil, il y a une différence de potentiel alternative entre les fils noir et blanc et c'est ce qui fait fonctionner l'appareil.

Mais à quoi sert alors le fil rouge qui est entré chez vous ? Il va servir à faire fonctionner le four et la sécheuse. Vous n'avez peut-être pas remarqué, mais la prise pour brancher ces appareils est différente. Il y a quatre trous, un pour chacun des fils entrés dans la maison.

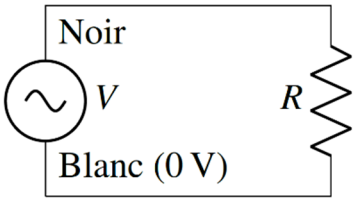


Les éléments chauffants du four et de la sécheuse sont branchés sur les fils rouge et noir. La différence de potentiel entre ces deux fils est une tension dont l'amplitude est de 340 V, car le fil noir atteint son maximum à 170 V quand le fil rouge est à -170 V. On a donc une tension efficace de 240 V. La tension est donc plus grande, ce qui permet de générer davantage de chaleur. Par contre, d'autres composantes du four, comme l'horloge, ne nécessitent pas une différence de potentiel si grande. On les branche donc sur les fils noir et blanc.

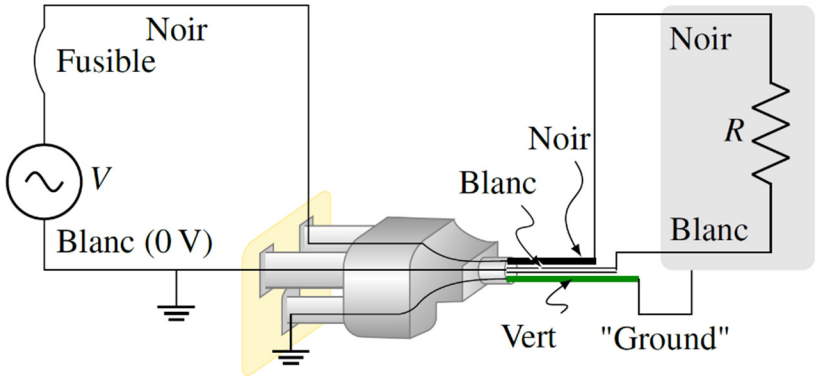
Pour certaines installations commerciales ou industrielles, l'utilisation de moteurs électriques ou d'autres appareils nécessite l'utilisation des trois phases de tension produite par Hydro-Québec. On remarquera alors que chacun des trois fils en haut des poteaux est relié à un transformateur pour ensuite aller à l'entreprise. Les trois phases peuvent avoir chacune une amplitude de 170 V (circuit à 120 V/208 V) ou une amplitude de 490 V (circuit à 347 V/600 V).

Quelques mesures de protection

Dans la maison, on branche les appareils pour les faire fonctionner. On pourrait croire que le branchement est représenté par ce simple circuit, mais ce n'est pas le cas.



En fait, il y a toute une série de mesures de sécurité dans les circuits de votre maison. En réalité, le circuit ressemble davantage à ceci.



On voit les fils noir et blanc branchés aux bornes de la résistance qui font fonctionner l'appareil. Le fil blanc est relié à la terre pour être certain qu'il soit toujours à 0 V.

Il y a premièrement un fusible (ou un disjoncteur) sur ce circuit. Si, pour une raison quelconque, le courant dans ce circuit devenait trop grand, le fusible va couper le circuit et tout va s'arrêter. La présence de ce fusible est essentielle parce qu'un courant important génère beaucoup de chaleur et peut déclencher des incendies.

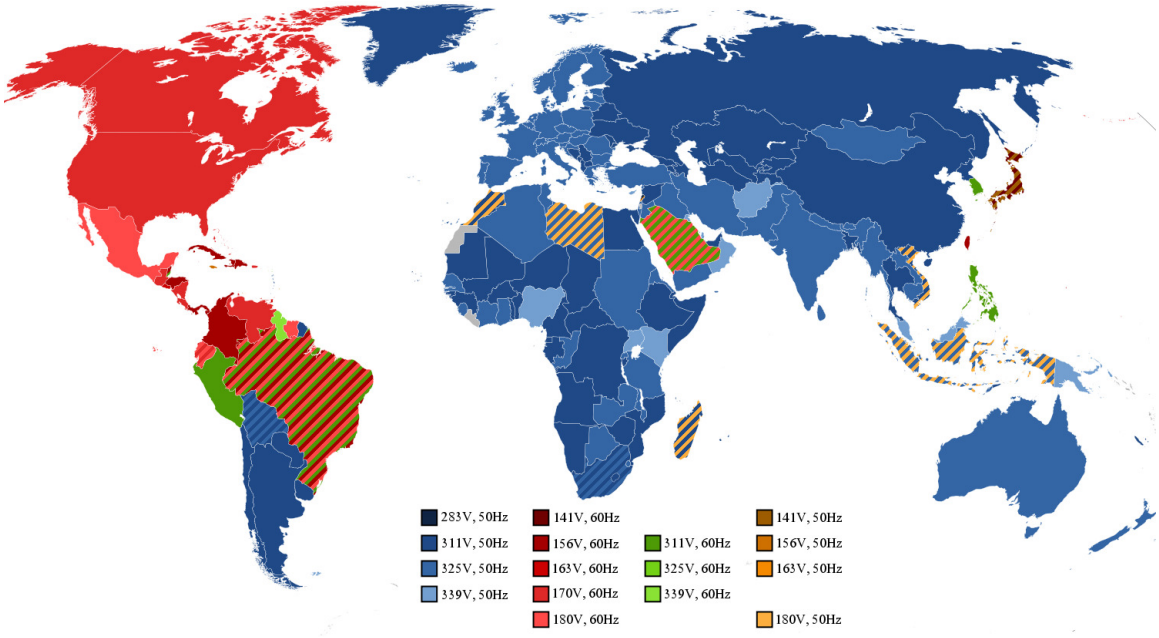
Il y a ensuite une mise à la terre (fil vert). Le fil vert ne sert pas à faire fonctionner l'appareil. C'est simplement une mise à la terre reliée au boitier de l'appareil. Si pour une raison quelconque le fil noir (qui est le fil où le potentiel monte et descend) se dénude et entre en contact avec le boitier, le boitier de l'appareil sera sous tension s'il n'y a pas de fil vert. Si on touche alors au boitier, on peut recevoir un choc important. S'il y a un fil vert, le courant va passer dans le fil vert, plutôt que dans le corps d'un utilisateur qui toucherait au boitier. En fait, cela va probablement générer un courant assez important pour que le fusible coupe le courant.

Si vous faites de petits travaux électriques dans la maison, comme poser une lampe au plafond, vous verrez 3 fils. Il y a un fil noir, un fil blanc et un fil vert. Le blanc et le vert sont inoffensifs parce qu'ils sont toujours à 0 V (à moins que ce soit votre beau-frère qui ait fait votre réseau électrique et qu'il ne connaissait pas la convention des couleurs des fils). Méfiez-vous cependant du fil noir, car c'est lui qui a un potentiel efficace de 120 V. Normalement, l'interrupteur de la lampe est sur le fil noir. En ouvrant l'interrupteur (attention : quand l'interrupteur est ouvert, la lampe est éteinte et quand l'interrupteur est fermé, la lampe est allumée), il n'y aura plus de potentiel sur le fil noir dans le trou du plafond et il n'y a plus de danger, à moins que votre beau-frère ait fait votre réseau

électrique et qu'il ait installé l'interrupteur sur le fil blanc… Dans ce cas, le fil noir aura toujours son potentiel. Pour plus de sécurité, fermez donc le fusible de ce circuit pour déconnecter le fil noir du réseau d'Hydro-Québec. (Normalement, votre beau-frère n'aurait pas tenté d'installer la boite à fusibles lui-même à moins d'être vraiment débile. Ce travail est normalement fait par un électricien qualifié.) Vous pouvez alors procéder en toute sécurité.

Différence selon les pays

L'amplitude de la différence de potentiel et la fréquence du courant alternatif ne sont pas les mêmes partout dans le monde. Aux États-Unis et au Canada, l'amplitude de la différence de potentiel (Δv_0) est de 170 V et la fréquence est de 60 Hz. En Europe, l'amplitude est de 339 V et la fréquence est de 50 Hz. La carte suivante vous montre les différentes possibilités selon les pays.



fr.wikipedia.org/wiki/Fréquences_des_courants_industriels

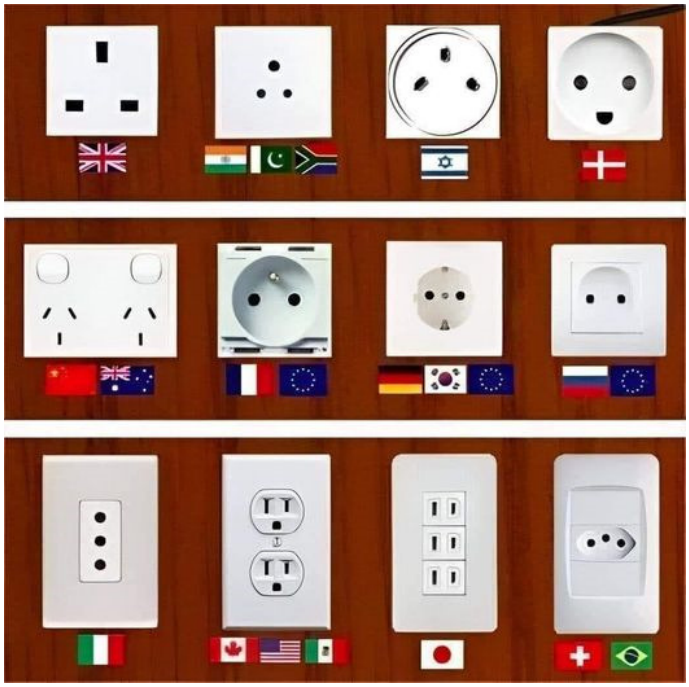
Les pays hachurés (comme le Brésil) ont même des réseaux d'amplitudes différentes selon la région du pays.

Tout cela n'est qu'une question de convention. Quand on construisit les premiers réseaux électriques, les fréquences et les amplitudes étaient très différentes. À mesure que ces réseaux grandissaient, on devait les relier et il devenait essentiel d'uniformiser les amplitudes et les fréquences. On fit alors des conventions régionales.

Pour l'amplitude, il ne faut pas que l'amplitude soit trop grande (pour éviter que les gens meurent en s'électrocutant sur un fil dans leur maison) ou trop basse (les courants devraient alors être très grands pour fournir assez d'énergie, ce qui occasionnerait beaucoup de production de chaleur dans les fils). Quelques centaines de volts semblent un bon choix.

La fréquence ne doit pas être trop basse, car alors on verrait le changement d'intensité dans nos lumières puisque le courant change continuellement dans un courant alternatif. Un des premiers réseaux à New York fonctionnait à 25 Hz et certaines personnes pouvaient percevoir une certaine variation dans l'intensité de lumière, ce qui n'était pas très agréable, semble-t-il. Au-delà de 40 Hz, le changement se fait trop rapidement pour qu'on puisse le détecter. La fréquence ne doit pas être trop grande non plus. Plus la fréquence est grande, plus le courant se concentre en surface du fil. Cet effet est appelé l'*effet de peau* (*skin effect*). Cette concentration en surface fait en sorte que le courant utilise seulement une partie du diamètre du fil et cela augmente la résistance des fils. On doit donc utiliser une fréquence assez basse si on veut transporter l'électricité sur de grandes distances. On va donc choisir la fréquence la plus basse possible sans s'approcher trop de 40 Hz. Une fréquence de 50 ou 60 Hz semble donc être un bon choix.

Les appareils électriques que vous utilisez sont conçus pour fonctionner avec une certaine tension et une certaine fréquence. N'apportez pas votre téléviseur en Europe puisqu'il est fait pour fonctionner avec une tension efficace de 120 V, alors que la tension efficace en Europe est de 240 V. Il ne survivra pas à cette tension plus élevée. De toute façon, vous ne pourrez même pas la brancher parce que la prise dans le mur est différente. Voici à quoi ressemblent les prises dans différents pays. Les prises sont différentes justement pour éviter de brancher des appareils conçus pour fonctionner avec une tension différente.



Comment la production s'ajuste-t-elle à la demande ?

La production d'électricité s'ajuste automatiquement à la demande. Inutile de produire plus d'énergie, car c'est impossible d'emmagasiner l'énergie produite. On pourrait toujours le faire en transformant le courant alternatif en courant continu pour ensuite emmagasiner le

tout dans des piles rechargeables, mais les piles n'emmagasinent pas assez d'énergie pour que cela soit utile.

La production s'ajuste en vérifiant le rythme de rotation des générateurs. Ce rythme est important, car tous les générateurs doivent rester synchronisés pour fournir un courant alternatif d'une fréquence de 60 Hz.

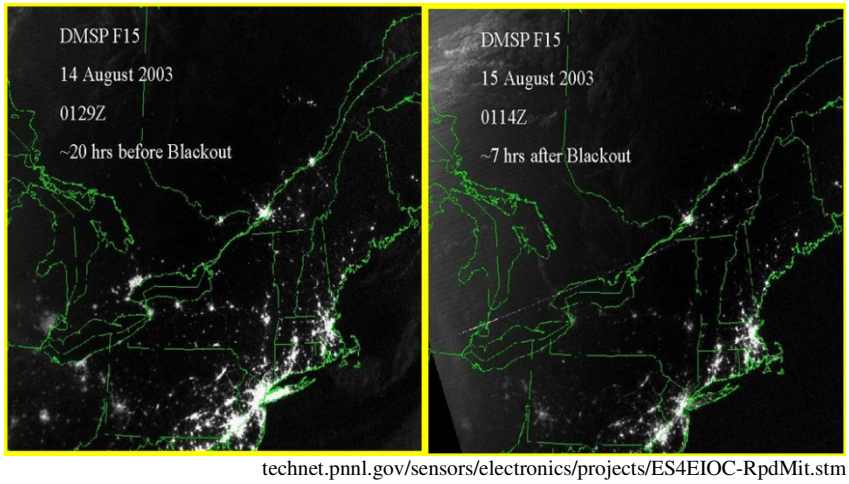
Si la demande devient très grande, les générateurs fourniront beaucoup de courant et deviendront plus difficiles à faire tourner, car le champ magnétique fait une force sur les courants dans les fils du générateur qui s'oppose à la rotation (la force contrélectromotrice). Si on ne fait rien, cette force plus grande va ralentir la rotation du générateur et la fréquence ne sera plus de 60 Hz. Pour éviter cela, on surveille minutieusement la vitesse de rotation du générateur. Si la demande augmente, la vitesse de rotation va commencer à diminuer, et on va compenser cela en augmentant la force qui fait tourner la turbine. Par exemple, dans une centrale hydroélectrique, on va augmenter le débit de l'eau passant dans la turbine pour augmenter la force qui fait tourner le générateur. Tout cela se fait automatiquement en quelques dizaines de secondes.

Si la demande baisse, le courant fourni va diminuer et le générateur sera plus facile à faire tourner puisque la force magnétique sur les courants dans le générateur va diminuer. Le générateur va donc commencer à tourner plus vite et on va compenser cela en diminuant la force qui fait tourner le générateur. Dans une centrale hydroélectrique, cela se fait en diminuant le débit d'eau arrivant à la turbine. On pourrait même carrément arrêter le générateur si on sait que la demande sera faible pour une longue période. Inutile donc de vous demander ce qu'on fait avec l'électricité produite quand la demande diminue : elle n'est tout simplement pas produite.

Ces ajustements ont cependant une limite si la consommation devient trop grande. Il y a toujours une force maximale qu'une turbine peut exercer pour faire tourner le générateur. Quand les vannes sont ouvertes au maximum dans une centrale hydroélectrique et que le débit d'eau est maximum, on ne pourrait plus compenser si la demande augmente encore plus, à moins d'avoir d'autres générateurs prêts à entrer en service. Si on est au maximum et que la demande augmente encore, la force contrélectromotrice va augmenter et la turbine va commencer à tourner moins vite. Comme on ne peut plus compenser en augmentant la force, le générateur ralentit toujours et commence à fournir du courant avec une fréquence inférieure à 60 Hz. Les écarts tolérés n'étant que de 0,2 Hz, le générateur va automatiquement se déconnecter du réseau si la fréquence devient trop basse. On fait cela pour éviter que le générateur se désynchronise et commence à agir comme un moteur en recevant du courant des autres générateurs.

Parfois, cela peut entrainer une réaction en chaine. Quand un générateur se déconnecte du réseau, les autres générateurs doivent compenser la perte de ce générateur. Les autres générateurs devront fournir plus de courant pour compenser cette perte. Peut-être que cette augmentation va dépasser les limites d'un autre générateur et entrainer sa déconnexion du réseau. Les autres générateurs devront alors aussi compenser la perte de cet autre générateur en fournissant encore plus de courant, ce qui peut entrainer la déconnexion

d'autres générateurs et ainsi de suite. Tous les générateurs du réseau vont alors se déconnecter du réseau dans une vaste réaction en chaine. C'est ce qui s'est produit dans l'est de l'Amérique le 10 novembre 1965 et le 14 aout 2003. (L'image vous montre l'étendue de la panne du 14 aout 2003 qui affecta 55 millions de personnes.)



technet.pnnl.gov/sensors/electronics/projects/ES4EIOC-RpdMit.stm

Remarquez comme le Québec n'est pas affecté puisqu'il n'est pas relié directement au réseau qui s'est effondré.

Pour éviter une telle situation, on peut acheter de l'électricité des réseaux voisins, ou on peut simplement débrancher une partie de la population pour diminuer la demande et ainsi éviter de perdre le réseau au complet. Ce débranchement d'une partie de la population est courant dans certains pays du tiers monde.

Cout de l'électricité

Vous trouvez peut-être que l'électricité coute cher au Québec. Écoutez le commentaire de Stéphane Durand (2 min 47 s) et vous changerez probablement d'avis.
https://stephane-durand.ca/carnet-insolite/vous-trouvez-que-lelectricite-coute-cher/

En 2023, le prix moyen de l'électricité résidentielle au Québec était de 7,81 ¢/kWh. Elle est très peu chère quand on compare le cout au Québec avec le cout de l'électricité ailleurs dans le monde. Ailleurs au Canada, les prix varient entre 10,24 ¢/kWh (Winnipeg) et 29,80 ¢/kWh (Calgary). La table suivante donne le prix moyen de l'électricité résidentielle pour quelques pays en 2023.

Région	Cout (¢/kWh)	Région	Cout (¢/kWh)
Iran	0,3	États-Unis	22,2
Égypte	2,3	Japon	29,6
Russie	8,1	France	39,0
Chine	10,5	Royaume-Uni	55,0
Mexique	14,0	Allemagne	55,5
Norvège	19,4	Italie	63,0

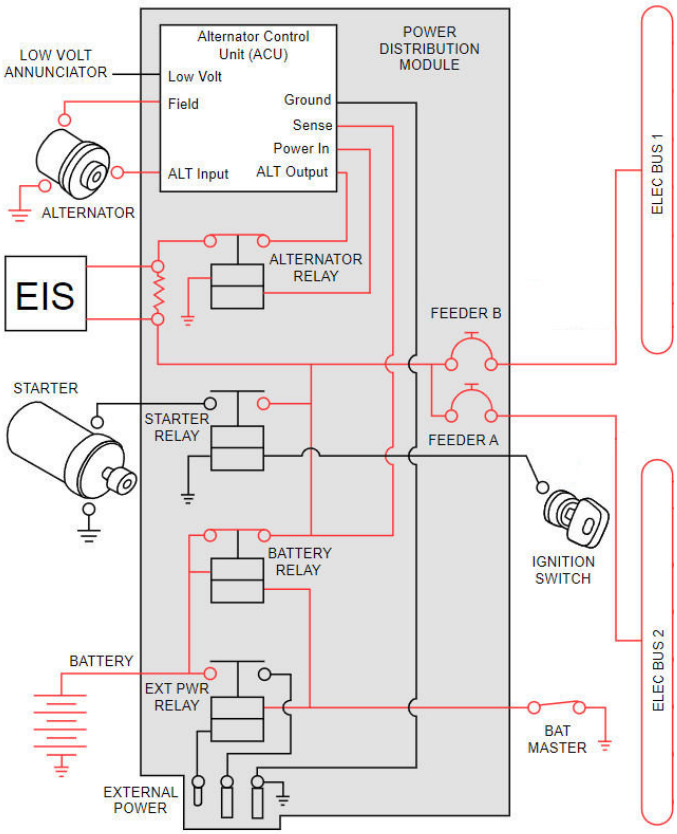
Source : fr.globalpetrolprices.com/electricity_prices/#hl228

9.4 LE CIRCUIT ÉLECTRIQUE D'UN AVION

Examinons maintenant comment est distribuée l'électricité dans un avion.

Cessna 172S

Nous allons commencer par le Cessna 172S. Voici un schéma montrant une partie du circuit électrique de cet avion.



On voit premièrement l'alternateur qui produit un courant alternatif. Ce courant est ensuite transformé en courant continu ayant une différence de potentiel de 28 V et une intensité maximale de 60 A par transformateurs qui changent la différence de potentiel et transforment le courant alternatif en courant continu à l'aide de diodes et de condensateurs (ce sont les transformateurs redresseurs).

Le ACU (*alternator control unit*) s'assure de garder la tension constante en ajustant le courant dans les bobines de fil qui génèrent le champ magnétique dans l'alternateur (*field*). L'alternateur va ensuite fournir du courant à tout l'appareil et à la batterie quand l'appareil est en marche (tous les fils en rouge sont alimentés par l'alternateur.)

Le schéma montre qu'on peut activer le démarreur avec un relai contrôlé par la clé de contact.

Les informations électriques dans le EIS (*engine indication system*) dans le cockpit. Cela permet de voir les courants et les voltages à différents endroits dans le circuit. Par exemple, cela permet de s'assurer que la tension de l'alternateur reste entre 24,5 V et 32 V.

Tout le système pourrait aussi être alimenté par le courant fourni par l'aéroport (*external power*). Le relai *ext pwr relay* s'active automatiquement quand on branche le courant externe.

L'alternateur charge également la batterie.

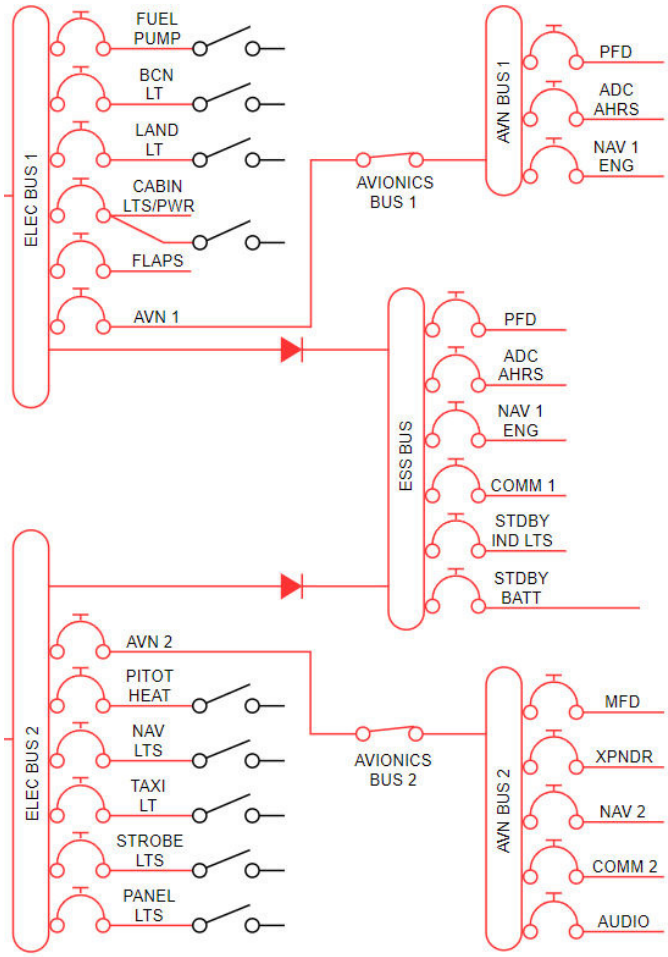
Essentiellement, le générateur fourni le courant à 2 bus primaires (*elec bus 1* et *elec bus 2*). Les bus sont comme des panneaux de distribution sur lesquels sont branchés une multitude d'instruments et d'appareils ainsi que d'autres bus.

La figure suivante montre les bus et les équipements branchés à chaque bus.

Les instruments nécessaires à la navigation sont reliés aux bus avioniques (*avn bus 1* et *2*). On peut déconnecter ces 2 bus à l'aide d'un interrupteur.

Les interrupteurs doivent être mis à *off* pendant le démarrage du moteur pour protéger ces instruments des variations de différence de potentiel qui peuvent se produire à ce moment.

On voit que le bus essentiel (*ess bus*) peut être alimenté à partir des bus électriques 1 ou 2. Ainsi, en cas de problème avec un des bus, ces instruments restent toujours alimentés. Les diodes empêchent le courant de passer d'un bus électrique à l'autre.



Chaque instrument est connecté au bus par un disjoncteur à poussoir. Tous ces disjoncteurs se retrouvent sur un panneau qui ressemble à ce qu'on peut voir sur cette image.

La valeur indiquée sur le disjoncteur correspond au nombre maximum d'ampères permis dans le fil du circuit. Si le courant dépasse cette valeur, le disjoncteur coupe l'alimentation et le bouton sort du panneau. On peut réactiver le circuit en repoussant sur le bouton du disjoncteur, mais il ne faut pas le repousser à nouveau si le disjoncteur saute immédiatement après l'avoir repoussé une première fois.

En cas de problème avec l'alternateur, on peut alimenter tout le circuit avec la batterie. La batterie fournit une tension de 24 V. On peut alimenter le circuit par la batterie uniquement en plaçant l'interrupteur *Master alt* à *off* tout en gardant le *bat* à *on*. En mode normal, les deux côtés de cet interrupteur *master* sont à *on*.

En cas de problème avec l'alternateur, il faut se poser le plus rapidement possible parce que la batterie pourra fournir du courant pendant 30 à 45 minutes. On peut essayer de fermer le plus d'instruments possible pour augmenter la durée de la batterie. Il semble que certains modèles sont équipés d'une batterie secondaire qui peut, en cas d'urgence, fournir de l'électricité au bus essentiel pendant 30 minutes. L'alimentation par cette batterie est contrôlée par l'interrupteur *stby batt*.

Vous pouvez vous amuser avec ce circuit sur le site suivant (d'où proviennent les images utilisées). Il y a un peu plus d'éléments sur le circuit de ce site, mais on retrouve facilement la partie décrite dans ces notes.
https://mediafiles.aero.und.edu/aero.und.edu/aviation/trainers/c172s-electrical-system/

Boeing 737

Examinons maintenant un avion un peu plus gros, le Boeing 737-800. Dans cet avion, deux types de courant sont utilisés.

Il y a premièrement le courant alternatif. Ce courant a une différence de potentiel efficace de 115 V et une fréquence de 400 Hz, soit une fréquence beaucoup plus élevée que celle que l'on retrouve dans les prises de courant des maisons. On utilise cette fréquence très élevée dans les avions parce que les transformateurs et les moteurs conçus pour fonctionner avec une fréquence de 400 Hz sont beaucoup plus compacts et légers que ceux fonctionnant avec des fréquences de 50 ou 60 Hz. Dans les avions plus récents, comme le Airbus A380 et le Boeing 787, on a abandonné la fréquence de 400 Hz pour utiliser une fréquence variable. Comme les alternateurs sont entrainés par les moteurs qui ont une vitesse de rotation variable, on doit installer un équipement assez imposant pour régulariser la vitesse de rotation des alternateurs. Cet équipement est couteux, complexe et peu fiable. Les alternateurs des nouveaux avions sont maintenant entrainés directement par le moteur et la fréquence du courant alternatif fourni par les alternateurs peut varier entre 360 et 800 Hz selon le régime des moteurs.

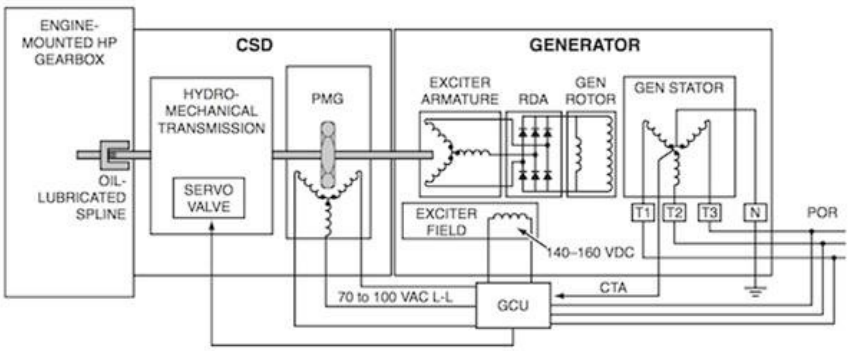
On utilise aussi un courant continu à 28 volts. Ce courant est produit à partir du courant alternatif à l'aide de transformateur redresseur (TR). Si jamais les alternateurs ne

fonctionnent plus, il y a un convertisseur, appelé le convertisseur statique (*static inverter*) qui permet de transformer le courant continu provenant des batteries en courant alternatif. Ainsi, les appareils qui ont absolument besoin de courant alternatif pourront continuer à fonctionner en cas de pannes des alternateurs.

Les générateurs

Quand l'appareil est au sol et que les moteurs sont arrêtés, l'électricité est fournie par l'aéroport via le GPU (*ground power unit*). En vol, ce sont les générateurs qui fournissent l'électricité.

Les générateurs (appelés IDG pour *integrated drive generator*) sont composés d'un générateur (en fait un alternateur) et d'un CSD (*constant speed drive*) dont le rôle est de maintenir la vitesse de rotation de l'alternateur constante pour fournir une fréquence constante de 400 Hz.



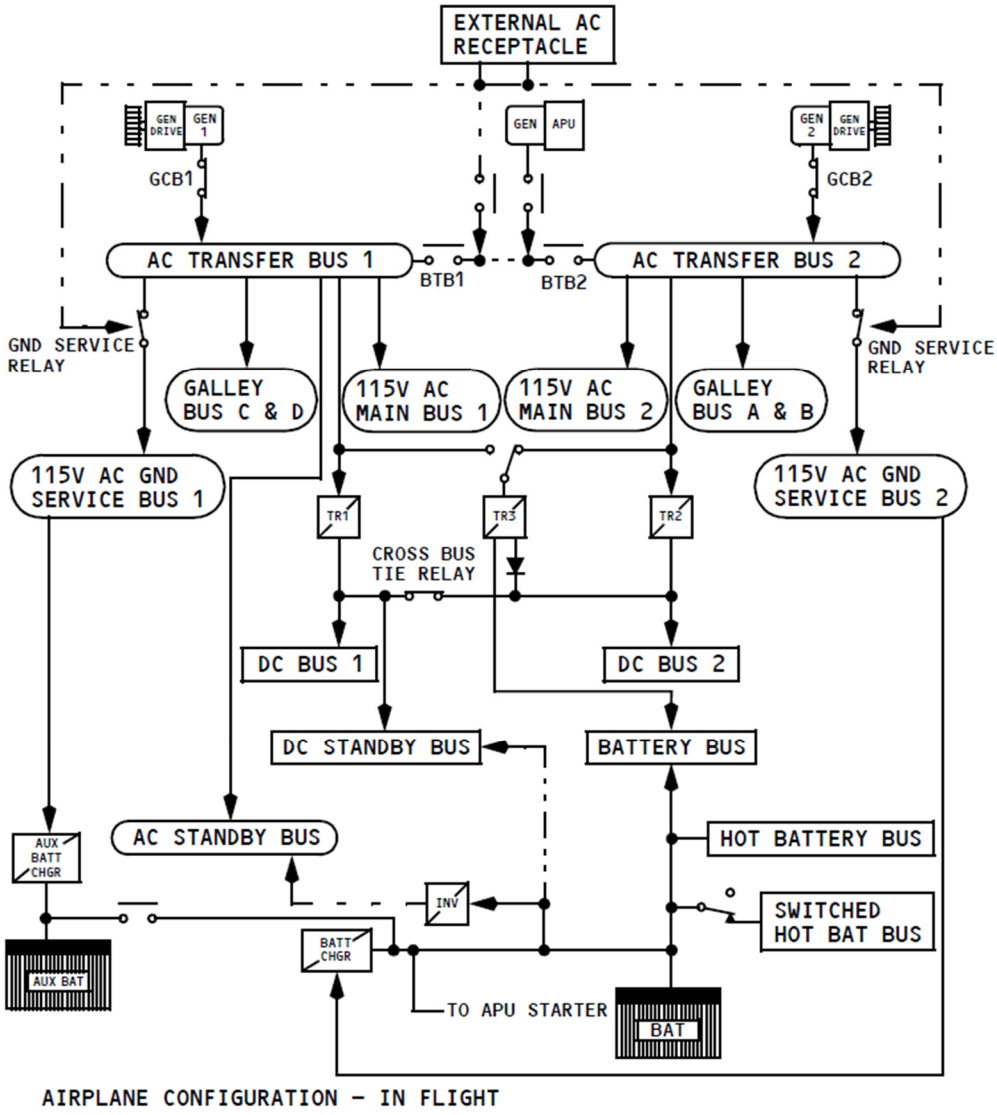
Il y a un premier petit alternateur à aimants permanents, le PMG (*permanent magnet generator*), qui produit un courant qui va alimenter les bobines des électroaimants du générateur principal qui va fournir l'électricité à l'avion. L'ensemble est contrôlé par le GCU (*generator control unit*).

En plus des IDG, il y a un autre générateur placé dans la queue de l'avion. C'est l'APU (*alternate power unit*). L'APU n'est pas équipé d'un CSD. On maintient la vitesse de rotation constante en contrôlant directement la vitesse de rotation de la turbine qui fait tourner l'APU. Comme cette turbine sert uniquement à faire tourner l'APU, on peut la faire tourner toujours à la même vitesse contrairement aux turbines reliées aux IDG qui servent à propulser l'avion.

Quand l'avion est au sol et que les moteurs sont arrêtés, le courant peut être fourni par l'aéroport ou par l'APU.

La distribution

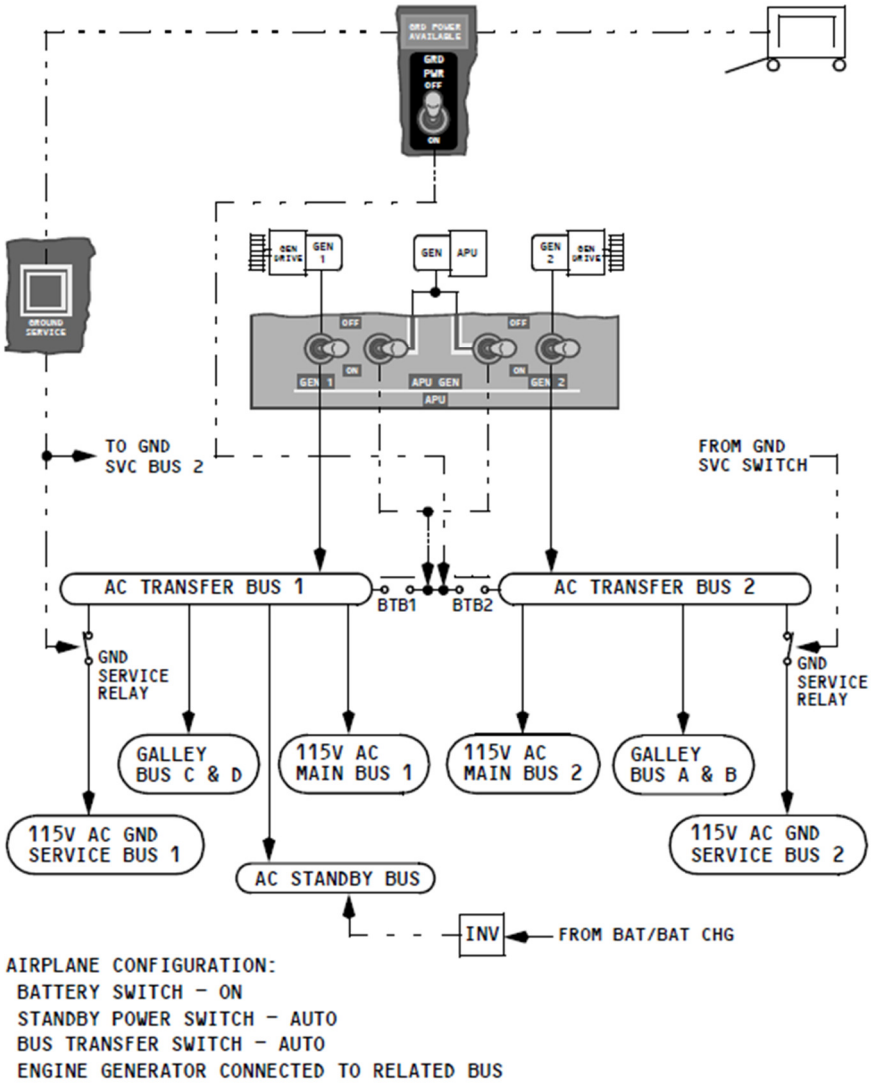
Voici le schéma montrant la distribution de l'électricité dans le Boeing.



En haut du schéma, on voit les deux générateurs (*GEN1* et *GEN2*) et l'APU. Les deux générateurs sont reliés à des *transfer bus*. Ces *transfer bus* sont à leur tour connectés à d'autres bus (le *115 V GND service bus*, le *galley bus*, le *AC standby bus* et le *115 V main bus*). Ces bus seront alimentés selon un ordre de priorité en cas de problème, allant du plus important (le *standby AC bus* qui alimente le tableau de bord du pilote) au moins important (le *galley bus*, qui alimente la cuisine).

Les *AC transfer bus* alimentent aussi les transformateurs redresseurs (TR) qui vont transformer le courant alternatif en courant continu pour alimenter le *DC bus*, le *DC standby bus* et le *battery bus*.

Examinons un peu plus la partie en courant alternatif (partie du haut)

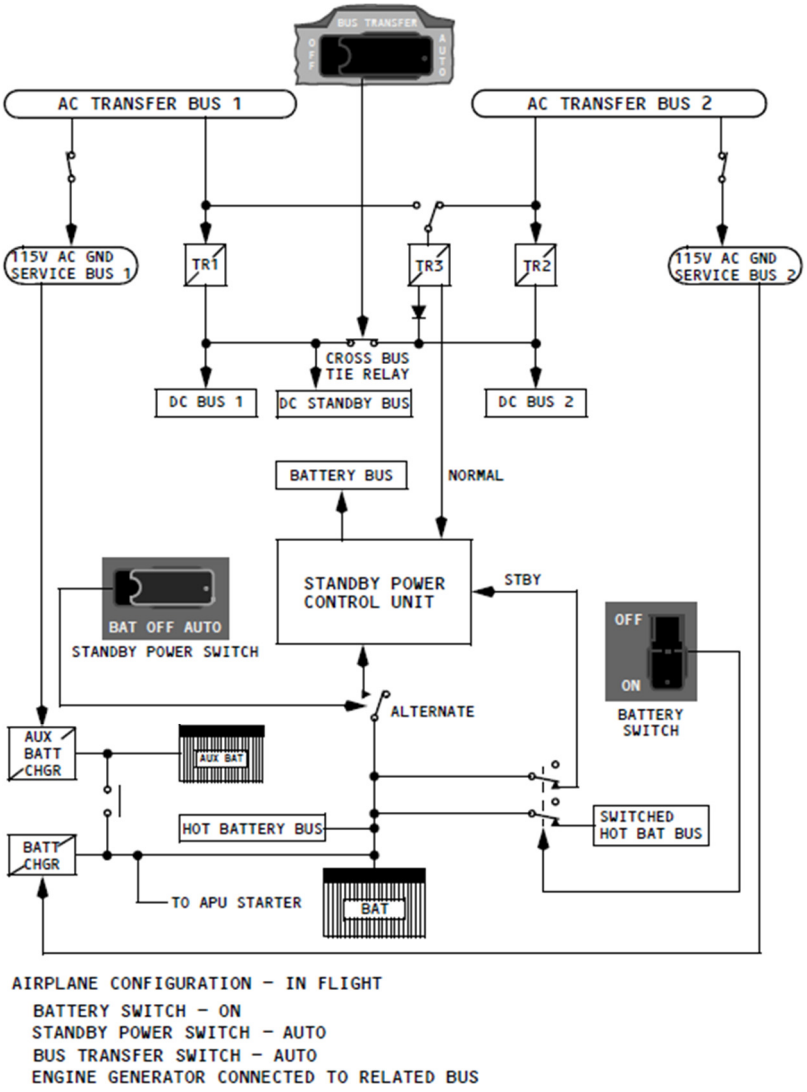


On retrouve encore les deux générateurs (qui ont une puissance de 90 kW pour ce Boeing) et l'APU. On a ajouté ici le *ground service* qui peut fournir l'électricité quand l'avion est au sol. Une seule de ces sources est suffisante pour alimenter le circuit au complet si on ferme les bons interrupteurs (les interrupteurs des sources ainsi que les interrupteurs BTB1 et BTB2).

Sur le Boeing 737-800, on ne peut jamais placer les interrupteurs pour qu'un bus soit alimenté par deux générateurs en même temps. La connexion d'un générateur à un bus déconnecte automatiquement l'autre générateur. Ainsi, il n'est pas nécessaire de synchroniser les deux générateurs pour qu'ils arrivent à leur maximum de tension en même temps.

En bas complètement du schéma, on voit le convertisseur statique (*INV*) qui transforme le courant continu en courant alternatif. Le convertisseur sera utilisé en cas de panne des deux générateurs et de l'APU. Alimenté par les batteries, il devient alors la seule source de courant alternatif dans l'avion.

Examinons maintenant la partie DC du circuit.



Le courant DC est fourni par les 3 transformateurs redresseurs (TR1, TR2 et TR3) alimentés par les *AC transfer bus*. Chacun de ces transformateurs a une capacité de 75 A. Ils alimentent les *DC bus* et le bus de secours *DC standby bus*.

Les 3 transformateurs sont branchés en parallèle quand l'interrupteur *cross bus tie relay* est fermé, ce qui signifie que chacun des 3 transformateurs alimente tous les bus. Si l'interrupteur est ouvert (*bus transfert* à *off*), le circuit est coupé en 2 parties. Cette séparation se fait automatiquement lors d'une approche ILS pour éviter de perturber les deux récepteurs en cas de problèmes sur un côté du circuit.

Le circuit DC charge les batteries de l'avion. Le Boeing 737 est équipé de deux batteries de 48 Ah fournissant une différence de potentiel de 24 V. Ces batteries peuvent fournir l'énergie à l'avion si tous les générateurs ne fonctionnent plus. Elles peuvent aussi servir à démarrer l'APU au décollage (s'il n'y a pas de courant fourni par l'aéroport). Par la suite, l'APU servira de générateur pour démarrer les moteurs de l'avion.

Les batteries sont connectées aux bus suivants : *hot battery bus*, *switched hot bat bus* (si la *battery switch* est à *on*) et *battery bus* (uniquement si ce dernier n'est pas alimenté par le transformateur TR3).

Les chargeurs des batteries sont alimentés par les *115 AC gnd service bus* qui sont alimentés par l'aéroport quand l'avion est au sol et par les *AC transfer bus* quand l'avion est en vol.

L'interrupteur *STANDBY POWER* permet éventuellement de couper l'alimentation des bus *standby* ou de forcer l'alimentation de ces bus par la batterie.

En cas de problème

Les équipements essentiels au vol sont connectés à des bus qui seront toujours alimentés en électricité en cas de problème.

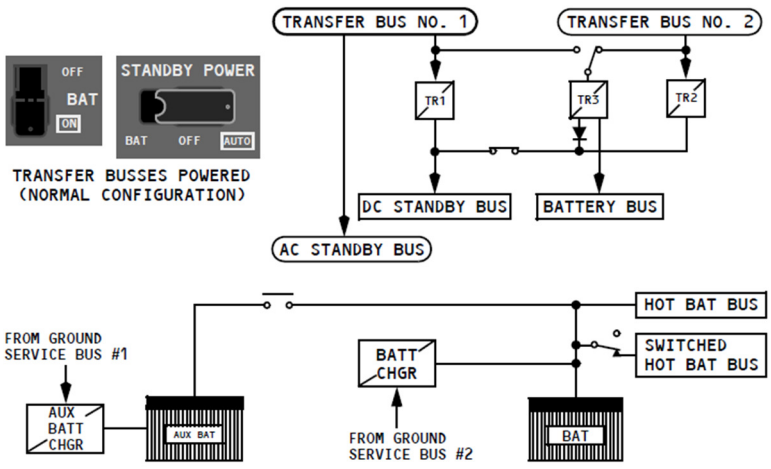
Certains instruments sont connectés au *DC Standby bus*. Normalement, il est alimenté par les transformateurs, mais il sera alimenté par le chargeur de batterie en cas de problème.

L'*AC standby bus* est alimenté par les *AC transfer bus*, eux-mêmes alimentés par les générateurs, ou par le convertisseur statique (*INV*) en cas de panne du *AC transfer bus*.

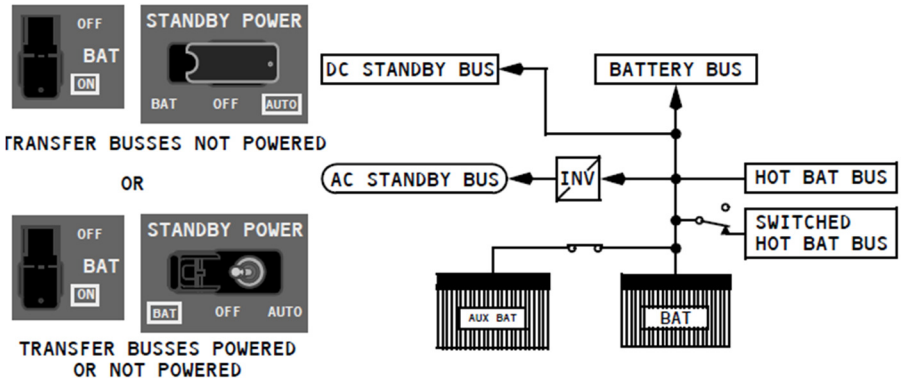
Le *battery bus*, normalement alimenté par les transformateurs, sera alimenté par le chargeur de la batterie en cas de problème avec les transformateurs. Le chargeur agit alors comme un 4^{e} transformateur redresseur. Le bus serait alimenté directement par la batterie si le chargeur avait un problème à son tour.

Quand tout va bien, on a la configuration montrée à droite.

Le bus *AC standby* est alimenté par le *AC transfer bus 1* et les bus *DC standby bus* et *battery bus* sont alimentés par les 3 transformateurs en même temps. Les chargeurs de batterie sont reliés aux *Ground service bus,* eux-mêmes alimentés par les *AC transfer bus* (connexions qui ne sont pas indiquées sur ce schéma).



En cas problème avec tous les générateurs de l'appareil, on place l'interrupteur *Standby power* à *auto* ou à *bat*. Les batteries vont alors alimenter tous les *standby bus* (qui sont essentiels), mais pas les *transfer bus*.

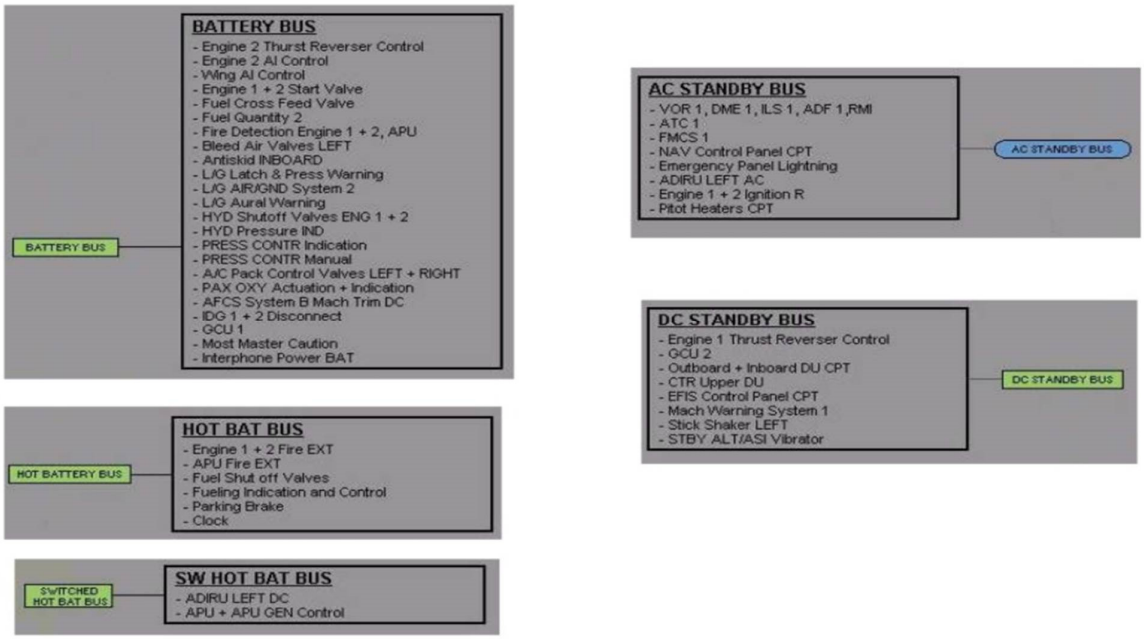


L'autonomie dans cette configuration est estimée à 30 minutes avec une seule batterie et à 60 minutes avec les 2 batteries.

Si on place l'interrupteur *bat* à *off* lors d'une panne des générateurs, le bus *Switched hot bat bus* n'est plus alimenté.

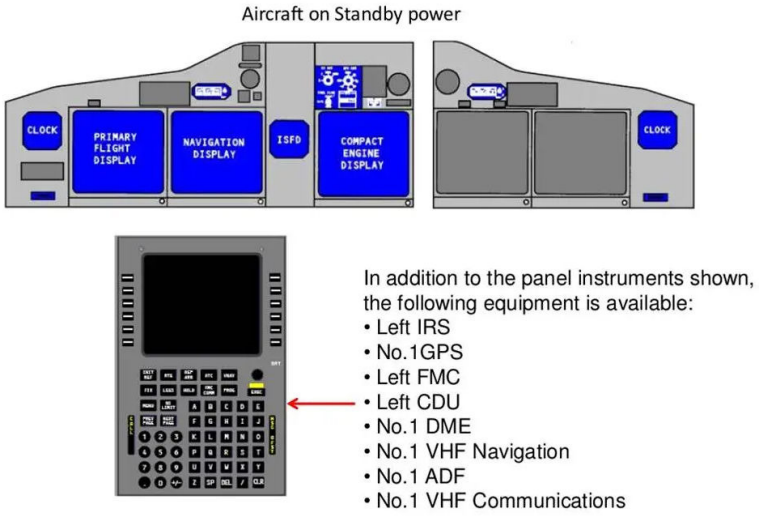
Instruments branchés aux bus essentiels

Voici une liste des quelques instruments branchés aux différents bus essentiels.



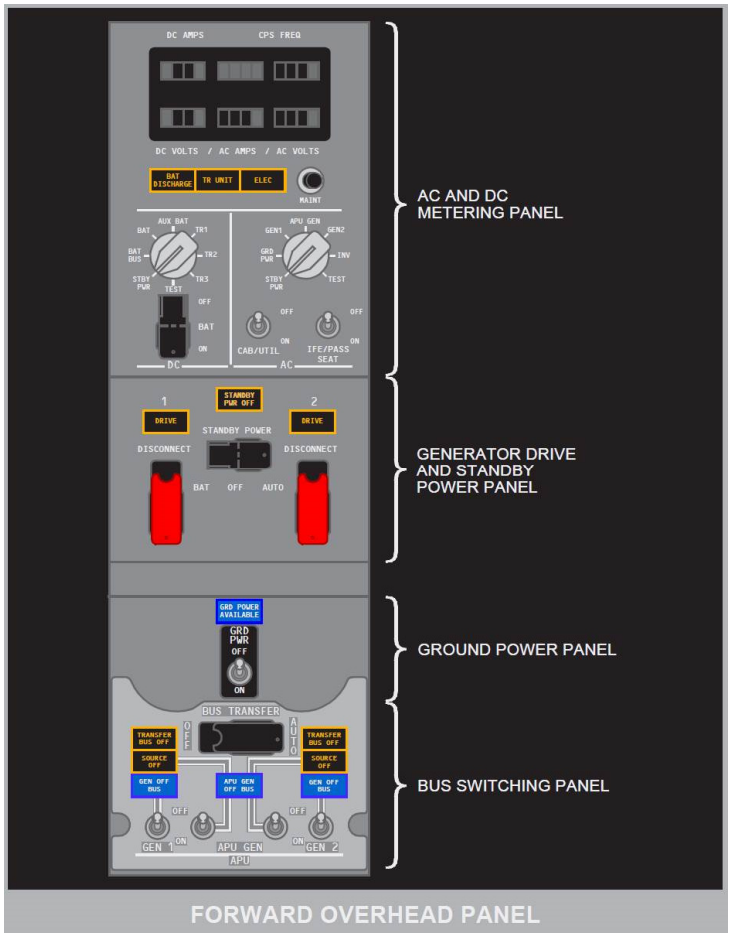
Sans faire le tour de tous ces instruments, disons que le *hot battery bus* permet de faire le plein de carburant, d'éteindre un incendie de moteurs ou d'APU ou d'arrêter les moteurs. Le *switch hot bat bus* alimente le démarrage de l'APU.

Les *standby bus*, qu'ils soient AC ou DC, alimentent les instruments du pilote. L'image de droite montre ce qui sera alimenté par ces bus en cas de panne de tous les générateurs. En limitant l'affichage des instruments, on augmente l'autonomie des batteries.



Les commandes du circuit

Toutes les commandes du circuit sur le Boeing 737 se trouvent sur la gauche du panneau supérieur avant.



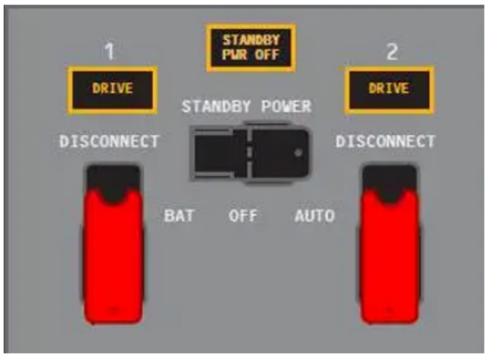
La partie du haut permet de mesurer les courants et les différences de potentiel pour différents éléments.

Les 3 voyants situés sous l'écran sont :

Bat discharge : la batterie fournie du courant (ce qui signifie que les générateurs n'en fournissent plus).

TR Unit : un transformateur est en panne.

Elec : Indique un problème sur les bus DC ou *standby* (peut s'allumer au sol uniquement).

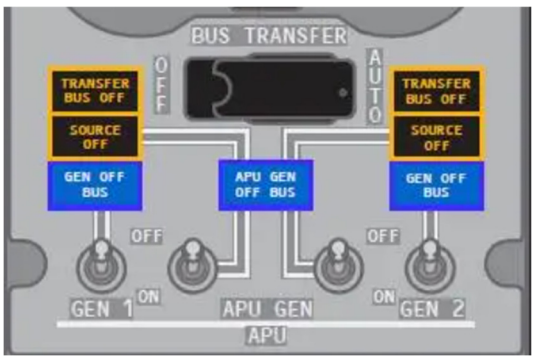


Un peu plus bas, on retrouve les voyants *DRIVE* qui s'allument quand le générateur n'est plus entrainé par le moteur (souvent un problème avec le *CSD*).

On reconnait aussi l'interrupteur qui permet d'alimenter les *bus standby* à partir de la batterie.

On retrouve aussi les commandes *disconnect* pour désaccoupler le CSD des générateurs. (De façon correcte, on dit qu'on décrabote le CSD plutôt que désaccoupler.) En décrabotant l'alternateur, il ne sera plus entrainé par le moteur et il s'arrêtera.

Attention, il n'est pas possible de redémarrer le générateur (recraboter) à partir du cockpit une fois qu'il a été décraboté ! Le 11 octobre 1983, le vol 710 d'Air Illinois s'écrase près de Pinckneyville en Illinois. Pendant le vol, il y a un problème avec un générateur. Comme le générateur gauche avait souvent des problèmes sur cet avion, le pilote ne regarde pas trop ses instruments et décrabote ce générateur en pensant que le problème vient de ce générateur. Toutefois, c'est le générateur de droite qui venait de rendre l'âme. Avec un générateur défectueux et un générateur décraboté (impossible à recraboter), les batteries deviennent alors l'unique source d'électricité. Malgré ce problème, l'équipage décide de poursuivre le vol même si on doit poser l'avion rapidement selon les règles de l'aviation. Malheureusement, les batteries se déchargent avant d'arriver à destination. Tous les instruments cessent alors de fonctionner, incluant l'horizon artificiel. Volant dans des nuages en pleine nuit, les pilotes ne peuvent plus connaitre l'inclinaison de l'avion et finissent par s'écraser (Mayday, saison 22 épisode 8). Les 10 occupants de l'avion périssent.



Finalement, on retrouve, complètement au bas du panneau, les interrupteurs pour les générateurs et le *bus transfer*.

Le *bus transfer* en mode automatique permet de s'assurer que les *transfer bus* seront tous deux alimentés, peu importe le générateur qui les alimente (GEN 1, GEN 2 ou APU).

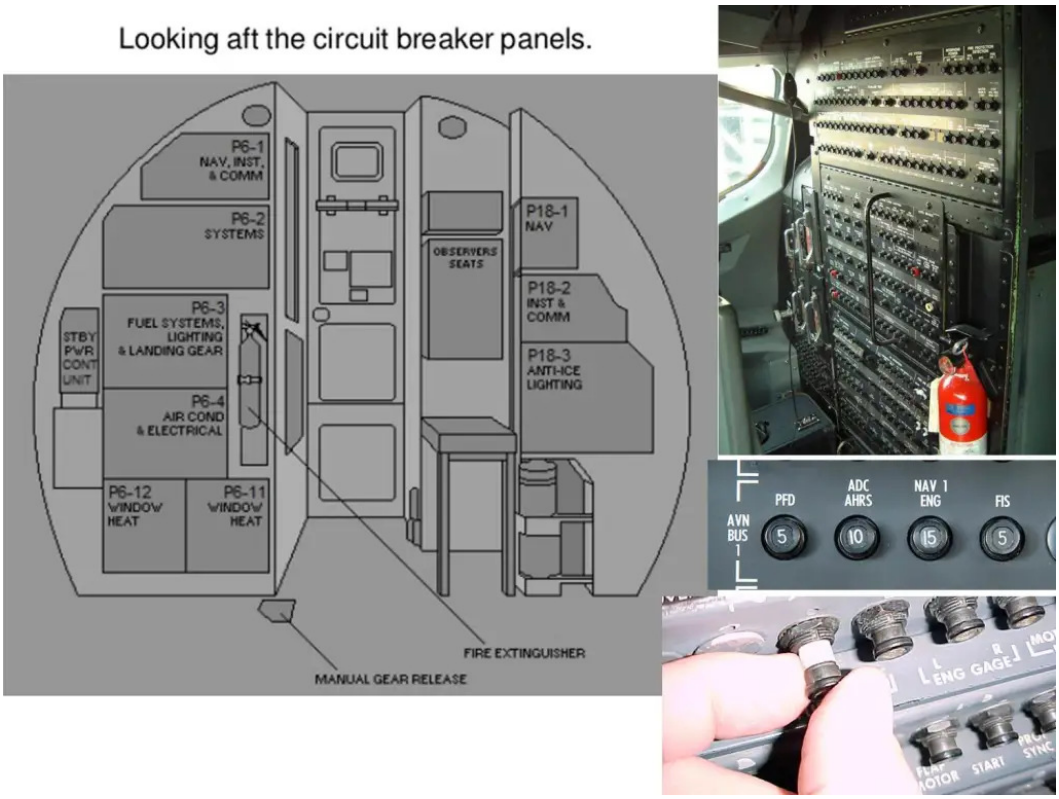
Le voyant *transfer bus off* s'allume quand un bus de transfert n'est pas alimenté.

Le voyant *source off* indique quand la dernière source sélectionnée (le générateur normalement associé à ce bus ou l'APU) pour alimenter le *transfer bus* ne fournit plus d'électricité.

Le voyant *gen off bus* indique que l'IDG n'est pas connectée au *transfer bus*.

Les disjoncteurs

Il y a une quantité phénoménale de disjoncteurs dans cet avion. L'image suivante montre où sont situés les panneaux de fusibles du Boeing 737.



Les disjoncteurs qui peuvent potentiellement être utilisés en cas de problèmes sont munis d'une bague de couleur.

Parfois, les listes de vérification à suivre en cas de problème mentionnent d'aller vérifier s'il ne faut pas réenclencher un disjoncteur particulier.

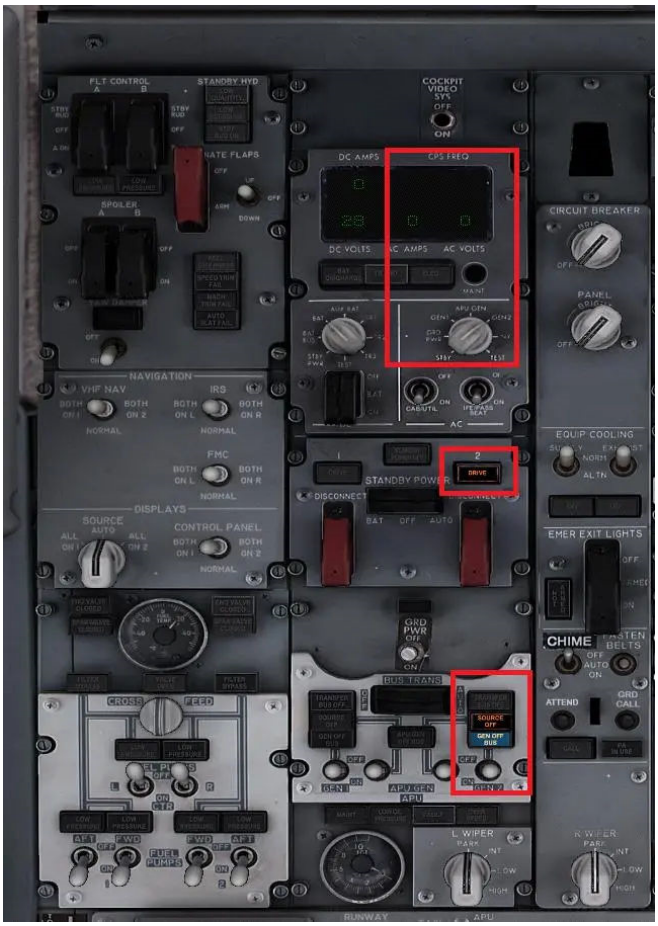
Gestion de pannes d'un 737

Voyons comment on gère une suite de problèmes électriques.

Perte d'un générateur

Supposons que, pendant un vol, le voyant *drive* s'allume. Cela signifie que le générateur n'est plus entrainé par le moteur et qu'il ne fournit plus d'électricité. Cette alarme déclenche aussi le *Master Caution*.

Sur l'image de droite, on voit le voyant *drive* allumé pour le générateur 2 (carré rouge du milieu).

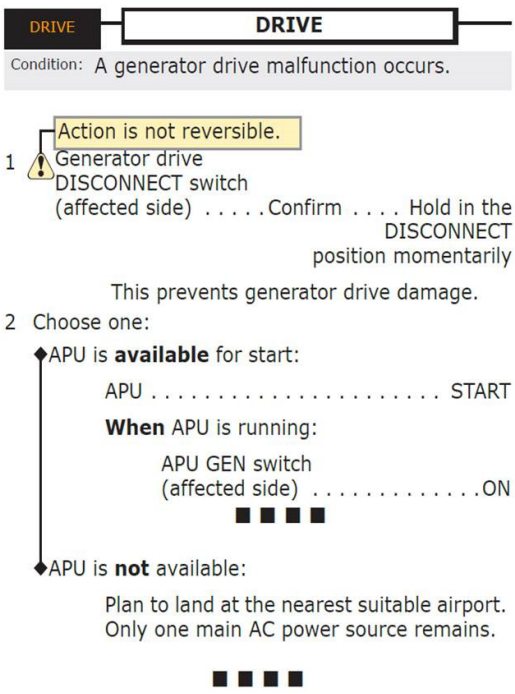


Les voyants *source off* et *gen off bus* se sont également allumés (carré rouge du bas). Cela veut dire que le générateur de droite s'est déconnecté du *transfert bus 2*. Ce bus est quand même alimenté, car le transfert automatique a été actionné (puisque le voyant *transfert bus* off est éteint dans le carré rouge du bas).

On constate d'ailleurs qu'il n'y a plus de différence de potentiel aux bornes du générateur 2 (carré rouge du haut). Le sélecteur est à *GEN2* et on peut lire 0 V sur l'affichage.

Cette panne n'est pas catastrophique. Tout le circuit est toujours alimenté, mais il ne reste qu'un seul générateur pour fournir l'énergie, le générateur du moteur gauche.

À droite, on peut voir la liste de vérification à suivre quand un voyant *drive* qui s'allume.


DRIVE

DRIVE

Condition: A generator drive malfunction occurs.

Action is not reversible.

1 Generator drive DISCONNECT switch (affected side) . . . . . Confirm . . . . Hold in the DISCONNECT position momentarily

This prevents generator drive damage.

2 Choose one:

◆APU is **available** for start:

APU . . . . . START

When APU is running:

APU GEN switch (affected side) . . . . . ON

■ ■ ■ ■

◆APU is **not** available:

Plan to land at the nearest suitable airport.
Only one main AC power source remains.

■ ■ ■ ■

On indique de décraboter le générateur 2 en mettant bien en évidence que l'action est irréversible. L'interrupteur de décrabotage est situé juste en dessous du petit carré rouge du milieu. Pour éviter un décrabotage accidentel, l'interrupteur doit être maintenu en position *disconnect* pendant un certain temps. L'interrupteur est également protégé par une cache qui est elle-même protégée par un fil qu'il faut briser pour ouvrir la cache. Le *confirm* dans la liste indique que cette action à haut risque doit être faite avec l'accord du 2^{e} pilote. La déconnexion du générateur permet de limiter les dommages que ce dernier pourrait subir.

Évidemment, on aggraverait sérieusement la situation si on décrabotait le mauvais générateur (comme pour le vol 710 d'Air Illinois)…

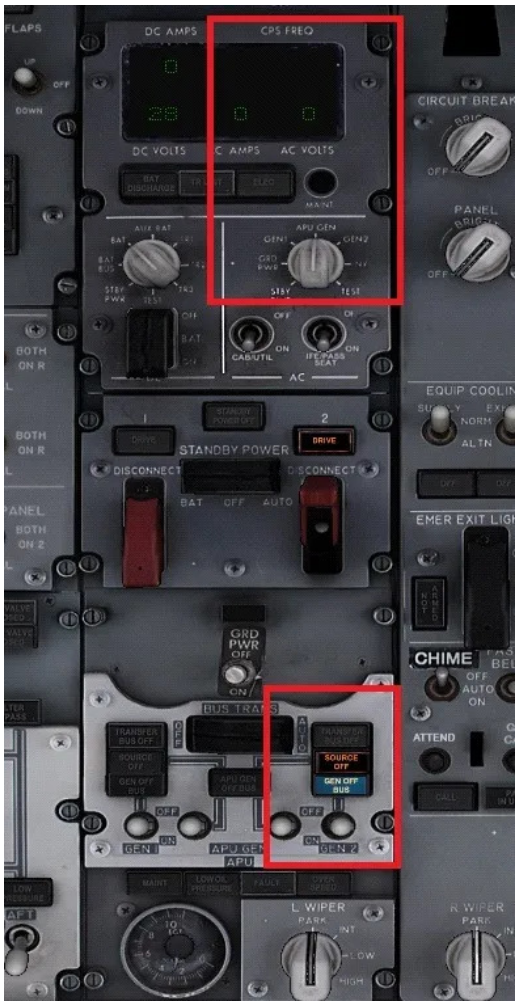
La liste dit ensuite de démarrer l'APU (s'il est disponible) pour compenser la perte du générateur. Une fois qu'il est démarré, on met l'interrupteur *APU GEN* à *on* du côté droit (interrupteur juste à gauche du carré rouge du bas.). L'APU va alors prendre la place du générateur 2.

Si on ne peut pas démarrer l'APU, on indique de se poser le plus rapidement possible parce qu'il ne reste qu'un seul générateur fonctionnel et qu'on pourrait avoir des problèmes encore plus sérieux si ce dernier générateur flanchait à son tour.

Cela veut dire que si on est dans un avion qui n'a pas d'APU, on doit se poser à l'aéroport le plus près dès qu'on perd un générateur.

Ce vidéo montre cette gestion de la panne
https://www.youtube.com/watch?v=jkbFvyVrFGg&t=4s

Perte de l'APU



Imaginons maintenant que l'APU a une panne à son tour. Soudainement, les voyants *master caution* et *source off* du côté droit s'allument (carré rouge du bas). Le multimètre indique également qu'il n'y a plus de différence de potentiel aux bornes de l'APU (carré rouge du haut).

Sur la liste de vérification, on demande de mettre l'interrupteur *GEN2* (en bas du carré rouge du bas) à *on* pour connecter le générateur 2. Comme on l'a précédemment décraboter et que la manœuvre est irréversible, cette manœuvre ne donnera rien ici.

La liste de vérification demande ensuite de vérifier si l'APU est disponible. Le cadran complètement en bas à gauche de l'image indique que l'APU tourne et qu'il est donc déjà en fonction. Comme il ne fournit plus de courant, on en déduit qu'il y a un problème avec l'APU et qu'il faut l'oublier.

La liste de vérification dit alors de se poser à l'aéroport le plus près puisqu'il ne reste qu'une seule source de courant fonctionnelle.
https://www.youtube.com/watch?v=bLjg8JnuMFE&t=4s

Perte du dernier générateur

Supposons maintenant que le dernier alternateur brise à son tour.

Cette perte du dernier générateur se traduira par une perte du pilote automatique et de tous les instruments du côté du copilote.

Plusieurs voyants se sont allumés. En bas complètement du panneau, les voyants *Transfert bus off*, *source off* et *gen off bus* sont allumés des deux côtés. Cela indique que les deux générateurs ne fournissent plus d'énergie au bus de transfert et que les bus de transfert ne sont plus alimentés. En haut du panneau, le voyant *bat discharge* indique que la batterie se décharge, ce qui est normal puisque c'est maintenant la batterie qui fournit l'énergie au système électrique.

Il faut alors suivre la liste de vérification de la perte de deux générateurs. Cette très longue liste de 7 pages permet de s'adapter à plusieurs situations.

On tente premièrement de remettre l'interrupteur du générateur 1 à *on*. Comme ce dernier n'avait pas été décraboté, il est possible que cela fonctionne. Imaginons que cela ne fonctionne pas.

On doit ensuite tenter de démarrer l'APU si c'est possible. Dans notre cas, on sait que l'APU ne fonctionne plus. Notez que si l'APU est disponible, il ne faut pas tenter de le démarrer plusieurs fois, car cela risque d'utiliser trop d'énergie des batteries.

Il ne reste plus qu'à se poser à l'aéroport le plus près sans utiliser le pilote automatique.
https://www.youtube.com/watch?v=ap27_tDHcqs

RÉSUMÉ DES ÉQUATIONS

Lien entre *T* et *f*

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

Lien entre Δv_0 et i_0

$$\Delta v_0 = R i_0$$

Puissance dissipée quand une résistance est branchée à une source alternative

$$\overline{P}_R = \frac{i_0 \Delta v_0}{2} = \frac{1}{2} R i_0^2 = \frac{\Delta v_0^2}{2R}$$

$$\overline{P}_R = I \Delta V = R I^2 = \frac{\Delta V^2}{R}$$

Valeur efficace du courant alternatif

$$I = \frac{i_0}{\sqrt{2}}$$

Valeur efficace de la différence de potentiel alternative

$$\Delta V = \frac{\Delta v_0}{\sqrt{2}}$$

Changement de la différence de potentiel avec un transformateur

$$\Delta v_{02} = \frac{N_2}{N_1}\Delta v_{01}$$

$$\Delta V_2 = \frac{N_2}{N_1}\Delta V_1$$

Changement de courant avec un transformateur

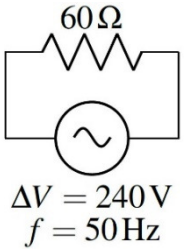
$$i_{02} = \frac{N_1}{N_2} i_{01}$$

$$I_2 = \frac{N_1}{N_2} I_1$$

EXERCICES

9.1 Une source et une résistance

1. Voici un circuit en courant alternatif avec une résistance.



   a) Quel est le courant efficace ?
   b) Quelle est l'amplitude du courant ?
   c) Quelle est l'amplitude de la différence de potentiel aux bornes de la résistance ?
   d) Quelle est la puissance moyenne dissipée par la résistance ?
   e) Quelle est la période de la source ?

2. Une résistance de 100 Ω est branchée à une source de courant alternatif ayant une période de 0,0025 s. On constate alors que l'amplitude du courant dans la résistance est de 200 mA.

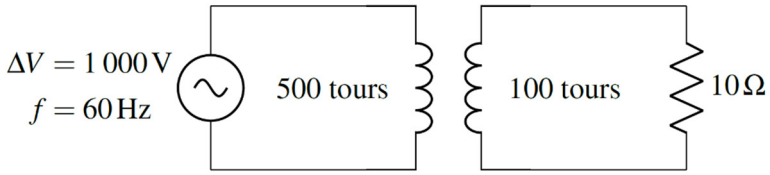
   a) Quelle est la valeur efficace de la tension de la source ?
   b) Quelle est la fréquence de la source ?
   c) Quelle est la puissance moyenne dissipée par la résistance ?

3. Une résistance de 100 Ω est branchée à une source de courant alternatif. On constate alors que la puissance moyenne dissipée par la résistance est de 225 W.

   a) Quelle est la valeur efficace de la tension de la source ?
   b) Quelle est la valeur du courant efficace fourni par la source ?

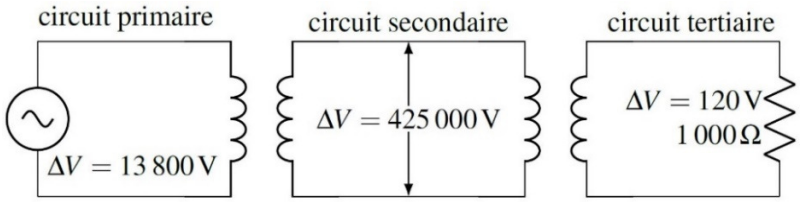
9.2 Les transformateurs

4. Voici un circuit avec un transformateur.



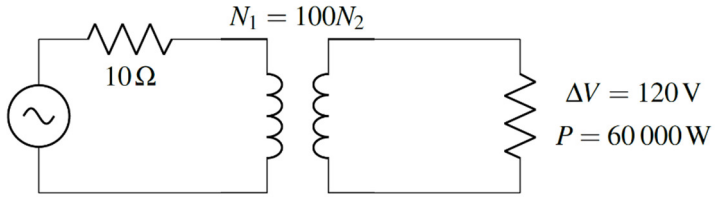
   a) Quelle est la différence de potentiel efficace aux bornes de la résistance ?
   b) Quel est le courant efficace dans le circuit secondaire ?
   c) Quel est le courant efficace dans le circuit primaire ?

5. Ce schéma illustre, de façon simplifiée, la façon dont on transporte l'électricité au Québec. Pour fournir l'électricité, on utilise un transformateur survolteur pour monter le potentiel pour le transport et on utilise un transformateur dévolteur pour baisser le potentiel avant la distribution dans les maisons.



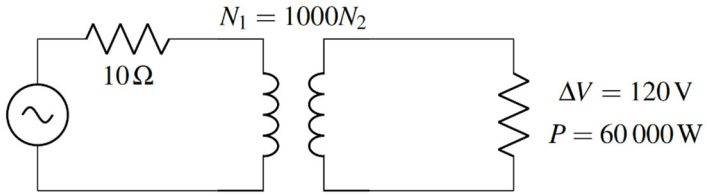
   a) Quel est le courant efficace dans le circuit tertiaire ?
   b) Quel est le rapport N_2/N_1 pour le transformateur entre les circuits secondaire et tertiaire ?
   c) Quel est le courant efficace dans le circuit secondaire ?
   d) Quel est le rapport N_2/N_1 pour le transformateur entre les circuits primaire et secondaire ?
   e) Quel est le courant efficace dans le circuit primaire ?

6. Dans cet exercice, on va constater que le transport d'électricité avec de grands potentiels diminue les pertes d'énergie dans les fils servant au transport. Notre objectif est de fournir 60 000 W à une usine en utilisant des fils dont la résistance est de 10 Ω. (Cette valeur est la résistance des fils dans le circuit primaire, qui apportent l'électricité à l'usine). Pour commencer, on va travailler avec le circuit suivant.



a) Quelle est la valeur efficace de la différence de potentiel aux bornes du transformateur dans le circuit primaire ?
b) Quel est le courant dans le circuit secondaire ?
c) Quel est le courant dans le circuit primaire ?
d) Quelle est la puissance dissipée par la résistance des fils du circuit primaire ?

On va maintenant faire le transport avec un potentiel 10 fois plus grand dans le circuit primaire.



e) Quelle est la valeur efficace de la différence de potentiel aux bornes du transformateur dans le circuit primaire ?
f) Quel est le courant dans le circuit secondaire ?
g) Quel est le courant dans le circuit primaire ?
h) Quelle est la puissance dissipée par la résistance des fils du circuit primaire ?
i) Est-ce que la puissance dissipée en chaleur dans les fils est inférieure dans ce circuit ?

RÉPONSES

9.1 Une source et une résistance

1. a) 4A b) 5,657 A c) 339,4 V d) 960 W e) 0,02 s
2. a) 14,14 V b) 400 Hz c) 2 W
3. a) 150 V b) 1,5 A

9.2 Les transformateurs

4. a) 200 V b) 20 A c) 4 A
5. a) 0,12 A b) 1/3541 c) 33,88 µA d) 30,8 e) 1,04 mA
6. a) 12 000 V b) 500 A c) 5 A d) 250 W e) 120 000 V f) 500 A g) 0,5 A h) 2,5 W i) Oui