Electricité industrielle

C'est l'orientation industrielle de l'électrotechnique, elle s'intéresse à l'étude, la conception et la réalisation des installations électriques industrielles. C'est un large domaine d'applications, qui nécessite des compétences dans diverses spécialités et une mise à jour régulière des connaissances en électricité.

Chapitre 1 Les récepteurs électriques

Tout dispositif qui consomme de l'énergie électrique pour produire d'autres formes d'énergie. Cette définition comprend les récepteurs ayant des composants électriquement différents, de telle sorte que dans le même récepteur différents comportements peuvent être observés. (Ex. moteurs ayant des ***composants*** électriques et magnétiques, et des ***comportements*** électromagnétique, thermique, mécanique, acoustique…)

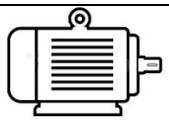
Matériel électrique	**Fours/ radiateurs**	 **Moteurs**	**Lampes**	**Batteries**
Utilisation	Electrothermie	Force motrice	Eclairages	Electrolyseurs
Sortie	Thermique	Mécanique	Rayonnement	Chimique
Comport-ements	Electrique, Thermique, Magnétique, Diélectrique	Electromagnétique Electromécanique, Thermique, Acoustiques	Electriques Lumineuses, Thermiques	Electrique Chimique Thermique

Tableau 1 Exemples de récepteurs ayant différents comportements

1 Grandeur nominale d'un récepteur

Il s'agit des grandeurs (tension, courant, puissance, et autres) que doit recevoir un matériel pour fonctionner dans des *conditions normales*. Ces grandeurs sont indiquées sur la plaque signalétique du matériel ou dans une documentation associée.

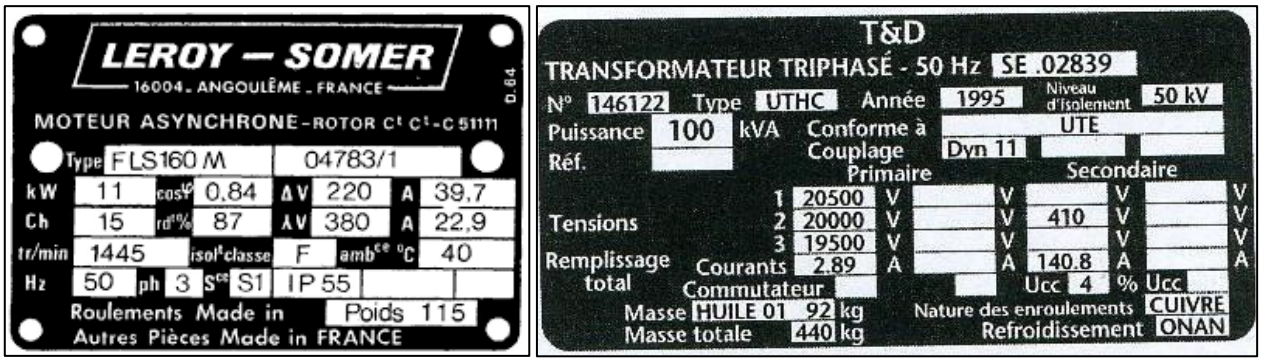


Figure 1 : Exemples de plaques signalétiques indiquant les grandeurs nominales d'un moteur et d'un transformateur triphasés

2 Nature d'un récepteur

Nature des effets électromagnétiques liés aux composants d'un récepteur. Ces *effets*, décrits par des éléments actifs (f.é.m. E) et passifs (RLC), définissent la nature du récepteur : *actif, passif, résistif, inductif ou capacitif*. L'agencement de ces éléments définit le *circuit équivalent*, dont, les équations définissent *les caractéristiques du récepteur.*

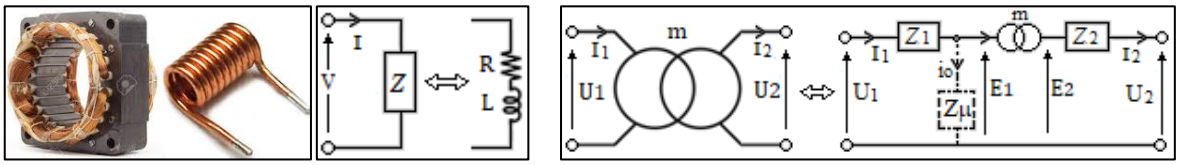


Figure 2 Circuits équivalents par phase de quelques récepteurs en régime permanent.

2.1 Caractéristiques des récepteurs électriques

Il s'agit des dépendances entre les grandeurs électro-énergétiques mesurables depuis les bornes externes d'un récepteur : électriques $U = f(I)$ et énergétiques $(S, P, Q) = f(U, I, \ldots)$.

Electriquement, la nature passive (RLC) est souvent modélisée par une impédance équivalente $\mathbf{Z} = (R + jX)$, et la nature active par une f.é.m. **E**, de telle façon qu'en régime permanent, un récepteur peut être décrit par à un circuit équivalent de ce type.

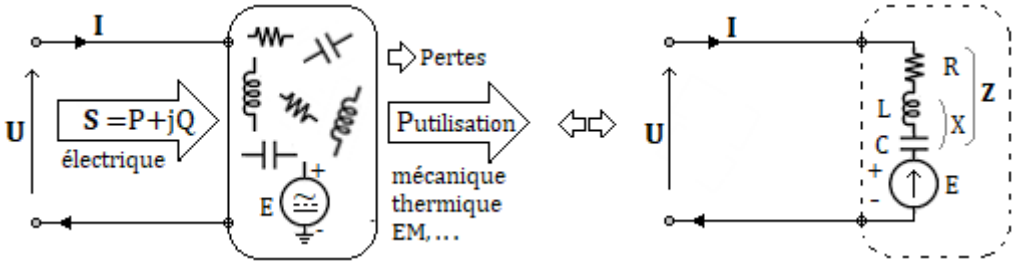


Figure 3 Echange de puissance et circuit équivalent (générique) d'un récepteur

Energétiquement, un récepteur est une boite qui reçoit, par son entrée, une puissance électrique totale, appelée puissance apparente notée S, et délivre à sa sortie une forme de puissance utile (thermique, mécanique, lumineuse, …)

2.1.1 Caractéristiques électriques $U = f(I)$

Selon les lois fondamentales de l'électricité, la relation tension-courant, $\mathbf{U} = \mathbf{f}(\mathbf{I})$, peut être mise sous l'une de ces formes génériques *et complexes.*

$\mathbf{U} = \mathbf{Z} \cdot \mathbf{I} + \mathbf{E} \;=\; (R + jX) \cdot \mathbf{I} + \mathbf{E} = \; R \cdot \mathbf{I} + jX \cdot \mathbf{I} + \mathbf{E}.$ et avec les complexes : $\underline{V} = \mathbf{V} = V\angle\varphi_v$

$$U\angle\varphi_u = (Z \cdot I)\angle(\varphi_z + \varphi_i) + E\angle\varphi_E \quad = \quad R \cdot I\angle\varphi_i + X \cdot I\angle(90° + \varphi_i) + E\angle\varphi_E$$

On peut tracer le diagramme (complexe ou vectoriel) correspondant à cette équation complexe; ainsi que l'allure des modules tension-courant U=f(I):

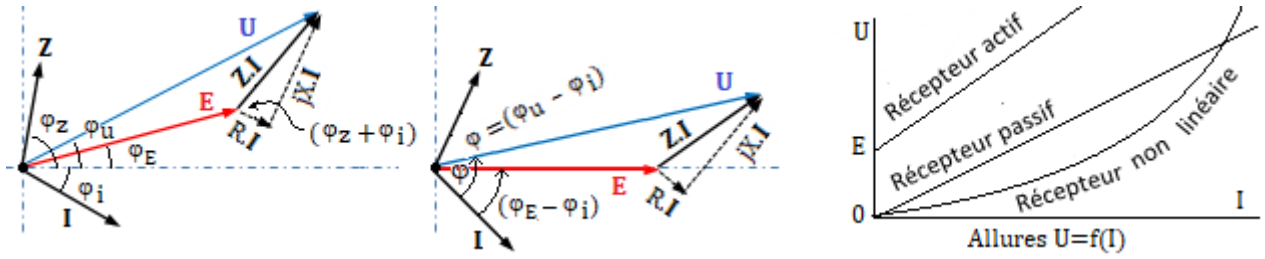


Figure 4 : Diagrammes de Fresnel (avec changement de référence) et allures de l'équation (U=Z.I+E).

La f.é.m. ($E \neq 0$) indique la *nature active* du récepteur. Le signe du déphasage tension-courant ($\varphi = \varphi_u - \varphi_i$), qui ne dépend pas du choix de la référence, indique la nature des composants passifs du récepteur. *Ce déphasage est à l'origine du facteur de puissance.*

$\varphi = \varphi_u - \varphi_i$	0°	> 0°	+90°	< 0°	-90°
Nature	Résistive pure	Inductive	Inductive pure	Capacitive	Capacitive pure
Composants	R	R et L	L	R et C	C
	U et **I** en phases	**U** en avance de **I**	**U** en quadrature avant de **I**	**U** en arrière de **I**	**U** en quadrature arrière de **I**

Tableau 2 Natures des récepteurs selon le déphasage entre le courant et la tension

2.1.2 Caractéristiques énergétiques $(S, P, Q) = f(U, I, Z, \varphi)$

Un récepteur monophasé de tension $\mathbf{U} = U\angle\varphi_u$ et de courant $\mathbf{I} = I\angle\varphi_i$, consomme une puissance électrique, *totale, apparente*, *complexe*, en (VA), par définition donnée par :

$$\mathbf{S} = P + jQ = \mathbf{U} \times \mathbf{I}^* = (U \cdot I)\angle(\varphi_u - \varphi_i) = S\angle\varphi \qquad (\mathbf{I}^* \text{ est le conjugué de } \mathbf{I})$$

$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = U \cdot I$ puissance apparente module en [VA]

$P = S \cdot \cos\varphi = U \cdot I \cdot \cos\varphi$ puissance active en [W]

$Q = S \cdot \sin\varphi = U \cdot I \cdot \sin\varphi$ puissance réactive en [VAR]

$F = \frac{P}{S} = \frac{P}{U \cdot I} = \frac{P}{\sqrt{P^2+Q^2}} = \cos\varphi$ facteur de puissance entre (0 et 1).

$\eta = \frac{P_{utilisation}}{P} = \frac{P_{utilisation}}{F \cdot S}$ rendement du récepteur

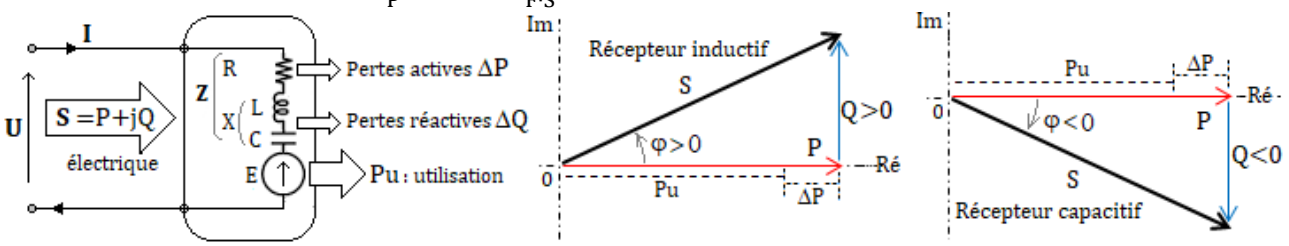


Figure 5 : Echange de puissances et triangle (diagrammes) de puissances d'un récepteur

S : puissance apparente (*module de la puissance complexe*), la puissance totale reçue par le récepteur mais qui n'est pas totalement transmise en puissance d'utilisation. Les récepteurs sont dimensionnés sur la base de cette puissance totale. Plus elle est grande plus le récepteur est surdimensionné (renforcé en taille et en qualité).

P : puissance active (partie réelle de la puissance complexe), la partie de la puissance totale réellement transmise vers la sortie du récepteur pour être transformée en puissance d'utilisation (mécanique, thermique, …) et des pertes.

Q: puissance réactive (partie imaginaire de la puissance complexe), la partie non transmise en puissance utile, mais renvoyée à la source ou dissipée en pertes ΔQ par les réactances du récepteur. *Notez que cette puissance peut être négative ou positive.*

Le facteur de puissance varie entre $(0 \leq \cos\varphi \leq 1)$. C'est le taux d'utilisation de la puissance apparente reçue, il indique la qualité énergétique du récepteur, *C'est comme un rendement électrique du récepteur* ! Plus ce facteur augmente plus la puissance apparente reçue se transmit en utilisation. On a donc *intérêt à augmenter* ce facteur pour améliorer la qualité énergétique du récepteur (*compensation*).

Le rendement énergétique du récepteur renseigne sur les pertes actives dans le récepteur. $\Delta P = P - P_u = P(1 - \eta) = P_u\left(\frac{1}{\eta} - 1\right)$ en (W).

Les puissances précédentes ont d'autres expressions équivalentes en fonctions d'autres grandeurs électriques (E, Z, R, X) décrivant le récepteur.

$$\mathbf{S} = P + jQ = \mathbf{U} \times \mathbf{I}^* = (\mathbf{Z} \cdot \mathbf{I} + \mathbf{E}) \cdot \mathbf{I}^* =$$
$$= \mathbf{Z} \cdot I^2 + \mathbf{E} \cdot \mathbf{I}^* =$$
$$= (R + j\,X) \cdot I^2 + \mathbf{E} \cdot \mathbf{I}^*$$
$$= R \cdot I^2 + j\,X \cdot I^2 + \mathcal{R}\text{é}(\mathbf{E} \cdot \mathbf{I}^*) + j\,\mathcal{I}\text{m}(\mathbf{E} \cdot \mathbf{I}^*)$$
$$= \Delta P + j\,\Delta Q + P_{util} + j\,Q_{renv}$$
$$P = U \cdot I \cdot \cos\varphi = \Delta P + P_{util} = R \cdot I^2 + \mathcal{R}\text{é}(\mathbf{E} \cdot \mathbf{I}^*)$$
$$Q = U \cdot I \cdot \sin\varphi = \Delta Q + Q_{renv} = X \cdot I^2 + \mathcal{I}\text{m}(\mathbf{E} \cdot \mathbf{I}^*)$$

Si le récepteur est passif, $(E = 0)$, alors toute la puissance apparente reçue se dissipe seulement en pertes active (ΔP) et en pertes réactive (ΔQ).

$\mathbf{S} = P + jQ = \mathbf{U} \times \mathbf{I}^* = (\mathbf{Z} \cdot \mathbf{I}) \cdot \mathbf{I}^*$ apparente complexe

$S = U \cdot I = Z \cdot I^2 = \frac{U^2}{Z}$ apparente module

$P = U \cdot I \cdot \cos\varphi = \Delta P = R \cdot I^2$ toujours positive car R est toujours positive

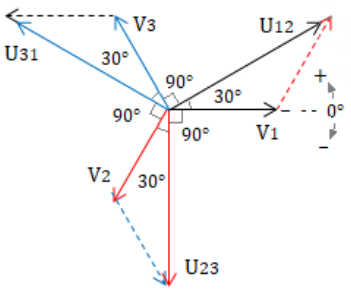
$Q = U \cdot I \cdot \sin\varphi = \Delta Q = X \cdot I^2$ peut être négative car X peut être négative.

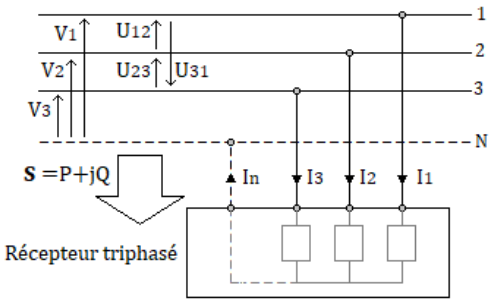
La réactance du récepteur (partie imaginaire de son impédance) : $X = X_L + X_C = \omega L - \frac{1}{\omega C}$;

Réactance	Q	Nature	Déphasage $(\varphi = \varphi_u - \varphi_i)$
$X > 0 \Leftrightarrow X_L > X_C$	$Q > 0$	Récepteur inductif	$\varphi>0$: U en avance de I
$X < 0 \Leftrightarrow X_L < X_C$	$Q < 0$	Récepteur capacitif	$\varphi<0$: U en arrière de I
$X = 0 \Leftrightarrow X_L = X_C$	$Q = 0$	Récepteur résistif ou résonnant	$\varphi=0$: U en phase avec I

3 Régimes de fonctionnement

Il peut s'agir de la marche normale ou anormale (de défaut), permanente ou transitoire (arrêts et démarrages), comme il peut s'agir du type d'alimentation : continue, alternative, monophasée, triphasée, équilibrée et déséquilibrée.





Quelque soit le récepteur équilibré ou non, la puissance complexe est la somme des puissance complexes des phases. Le système des tensions est souvent équilibré.

$\mathbf{S} = P + jQ = \mathbf{S_1} + \mathbf{S_2} + \mathbf{S_3} = \mathbf{V_1 I_1^*} + \mathbf{V_2 I_2^*} + \mathbf{V_3 I_3^*}$ (Puissance complexe conservative)

$P = P_1 + P_2 + P_3 = V_1 I_1 \cos\varphi_1 + V_2 I_2 \cos\varphi_2 + V_3 I_3 \cos\varphi_3$ (Puissance active conservative)

$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 = V_1 I_1 \sin\varphi_1 + V_2 I_2 \sin\varphi_2 + V_3 I_3 \sin\varphi_3$ (Puissance réactive conservative)

$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \neq V_1 I_1 + V_2 I_2 + V_3 I_3$!! (La puissance en module n'est pas conservative)

$\mathbf{I_n} = \mathbf{I_1} + \mathbf{I_2} + \mathbf{I_3} = \left(\frac{\mathbf{S_1}}{\mathbf{V_1}}\right)^* + \left(\frac{\mathbf{S_2}}{\mathbf{V_2}}\right)^* + \left(\frac{\mathbf{S_3}}{\mathbf{V_3}}\right)^*$ Courant dans le neutre

Si le récepteur triphasé est équilibré, le courant du neutre est nul.

$\mathbf{S} = P + jQ = \mathbf{3} \times \mathbf{S_1} = \mathbf{3 V_1 I_1^*}$

$P = 3P_1 = 3V_1 I_1 \cos\varphi_1 = \sqrt{3} U_{12} I_1 \cos\varphi_1$

$Q = 3Q_1 = 3V_1 I_1 \sin\varphi_1 = \sqrt{3} U_{12} I_1 \sin\varphi_1$

$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = 3V_1 I_1 = \sqrt{3} U_{12} I_1$

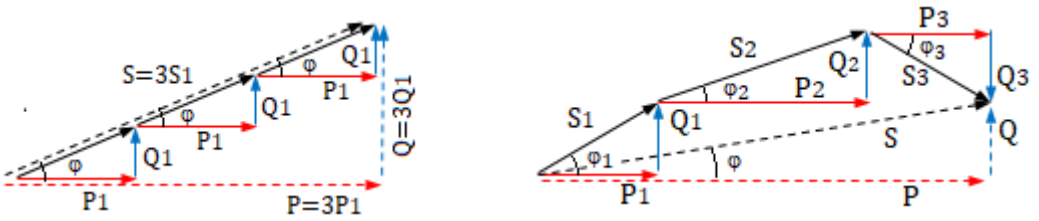
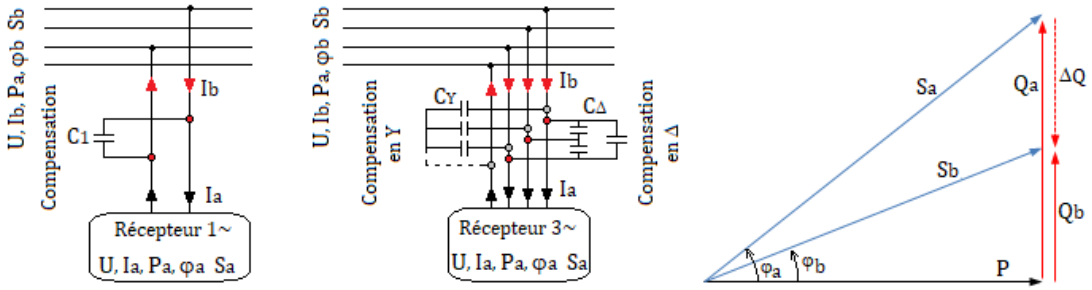


Figure 6 : Diagrammes de puissances d'un récepteur triphasé symétrique, et d'un autre asymétrique

3.1 Compensation du réactif

Pour faire varier le facteur de puissance de $(\cos\varphi_a \rightarrow \cos\varphi_b > \cos\varphi_a)$, il faut ajouter une puissance réactive ΔQ sans modifier la puissance active P du récepteur.



$$\begin{cases} Q_a = P\cdot\tan\varphi_a \\ Q_b = P\cdot\tan\varphi_b \end{cases} \Longrightarrow \Delta Q = Q_b - Q_a = P\cdot(\tan\varphi_b - \tan\varphi_a)\ ;$$

Si ΔQ est négative, il faut utiliser en parallèle avec le récepteur des condensateurs « C » pour la produire, si elle est positive on utilise des inducteurs « L ».

$$\Delta Q = \begin{cases} X_C I_C^2 = -\omega C U^2 \Leftrightarrow C = -\frac{\Delta Q}{\omega\cdot U^2} \\ X_L I_L^2 = \frac{U^2}{\omega L} \quad \Leftrightarrow \quad L = \frac{U^2}{\omega\cdot\Delta Q} \end{cases} \quad \text{(Compensation en monophasé)}$$

$$\Delta Q = \begin{cases} 3X_{CY} I_C^2 = -\omega 3 C_Y V^2 \Leftrightarrow C_Y = -\frac{\Delta Q}{\omega\cdot 3V^2} = -\frac{\Delta Q}{\omega\cdot U^2} \\ 3X_{LY} I_L^2 = \frac{3V^2}{\omega L_Y} \quad \Leftrightarrow \quad L_Y = \frac{3V^2}{\omega\cdot\Delta Q} = \frac{U^2}{\omega\cdot\Delta Q} \end{cases} \quad \text{(Compensation triphasée en Y)}$$

$$\Delta Q = \begin{cases} 3X_{C\Delta} J_C^2 = -\omega 3 C_\Delta U^2 \Leftrightarrow C_\Delta = -\frac{\Delta Q}{\omega\cdot 3U^2} = \frac{C_Y}{3} \\ 3X_{L\Delta} J_L^2 = \frac{3U^2}{\omega L_\Delta} \quad \Leftrightarrow \quad L_\Delta = \frac{3U^2}{\omega\cdot\Delta Q} = 3L_Y \end{cases} \quad \text{(Compensation triphasée en Δ)}$$

Dans la figure, ΔQ <0 ; c'est pourquoi on a ajouté des condensateurs, si elle était positive, on devrait alors ajouter des inductances L.

Passer de $(\cos\varphi_a \rightarrow \cos\varphi_b > \cos\varphi_a \Leftrightarrow \tan\varphi_b < \tan\varphi_a)$; le courant absorbé par le récepteur est $I_a = \frac{P}{U\cdot\cos\varphi_a}$; le courant fourni par le réseau est $I_b = \frac{P}{U\cdot\cos\varphi_b}$; donc $(I_b < I_a)$, la puissance réactive appelée par le récepteur est $Q_a = P\cdot\tan\varphi_a$; la puissance réactive fournie par la source est $Q_b = P\cdot\tan\varphi_b$; donc $(Q_b < Q_a)$. La compensation diminue donc :

- *le courant de ligne fourni par le réseau (la source) au récepteur.*
- *La puissance réactive fournie par le réseau au récepteur*

Le compensateur se charge de fournir les différences de courant et puissance réactive.

Electricité industrielle

L'électricité qui s'exerce en milieux industriels et qui a pour but de concevoir, de surveiller et de maintenir les installations électriques industrielles. Ces dernières sont le prolongement naturel des réseaux de distribution publique (RDP) auxquels elles se raccordent, pour assurer l'alimentation en électricité.

Chapitre 2 Les alimentations électriques

Le terme général « alimentation électrique » désigne la fourniture de l'énergie électrique. Elle est assurée par des sources (réseau, batteries, groupes…) dont le raccordement à la "tête d'installation" nécessite de véritables automatismes. A partir des critères de définition de l'installation et des conditions d'exploitation, on peut distinguer :

L'alimentation principale (S1) : destinée à alimenter en permanente l'installation, elle est en général issue du réseau de distribution public (RDP). Le choix entre haute ou basse tension se fait en fonction de la puissance nécessaire, dite puissance installée.

L'alimentation de remplacement (S2, GS) : destinée à remplacer l'alimentation principale, elle est utilisée soit dans un but de secours, en cas de défaillance de l'alimentation principale, soit dans un but économique en se substituant en tout ou partie à l'alimentation principale.

Alimentation pour service de sécurité(AS) : destinée à maintenir l'alimentation, elle fournit l'énergie nécessaire pour garantir la mise en sécurité du site en cas de défaillance des alimentations principale/remplacement.

Alimentation auxiliaire (AUX) : Destinée au fonctionnement des "auxiliaires" (commande et signalisation), elle est fournie par une source distincte issue ou non de l'alimentation principale. Elle est souvent d'une tension ou d'une nature différente de l'alimentation principale (exemple : TBT alternatif ou continu).

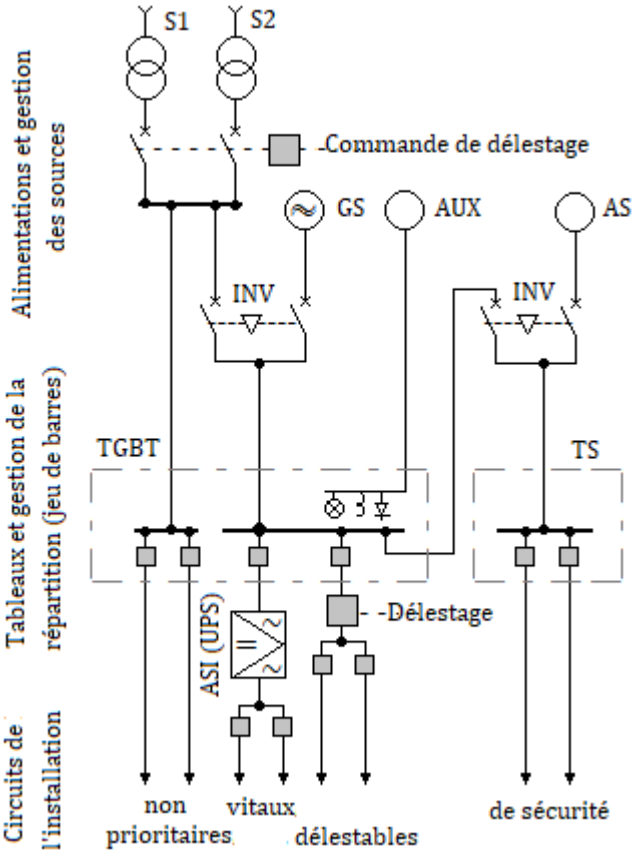
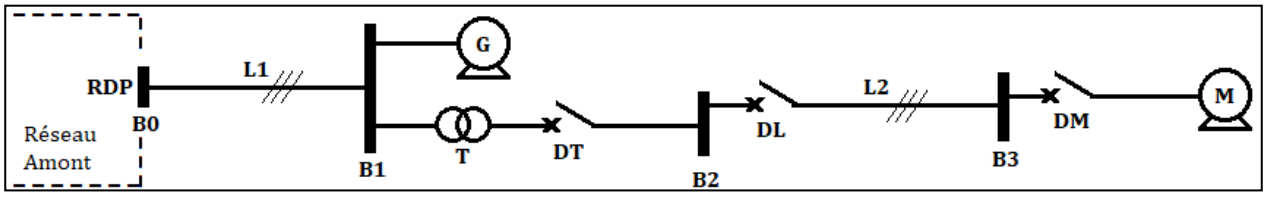


Figure 7 Exemple d'alimentation d'une tête d'installation

Groupes alternateurs	**Postes MT/BT**	**AS**	**AUX**	**ACC**
Alimentation principale ou de replacement (S1 ; S2 ; GS : groupe de secours)	Alimentation principale ou de remplacement (S1 ; S2)	Alim stabilisée pour service de sécurité	Alim redressée et filtrée pour auxiliaires	Alim continue pour sécurité et auxilliares, …

Tableau 3 Exemples de sources d'alimentation électrique

4 Alimentations



Une alimentation comporte toujours:

- Une source d'alimentation principale généralement un accès à un réseau de distribution public (RDP), et des alternateurs de secours
- Des lignes ou des câbles d'alimentation
- Des transformateurs de puissance
- Des jeux de barres et des disjoncteurs
- Des charges

Pour qu'on puisse caractériser tout le circuit d'alimentation, on doit connaitre pour chacun de ses éléments l'ensemble de ses grandeurs nominales.

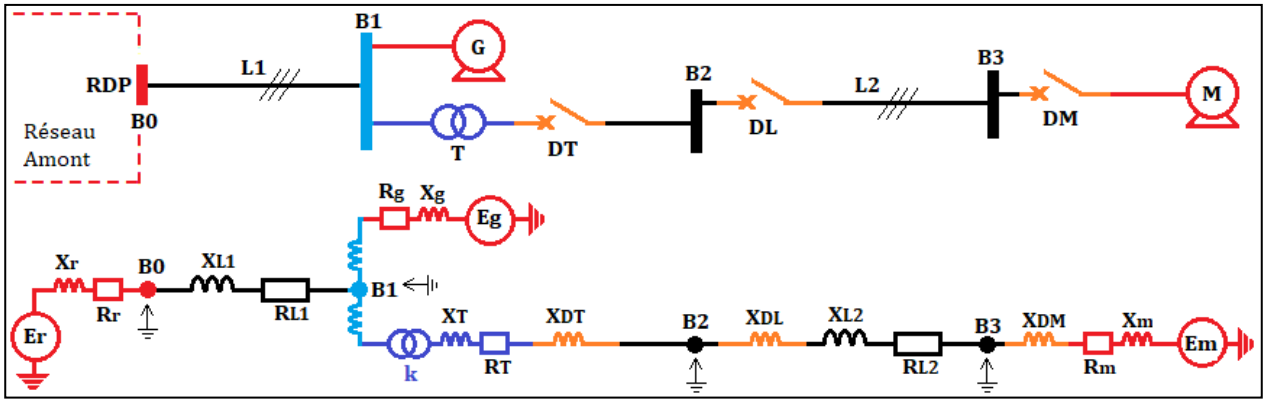
- Pour le réseau RDP on doit connaitre en amont du point de raccordement (Accès B0): la tension nominale **Er (kV)** et la puissance de court-circuit **Scc(MVA)** à l'accès **B0**

- Pour les lignes et les jeux de barres, on doit connaitre leurs dispositions géométriques et leurs résistivités électriques: longueurs **L(m)**, section **s(m²)**, espacements **d(m),** hauteurs **h(m)** et résistivités **ρ(Ω.m).**

- Pour les générateurs de secours on doit connaitre leurs plaques signalétiques: leurs tensions à vide **Eg** ; leurs puissances nominales **Sn,** leurs résistances et réactances internes **Rg** (négligeable) et **Xg(%)**

- Pour les transformateurs on doit connaitre les tensions primaire et secondaire à vide (U1:U2); la puissance nominale Sn et la tension de court-circuit réduite Ucc (%)

- Pour les moteurs leurs plaques signalétiques: Un, Sn, cosphi, rendement % et parfois le courant de démarrage Id. Pour les disjoncteurs BT on prend toujours des résistances nulles et réactances fixées à **XD=0.15 mΩ**



4.1 Circuit équivalent au réseau de distribution public (RDP)

Le circuit équivalent du RDP vu du point de raccordement B0 est une source de tension **Er=Un** en série avec une impédance **Zr (Rr, Xr).**

- Er: est la tension du point d'accès B0 à vide, généralement la tension nominale du RDP
- L'impédance du RDP vue du point B0 est donnée par :

$$Z_r(\Omega) = \frac{U_n^2}{S_{cc}} \; ; \; \begin{array}{l} \text{Un: Tension nominale du réseau kV} \\ \text{Scc: Puissance de court} - \text{circuit MVA} \end{array}$$

La résistance et la réactance inductive du RDP se calculent par:

$$\begin{array}{ll} R_r = \alpha \cdot Z_r & \textit{résistance} \\ X_r = Z_r\sqrt{1-\alpha^2} = \omega L_r \; ; & \textit{réactance} \\ L_r = X_r/(2\pi f) & \textit{inductance} \end{array}$$

Le coefficient α est donné par ce tableau

U (kV)	6 kV	20 kV	150 kV
α	0.3	0.2	0.1

4.2 Circuit équivalent du générateur

Le circuit équivalent du générateur G est une source de tension **Eg** en série avec une impédance interne **Zg (Rg, Xg),** (dite aussi impédance de court-circuit)

- Eg: est la tension à vide du générateur en régime de service
- La réactance **Xg** interne du générateur en régime de service. En régime normal (synchrone) elle est donnée par $X_g(\Omega) = \frac{X\%}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_n}$; $\begin{array}{l} \text{Un: Tension nominale} \\ \text{Sn: Puissance nominale} \end{array}$

La résistance du générateur est soit mesurée soit négligée. Généralement elle est négligeable devant la réactance

La tension à vide du générateur est de la forme: $E_g = K_1 \Phi N = K\, J_{ext} N$; Où: Jext est le courant d'excitation; N est la vitesse de rotation

Selon le régime de service, les différentes réactances relatives en % d'un alternateur sont

Générateur de type pôles	Lisses	Saillants
X'': Réactance sub-transitoire (amortisseurs) %	10 - 20	15 - 25
X': Réactance transitoire (Induit – Inducteur) %	15 - 25	25 - 35
Xs: Réactance synchrone (permanente) %	150 - 230	70 - 120

4.3 Circuits équivalents aux lignes et aux jeux de barres

On définit la résistance et la réactance linéique d'une liaison en (Ω/m) par:

$$\mathrm{R_0} = \frac{\rho(\Omega.\mathrm{m})}{\mathrm{S(m^2)}}\,; \qquad \mathrm{X_0} = \left[15.7 + 144.44\log_{10}\left(\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{r}}\right)\right]10^{-6}$$

Où ρ: résistivité électrique, s: section, r: rayon et d: distance moyenne entre conducteurs, ($X_0 = \omega L_0 = 2\pi f L_0$) ; L_0 étant l'inductance linéique en H/m.

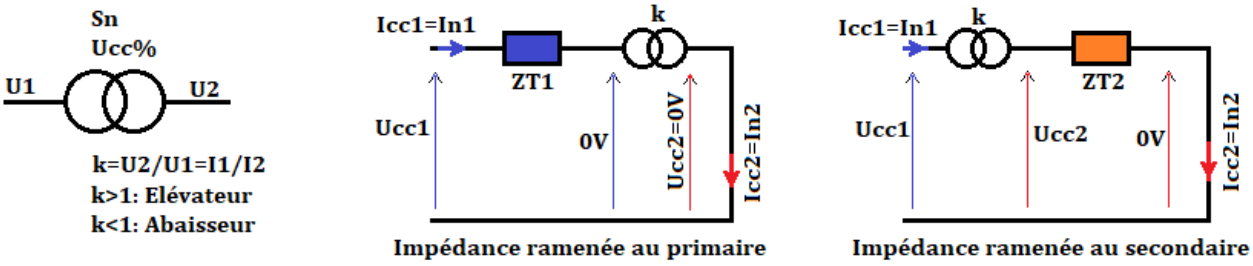
L'impédance d'une liaison dépend de sa longueur *l* et ses constantes linéiques Ro et Xo.

$$Z_l = R_l + jX_l = (R_0 + jX_0) \cdot l \quad \text{où} \quad \begin{array}{l} R_l = R_0 \cdot l \\ X_l = X_0 \cdot l \end{array}$$

Remarques: Pour un disjoncteur basse tension : $R_D \approx 0$; $X_D \approx 0.15\ m\Omega$

La puissance de coupure (Pouvoir de coupure = 3x tension assignée x courant coupé) d 'un disjoncteur branché sur un accès doit être supérieur ou égale à la puissance de court-circuit en ce point du réseau.

4.4 Circuit équivalent au transformateur



La tension Ucc est la tension réduite appliquée au primaire pour avoir le courant nominal au secondaire court-circuitée.

$$\begin{array}{l} Z_{T1} = \frac{U_{cc1}}{I_{n1}} \\ Z_{T2} = \frac{U_{cc2}}{I_{n2}} \end{array} \Longrightarrow \frac{Z_{T1}}{Z_{T2}} = \frac{1}{k^2}$$

Avec: $S_n = \sqrt{3} U_n I_n \rightarrow I_n = \frac{S_n}{\sqrt{3} U_n}$; $U_{cc1} = \frac{U_{cc}\% \times U_{n1}}{100}$

$$Z_{T1} = \frac{U_{cc1}}{I_{n1}} = U_{cc1} \times \frac{\sqrt{3} U_{n1}}{S_n}$$

Généralement on admet que cette impédance est équivalent à une réactance; la résistance soit elle est mesurée à partir des pertes soit négligeable.