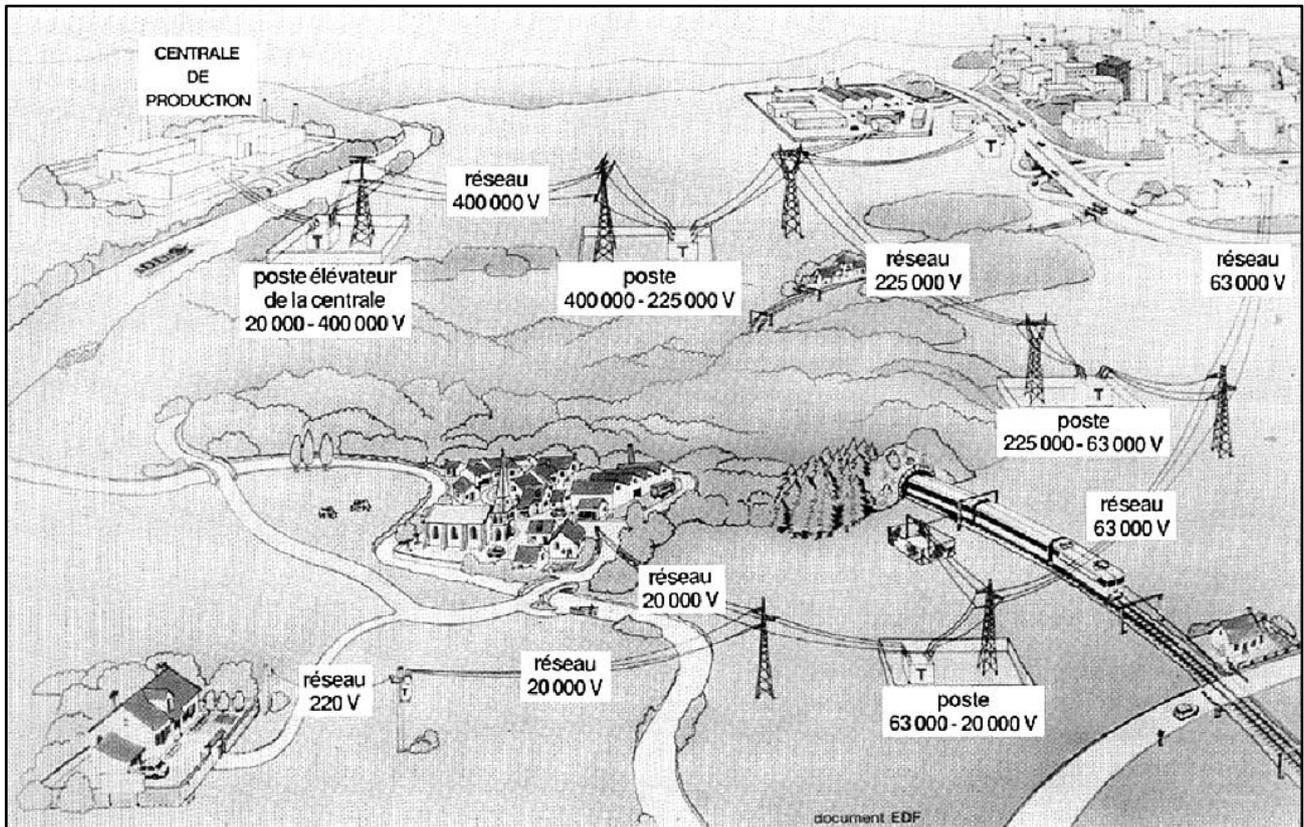


# Gestion de l'énergie sur le réseau de transport d'électricité

La prise électrique que nous connaissons tous, est l'aboutissement de tout un réseau de production et de transport de l'énergie électrique. La figure suivante vous en donne un aperçu.



Dans cette série d'exercices, nous aborderons plusieurs aspects des problèmes liés au transport et à la gestion de l'énergie électrique. Ces exercices sont indépendants, mais peuvent constituer une progression.

Exercice 1 : Réduction de l'intensité du courant appelé par une charge inductive.

Exercice 2 : Facteur de puissance d'une installation triphasée.

Exercice 3 : De l'utilité de transporter l'énergie électrique en haute tension.

Exercice 4 : Choix de la section des conducteurs aériens.

Exercice 5 : Chute de tension dans une ligne aérienne.

Exercice 6 : Chute de tension entre la source et l'utilisateur en fonction de la distance.

Exercice 7 : Contrôle de la tension et optimisation des performances de la ligne.

Exercice 8 : Câbles souterrains.

**Dans l'ensemble des exercices, les tensions et les courants sont sinusoïdaux, les charges sont équilibrées.**

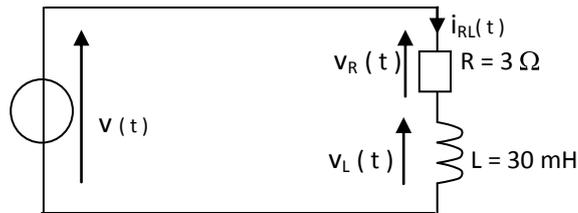
## Exercice 1 : Réduction de l'intensité du courant absorbé par une charge inductive

Dans ce premier exercice, nous verrons comment réduire le courant absorbé par une charge inductive.

Ce problème est composé de 2 parties qui se suivent : Partie A : charge RL - Partie B : charge RL + C

### Partie A : Charge inductive (RL série)

Le réseau alimente une installation sous une tension sinusoïdale  $v(t)$  de valeur efficace  $V = 230$  V et de fréquence  $f = 50$  Hz. L'installation est modélisée par une charge RL série.



On a mesuré la valeur efficace du courant absorbé par la charge :  $I_{RL} = 23.2$  A

A.1. Quel appareil a permis de faire cette mesure ? Précisez la mesure qui a été faite : DC, AC ou AC+DC ?

A.2. Exprimez et calculez la valeur efficace  $V_R$  de la tension aux bornes de la résistance et la valeur efficace  $V_L$  de la tension aux bornes de la bobine.

A.3. Représentez sur le document réponse les vecteurs de Fresnel associés aux grandeurs  $i_{RL}(t)$ ,  $v_R(t)$  et  $v_L(t)$ .  
On placera le vecteur  $\vec{I}_{RL}$  à l'horizontale.

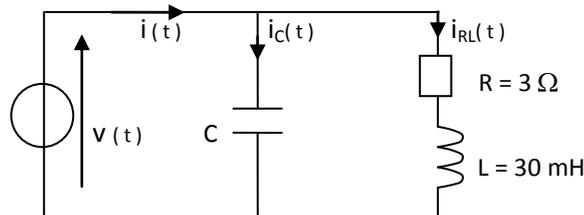
A.4. Précisez la relation vectorielle utilisée puis tracez  $\vec{V}$ .

A.5. Retrouvez par la mesure de  $\|\vec{V}\|$ , la valeur efficace  $V$  de la tension du réseau.

A.6. Déterminez par le calcul le déphasage  $\varphi_1$  de la tension  $v(t)$  par rapport au courant  $i_{RL}(t)$ .

### Partie B : Charge inductive associée au condensateur

Afin de diminuer l'intensité du courant délivré par le réseau, on place un condensateur en parallèle de la charge. Le courant fourni par le réseau est à présent noté  $i(t)$ .



On donne

$C = 285 \mu\text{F}$

B.1. Exprimez et calculez la valeur efficace  $I_C$  de l'intensité du courant  $i_C(t)$ .

B.2. Sur le même document réponse, représentez alors le vecteur de Fresnel associé à  $i_C(t)$ .

B.3. Précisez la relation utilisée puis tracez  $\vec{I}$ .

B.4. Déterminez graphiquement la valeur efficace  $I$  de l'intensité du courant  $i(t)$ .

B.5. Déterminez graphiquement le déphasage  $\varphi_2$  de la tension  $v(t)$  par rapport au courant  $i(t)$ .

B.6. Déduisez-en la nature de la charge  $\{RL + C\}$ .

DOCUMENT REPONSE

Tracez les vecteurs associés aux **courants en rouge** et ceux associés aux **tensions en vert**.

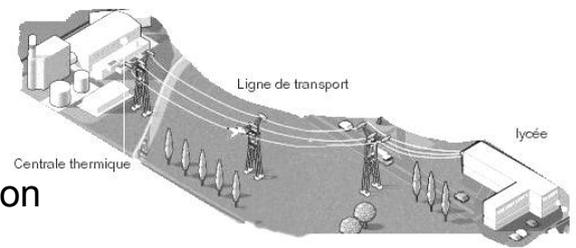
Tracez les **constructions vectorielles au crayon**.

Échelles :

1 cm  $\Leftrightarrow$  3 A

1 cm  $\Leftrightarrow$  15 V





## Exercice 2: Facteur de puissance d'une installation

Le facteur de puissance nous dit dans quelle proportion le courant appelé par la charge transporte de la puissance active (chauffage, éclairage, traction...) ou participe à la puissance réactive (échangée entre la charge et la source et donc pas disponible !). Plus le facteur de puissance est proche de 1, plus le courant débité par la centrale est proche de ce qui est strictement nécessaire à l'utilisateur (la puissance active).

Le réseau sinusoïdal triphasé 400 V / 50 Hz alimente le lycée (charge triphasée équilibrée).

La puissance active consommée par le lycée est  $P = 400 \text{ kW}$ .

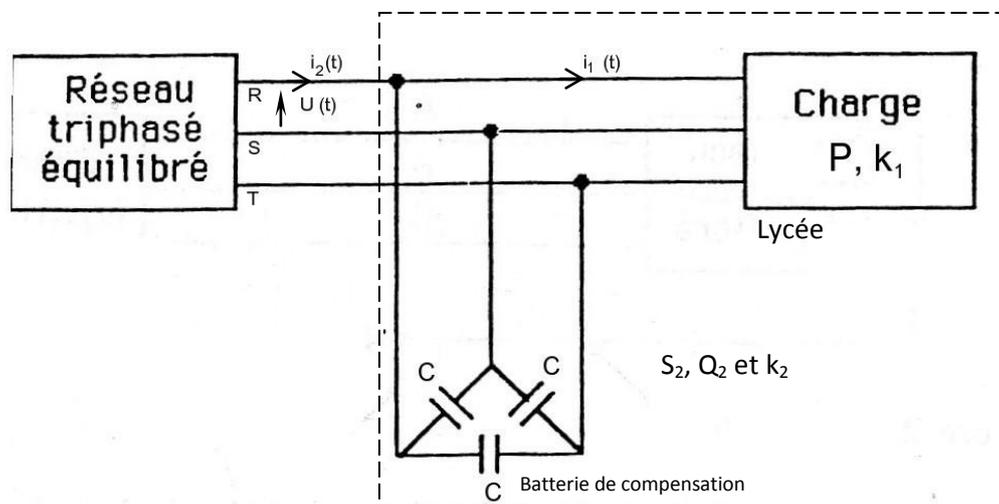
Le facteur de puissance du lycée est  $k_1 = 0.91$

- Calculez alors l'intensité  $I_1$  du courant en ligne ainsi que la puissance réactive  $Q_1$  consommée.
- Calculez la puissance apparente  $S_1$ .

La puissance apparente  $S$  est la grandeur de référence qui sert à dimensionner l'installation électrique, c'est-à-dire sa taille et donc son prix.

On diminue la puissance apparente d'une installation en abaissant la part de puissance réactive consommée : on rehausse le facteur de puissance.

On peut réaliser cela à l'aide d'une batterie de condensateurs. La puissance réactive n'est plus fournie par le réseau mais échangée entre les éléments inductifs et capacitifs.



On souhaite obtenir un nouveau facteur de puissance  $k_2 = 0.93$ .

- Quelle est la puissance  $P_2$  consommée ? Calculez les nouvelles valeurs de la puissance apparente  $S_2$  de l'installation, de l'intensité  $I_2$  du courant en ligne, et de la puissance réactive  $Q_2$ .
- Déduisez-en la valeur de la puissance réactive  $Q_c$  fournie par la batterie de condensateurs.
- Déterminez la capacité  $C$  des condensateurs couplés en triangle.
- Calculez l'intensité  $I_3$  du courant en ligne si le facteur de puissance était  $k_3 = 1$  (compensation parfaite).

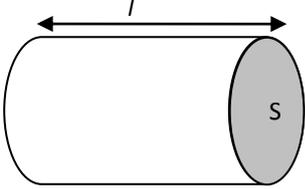
### Exercice 3: De l'utilité de transporter l'énergie électrique en haute tension

Les conducteurs qui transportent l'énergie électrique présentent naturellement une résistance. C'est la résistance des lignes qui est responsable de pertes par effet Joule et qu'il conviendra de minimiser. Ces pertes sont proportionnelles au carré du courant et, à puissance distribuée donnée, inversement proportionnelles au carré de la tension de service. A ce titre, il est intéressant d'utiliser une tension élevée pour le transport. Cela permet de diminuer les pertes Joules ainsi que la section des conducteurs.

L'appareil permettant d'ajuster les niveaux de tensions en alternatif est le transformateur. Il conviendra d'augmenter la tension (à 225 kV ou 400 kV) pour le transport et de l'abaisser (à 230 V) pour la distribution.

On rappelle l'expression de la résistance d'un conducteur cylindrique :

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



$l$  la longueur du conducteur exprimée en m

$S$  la surface en  $m^2$  appelée section.

$\rho$  est la résistivité du matériau exprimée en  $\Omega \cdot m$

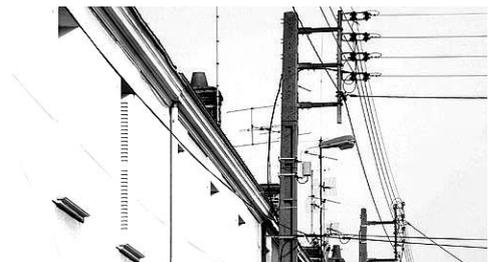


Câble HT

Pour les lignes aériennes, le cuivre n'est pas utilisé car il est trop lourd ! On utilise des alliages aluminium – acier, plus légers, dont la résistivité est de l'ordre de  $30 \cdot 10^{-9} \Omega \cdot m$ .

On assimilera le faisceau de conducteurs (image ci-contre) à un unique conducteur de section  $S$ .

Une ligne triphasée 400 V / 50 Hz alimente des habitations et transporte, sur une longueur de 200 m dans trois conducteurs de section  $185 \text{ mm}^2$  (section adaptée à l'intensité), une puissance apparente  $S = 90 \text{ kVA}$ .



- Calculez l'intensité  $I$  du courant en ligne.
- Calculez la résistance de chaque fil de ligne.
- Déterminez les pertes joules dans la ligne triphasée.

La ligne, transportant la même puissance apparente  $S = 90 \text{ kVA}$  sur une longueur de 200 m, est à présent alimentée en triphasée 20 kV / 50 Hz et les conducteurs ont une section de  $54.6 \text{ mm}^2$  (adaptée à l'intensité).

- Calculez l'intensité  $I$  du courant en ligne.
- Calculez la résistance de chaque fil de ligne.
- Déterminez les pertes joules dans la ligne triphasée.

L'énergie perdue par effet joule sur les réseaux HT et MT est estimée à 30 TWh/an, soit 6 % de la production annuelle.



## Exercice 4 : Effet de peau - Choix de la section des conducteurs aériens

### Effet de peau

Ce phénomène d'origine électromagnétique existe pour les conducteurs parcourus par un courant alternatif. Plus la fréquence du courant est élevée, moins le courant pénètre au cœur du conducteur. La section utile de conduction étant réduite, il en résulte une augmentation de la résistance du conducteur.

On veut faire circuler un courant d'intensité 1200 A dans un conducteur de 1200 mm<sup>2</sup> de section. En prenant en compte l'effet de peau, on calculera les pertes joules lorsque le courant circule dans un conducteur unique puis lorsqu'il est divisé en multipliant le nombre de conducteurs (on raisonnera à section égale).

On étudiera trois cas :

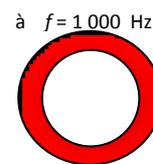
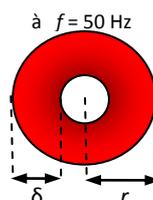
- Un conducteur de 1200 mm<sup>2</sup> parcouru par un courant d'intensité 1200 A.
- Deux conducteurs de 600 mm<sup>2</sup>, chacun parcouru par un courant d'intensité 600 A.
- Trois conducteurs de 400 mm<sup>2</sup>, chacun parcouru par un courant d'intensité 400 A.



Ligne THT 400 kV

L'épaisseur de peau  $\delta$  est la largeur caractéristique de la zone où se concentre le courant.

On a  $\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu}}$



- ▶  $\rho$  est la résistivité du matériau exprimée en  $\Omega \cdot m$
- ▶  $\omega$  en rad/s est la pulsation du courant ; on rappelle  $\omega = 2\pi \cdot f$  où  $f$  est la fréquence en Hz.
- ▶  $\mu$  est la perméabilité magnétique du milieu exprimée en H/m (Henry/mètre).

On considère une ligne HT de 1 km de long. Les conducteurs en alliages aluminium – acier ont pour résistivité  $\rho = 30 \cdot 10^{-9} \Omega \cdot m$ . Les lignes, étant aériennes, sont dans un milieu de perméabilité  $\mu = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$ .

1. Calculez l'épaisseur de peau  $\delta$  à la fréquence de 50 Hz.
2. Exprimez, en fonction de l'épaisseur de peau  $\delta$  et du rayon  $r$  du conducteur, la section utile  $S_U$  du conducteur :  $S_U = S - S_{INT}$ . Déduisez-en la section utile  $S_U$  de chaque type de conducteur.
3. Calculez alors les résistances  $R_{1200}$ ,  $R_{600}$  et  $R_{400}$  des conducteurs à 50 Hz. On rappelle l'expression  $R = \rho \cdot \frac{l}{S_U}$
4. Déduisez-en, dans chaque cas (1x1200mm<sup>2</sup>, 2x 600 mm<sup>2</sup> ou 3x400 mm<sup>2</sup>), les pertes joules dans l'ensemble des câbles.

Câbles de 1 km	Rayon $r$ (mm)	Section utile (mm <sup>2</sup> )	R à 50 Hz	Pertes joules par km
1200 A dans 1200 mm <sup>2</sup>				
2x 600 A dans 600 mm <sup>2</sup>				
3x 400 A dans 400 mm <sup>2</sup>				

5. Discutez alors le choix de la section des câbles.

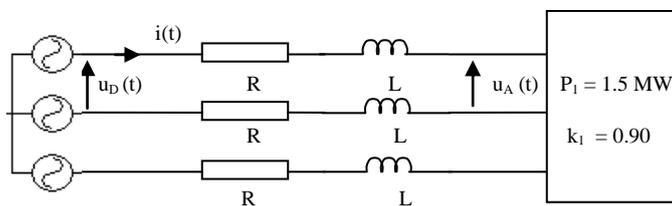
## Exercice 5: Chute de tension dans une ligne aérienne

Cet exercice aborde la chute de tension occasionnée par la ligne de transport.

Une ligne triphasée moyenne tension de 50 km alimente un récepteur triphasé équilibré qui consomme une puissance active  $P_1$  de 1.50 MW et impose un facteur de puissance  $k_1$  de 0.9. La valeur efficace de la tension entre phases à l'arrivée de la ligne est  $U_A = 20$  kV, sa fréquence est 50 Hz.

En plus de sa résistance, la ligne a une autre caractéristique qui est son inductance par unité de longueur. Ainsi **chaque fil de ligne** a une résistance de  $220 \text{ m}\Omega / \text{km}$  et une inductance de  $1.2 \text{ mH} / \text{km}$ .

► Le but est de calculer la valeur efficace  $U_D$  de la tension composée au départ de la ligne.



1. Exprimez et calculez la valeur efficace de l'intensité  $I$  du courant dans un fil de ligne.
2. Exprimez et calculez la puissance réactive  $Q_1$  absorbée par la charge.
3. Exprimez et calculez :
  - La résistance  $R$  et l'inductance  $L$  pour chaque fil de ligne de longueur 50 km.
  - Les puissances active  $P_2$  et réactive  $Q_2$  consommées par la ligne.
4. Pour l'ensemble {ligne + récepteur}, exprimez et calculez :
  - Les puissances active  $P_T$  et réactive  $Q_T$  transportées.
  - La puissance apparente  $S_T$  transportée.
5. Déduisez-en la valeur efficace de la tension entre phases  $U_D$  au départ de la ligne ainsi que la chute de tension relative  $\Delta U/U_D$ .

La chute de tension relative  $\Delta U/U_D$ , admissible sur le réseau moyenne tension (MT) est de 7.5 %

6. Cette contrainte est-elle respectée ?

*Dans les exercices 6 et 7, on étudiera une ligne de transport 400 kV. Pour ces lignes, on utilise des câbles de  $570 \text{ mm}^2$  dont les caractéristiques sont  $30 \text{ m}\Omega / \text{km}$  et  $1.1 \text{ mH} / \text{km}$ . Aussi le caractère inductif de la ligne sera largement prépondérant et par conséquent on négligera la résistance de la ligne.*

## Exercice 6: Chute de tension en fonction de la distance

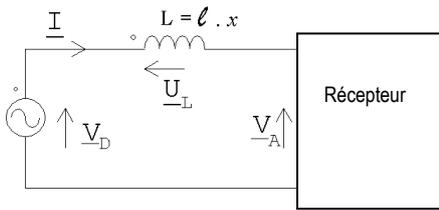
Si la résistivité de la ligne est responsable des pertes par effets Joules, en haute tension, c'est l'inductance de la ligne qui est la principale cause de la chute de tension entre le site de production et le récepteur. Cette inductance n'est pas localisée aussi parlera-t-on d'inductance linéique, exprimée en mH / km.

La chute de tension augmentera donc avec la distance entre la source et la charge.

La ligne triphasée étant équilibrée, l'étude de la chute de tension se fera sur les tensions simples.

### A. Etude de la chute de tension en fonction de la distance au site de production

Le schéma de l'ensemble source, ligne et récepteur est le suivant :



On note  $x$ , la distance en km entre la centrale et le récepteur.

Pour la ligne, on donne l'inductance linéique :  $l = 1.1$  mH/km.

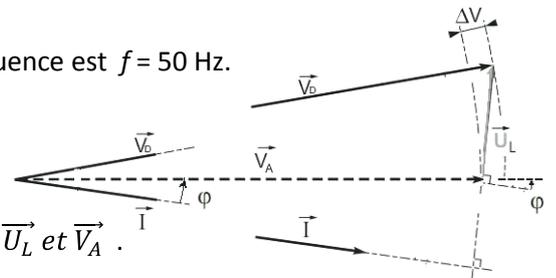
Le récepteur est globalement inductif.

On a  $\cos \varphi = 0.90$ , le facteur de puissance du récepteur.

Au départ de la ligne, on donne  $V_D = 400$  kV /  $\sqrt{3} = 230$  kV et la fréquence est  $f = 50$  Hz.

A.1. Exprimez  $U_L$  en fonction de  $l$ ,  $x$ ,  $I$  et  $\omega$ .

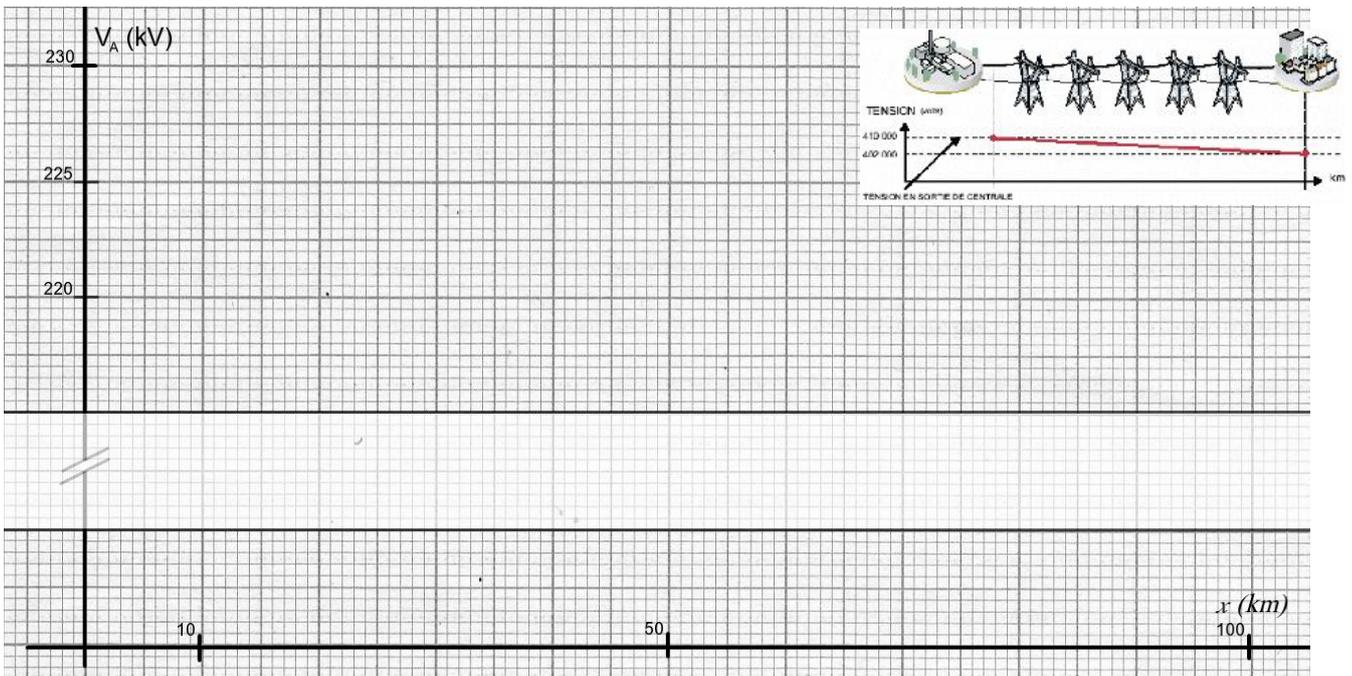
A.2. Exprimez  $V_A$  en fonction de  $V_D$ ,  $l$ ,  $x$ ,  $I$  et  $\omega$ .



On donne l'allure de la représentation de Fresnel des vecteurs  $\vec{V}_D, \vec{I}, \vec{U}_L$  et  $\vec{V}_A$ .

A.3. En confondant  $\Delta V$  avec la projection sur l'axe horizontal de  $U_L$ , établissez  $V_A = V_D - U_L \cdot \sin(\varphi)$ .

A.4. On donne  $I = 830$  A. Tracez alors  $V_A = f(x)$  en calculant un point tous les 20 km.



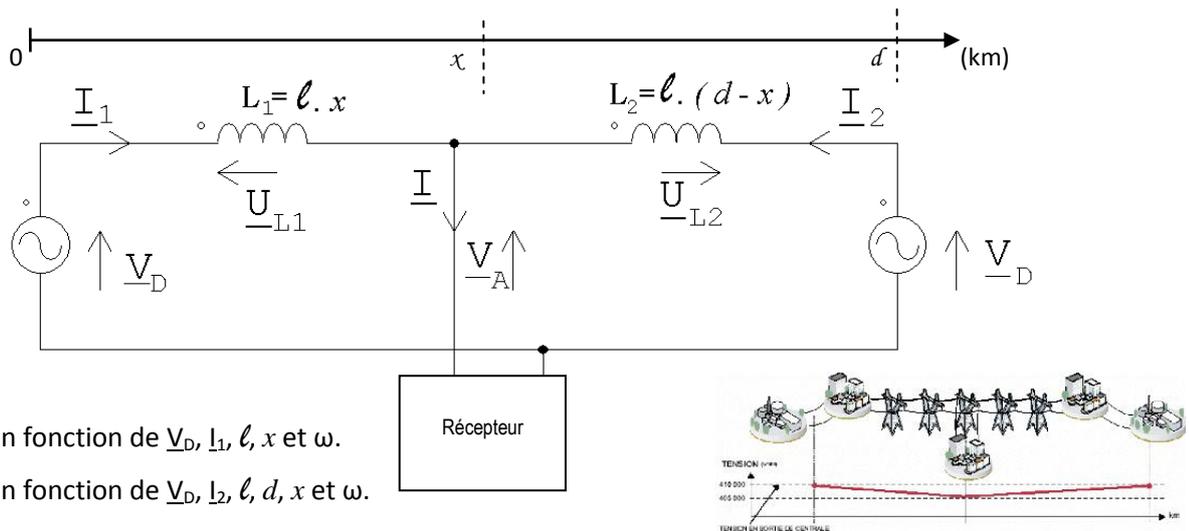
Sur le réseau HT la tension composée ne doit descendre en aucun point en deçà de  $U_{\min} = 380$  kV.

A.5. A partir de quelle distance cette contrainte n'est-elle plus respectée ?

## B. Interconnexion des centrales

Le réseau réalise l'interconnexion des différentes centrales de production de l'énergie électrique. Cela permet de répartir entre les différentes sources la puissance appelée par les consommateurs, mais aussi d'assurer la continuité du service en cas d'arrêt de production d'un site pour cause de défaut ou pour sa maintenance.

Nous allons voir dans cette partie que la connexion de plusieurs centrales permet également de limiter la chute de tension en ligne. On note  $d$  la distance entre les deux centrales.



B.1. Exprimez  $V_A$  en fonction de  $V_D$ ,  $I_1$ ,  $l$ ,  $x$  et  $\omega$ .

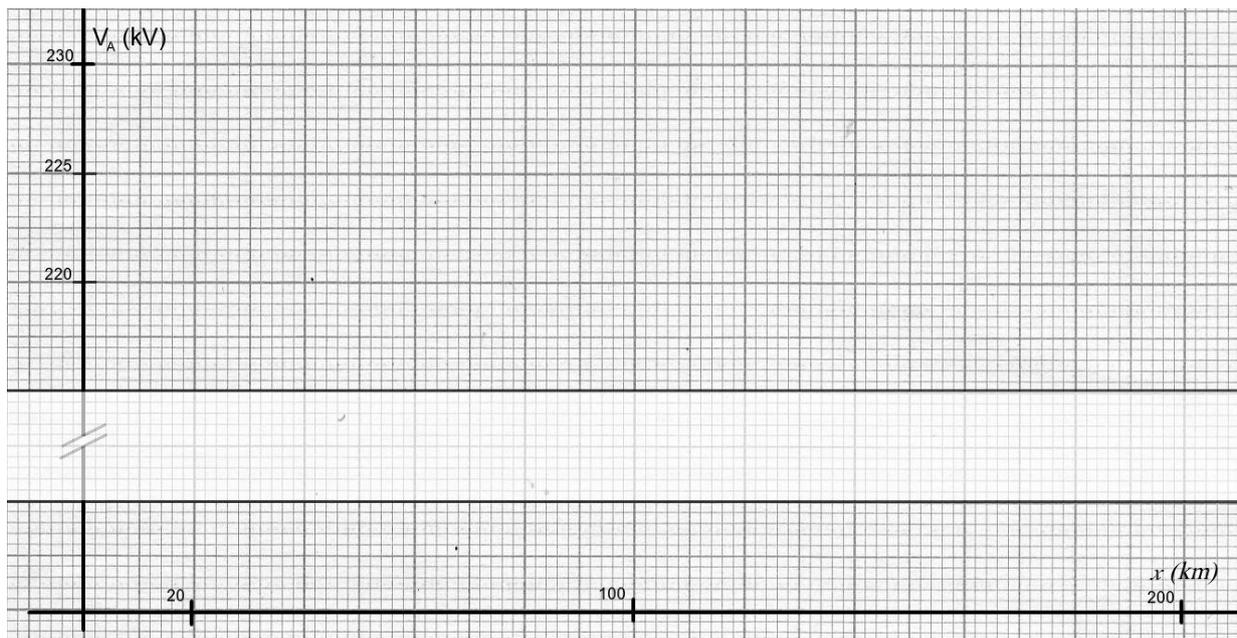
B.2. Exprimez  $V_A$  en fonction de  $V_D$ ,  $I_2$ ,  $l$ ,  $d$ ,  $x$  et  $\omega$ .

On fait l'hypothèse que les tensions aux deux extrémités de la ligne sont synchrones : même valeur efficace, même fréquence, même phase. Cela nous amène à écrire que la tension aux bornes de la ligne est nulle.

B.3. Déduisez de l'hypothèse précédente une relation entre  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $d$  et  $x$ .

B.4. A l'aide de la loi des nœuds, exprimez  $I_1$  en fonction de  $I_2$ ,  $d$  et  $x$ .

B.5. Avec la relation  $V_A = V_D - U_{L1} \cdot \sin(\varphi)$ , tracez  $V_A = f(x)$  avec  $I = 830$  A,  $\cos \varphi = 0.9$  et  $d = 200$  km.



B.6. La tension minimale ( $U_{\min} = 380$  kV) est-elle respectée en tout point ?

## Exercice 7 : Optimisation des performances d'une ligne

La tension constitue, avec la fréquence, un des principaux paramètres de la sûreté du réseau. Nous verrons que le contrôle de la tension en différents points de la ligne permet d'augmenter la puissance transmissible.

Le réseau triphasé 400 kV / 50 Hz relie deux régions A et B.

La ligne étant équilibrée, l'étude se fera en monophasé.

Dans cet exercice on ne prendra pas en compte le caractère résistif de la ligne.

### A. Puissance transportée par une ligne.

Dans cette partie on cherche la puissance maximale que peut transporter la ligne.

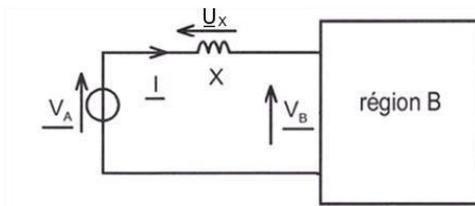


Figure 1

$\varphi_A$  est le déphasage de  $\underline{V}_A$  par rapport à  $\underline{I}$  :  $\varphi_A = (\vec{I}, \vec{V}_A)$

$\varphi_B$  est le déphasage de  $\underline{V}_B$  par rapport à  $\underline{I}$  :  $\varphi_B = (\vec{I}, \vec{V}_B)$

$\theta$  est le déphasage de  $\underline{V}_A$  par rapport à  $\underline{V}_B$  :  $\theta = (\vec{V}_B, \vec{V}_A)$

$X = L \omega$  est la réactance de la ligne

#### A.1. Puissances actives et réactives : relations générales

A.1.1 A partir des conventions choisies (figure 1) précisez la signification (reçue ou fournie) des puissances  $P_A$ ,  $P_B$ ,  $Q_A$  et  $Q_B$  en fonction de leur signe.

A.1.2 Exprimez la puissance active  $P_A$  fournie par la région A en fonction de  $V_A$ ,  $I$  et  $\varphi_A$ .

A.1.3 Exprimez la puissance active  $P_B$  reçue par la région B en fonction de  $V_B$ ,  $I$  et  $\varphi_B$ .

A.1.4 Quelle est la puissance active consommée par la ligne ? Quelle est la relation entre  $P_A$  et  $P_B$  ?

A.1.5 Exprimez la puissance réactive  $Q_A$  fournie par la région A en fonction de  $V_A$ ,  $I$  et  $\varphi_A$  puis de  $P_A$  et  $\varphi_A$ .

A.1.6 Exprimez la puissance réactive  $Q_B$  reçue par la région B en fonction de  $V_B$ ,  $I$  et  $\varphi_B$  puis de  $P_B$  et  $\varphi_B$ .

A.1.7 Exprimez la puissance réactive  $Q_X$  consommée par la ligne de transport triphasée.

A.1.8 Quelle relation y a-t-il entre  $Q_A$ ,  $Q_B$  et  $Q_X$  ? Quelle relation y a-t-il entre  $\varphi_A$ ,  $\varphi_B$ , et  $\theta$  ?

#### A.2. La région B est résistive ( $\varphi_B = 0$ ). Cas général $V_B < V_A$

A.2.1 Quelle est ici la relation entre  $\varphi_A$  et  $\theta$  ? Exprimez alors  $P_A$  en fonction de  $V_A$ ,  $I$  et  $\theta$ .

A.2.2 Ecrivez la relation entre  $\underline{V}_A$ ,  $\underline{V}_B$ ,  $X$  et  $\underline{I}$ .

A.2.3 Tracez l'allure du diagramme de Fresnel, prenant  $\vec{V}_B$  à l'horizontal, et dans le cas où  $\vec{V}_A$  est en avance sur  $\vec{V}_B$  ( $\theta > 0$  : c'est-à-dire que l'ensemble {ligne+région B} est globalement inductif).

A.2.4 A l'aide des relations trigonométriques dans le triangle, montrez que l'on a  $XI = V_A \cdot \sin\theta$

A.2.5 Déduisez-en que  $P_A = \frac{V_A^2}{X} \cdot \cos\theta \sin\theta = \frac{V_A^2}{2X} \sin 2\theta$

A.2.6 Pour quelle valeur de  $\theta$ , la puissance active  $P_A$  transmissible est-elle maximale ?

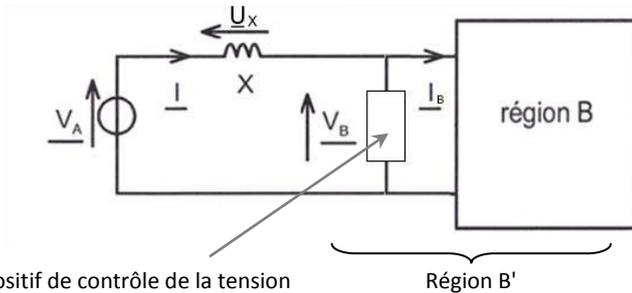
Application numérique :  $V_A = 230$  kV et  $X = 130$   $\Omega$

A.2.7 Calculez  $P_{tr}$ , la puissance active maximale transmissible et la valeur de la tension  $V_B$  dans ce cas.

## B. Contrôle de la tension en bout de ligne : $V_B = V_A$ . Limites

### B.1. Contrôle de la tension

Un dispositif placé en bout de ligne assure le contrôle de la tension ( $V_B = V_A$ ). Ce dispositif ne consomme pas de puissance active de sorte que l'on a toujours  $P_B = P_A$ .



Dispositif de contrôle de la tension

Région B'

La région B est résistive :  $\varphi$  le déphasage de  $\underline{V}_B$  par rapport à  $\underline{I}_B$  est nul :  $\varphi = (\vec{I}_B, \vec{V}_B) = 0$

Par contre la région B' composée de l'ensemble {région B + contrôle de la tension} présente un déphasage non nul  $\varphi_B$  de  $\underline{V}_B$  par rapport à  $\underline{I}$  :  $\varphi_B = (\vec{I}, \vec{V}_B) \neq 0$ .

B.1.1 Tracez l'allure du diagramme de Fresnel à l'aide des indications suivantes :

- Prenez  $\vec{V}_B$  comme origine des phases.
- $\vec{V}_A$  et  $\vec{V}_B$  ont même origine. Sachant que  $V_B = V_A$ , sur quelle figure géométrique se trouve l'extrémité de  $\vec{V}_A$  ?
- $\vec{V}_A$  est en avance sur  $\vec{V}_B$  ( $\theta > 0$ ). Placez le vecteur  $\vec{V}_A$  (allure) et déduisez-en le vecteur  $\vec{U}_X$  puis la direction de  $\vec{I}$ .
- Vous ferez figurer les angles  $\varphi_A$ ,  $\varphi_B$  et  $\theta$ .

B.1.2 Quelle propriété a le triangle formé par les vecteurs  $\vec{V}_A$ ,  $\vec{V}_B$  et  $\vec{U}_X$  ?

B.1.3 Quelle relation y a-t-il alors entre  $\varphi_A$  et  $\varphi_B$  ? Exprimez alors  $\varphi_A$  et  $\varphi_B$  en fonction de  $\theta$ .

B.1.4 En projetant les vecteurs  $\vec{V}_A$  et  $\vec{U}_X$  à la verticale, montrez que l'on a  $XI \cos \varphi_A = V_A \cdot \sin \theta$

B.1.5 Montrez alors que l'on a  $P_A = \frac{V_A^2}{X} \cdot \sin \theta$

B.1.6 Pour quelle valeur de  $\theta$ , la puissance active  $P_A$  transmissible est-elle maximale ?

Application numérique :  $V_B = V_A = 230$  kV et  $X = 130 \Omega$

B.1.7 Calculez la puissance active maximale transmissible  $\hat{P}$  =

B.1.8 Comparez les valeurs des puissances actives maximales transmissibles  $\hat{P}$  et  $P_{tr}$  du A.2.5.

B.1.9 Quel est alors le comportement global (inductif, résistif, capacitif) de la région B' ?

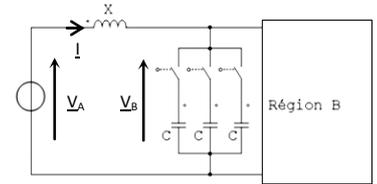
Le contrôle de la tension permet de doubler la puissance transmissible. On voit également que le contrôle de la tension est lié à l'injection de puissance réactive au niveau de la région B'.

La région B ayant un facteur de puissance égal à 1, on a  $Q_B = 0$ .

On notera  $Q_{B'}$  la puissance réactive reçue par le dispositif de contrôle de la tension (en convention récepteur).

B.1.10 Calculez  $Q_A$ ,  $Q_{B'}$  et  $Q_X$ , lorsque la puissance active transmise est maximale.

Le dispositif de contrôle de la tension, connecté en tête de la région B, et permettant d'injecter du réactif, est un gradin de 3 condensateurs, chacun de capacité  $C = 8 \mu\text{F}$ .



Par la suite on notera  $Q_C = -Q_B$  la puissance réactive fournie par le dispositif de contrôle de la tension.

Initialement la tension  $V_B$  est de 163 kV (situation du A.2.7). On connecte un condensateur sur le gradin.

B.1.11 Calculez la puissance réactive  $Q_C$  fournie au réseau.

Au bout de 125 ms, la tension  $V_B$  passe à 190 kV et l'on connecte le 2<sup>ème</sup> condensateur.

B.1.12 Calculez la puissance réactive  $Q_C$  fournie au réseau.

Après le régime transitoire,  $V_B$  atteint 210 kV et l'on connecte le 3<sup>ème</sup> condensateur.

B.1.12 Calculez la puissance réactive  $Q_C$  fournie au réseau.

Les gradins de condensateurs sont des dispositifs statiques de compensation de puissance réactive. Leur connexion au réseau et leur fonctionnement en tout ou rien permet d'injecter de la puissance réactive par « paliers ». Ce dispositif ne permet qu'un réglage par paliers de la tension au nœud de connexion. De plus son efficacité diminue en cas de baisse de tension puisque la puissance réactive fournie dépend du carré de la tension.

Le compensateur synchrone est un autre dispositif permettant d'injecter du réactif sur le réseau. C'est un moteur synchrone fonctionnant à vide (il n'absorbe donc pas de puissance active, aux pertes près). Le réglage du courant d'excitation de la roue polaire permet de contrôler la puissance réactive injectée et donc un réglage continu de la tension au nœud de connexion ( $Q$  n'est plus dépendant du niveau de tension). Leur prix d'investissement et leur entretien est onéreux. Ils ont été peu à peu supplantés par les compensateurs statiques.

Le compensateur statique de puissance réactive (CSPR, ou SVR en anglais) est un dispositif plus récent qui associe des condensateurs, des bobines et des convertisseurs d'électronique de puissance. Il permet d'injecter graduellement de la puissance réactive et permet ainsi d'ajuster la tension au point de connexion.

## B.2. Limites

B.2.1 En projetant le vecteur  $\vec{V}_A$  sur la direction de  $\vec{U}_X$ , montrez que la valeur efficace de l'intensité du courant en ligne est  $I = 2 \frac{V_A}{X} \sin \frac{\theta}{2}$

B.2.2 Calculez alors la valeur efficace  $I$  de l'intensité du courant en ligne pour la valeur de  $\theta$  permettant de transporter la puissance maximale.

### Limite thermique

En réalité, afin de limiter l'échauffement des conducteurs, l'intensité du courant en ligne ne peut pas dépasser la valeur efficace nominale  $I_n = 1450 \text{ A}$ .

B.2.3 Quelle valeur de  $\theta_n$  conduit à la limite thermique ?

B.2.4 Précisez alors la valeur de  $P_n$  la puissance active nominale que peut transporter la ligne.

### Limite de stabilité

En pratique, l'angle  $\theta_s$  ne peut pas dépasser la valeur de  $18^\circ$  pour ne pas compromettre la stabilité du réseau.

B.2.5 Calculez la puissance active  $P_S$  transmissible à la région B lorsque  $\theta = 18^\circ$ .

B.2.6 Donnez dans ce cas la valeur efficace  $I_S$  de l'intensité du courant en ligne.

B.2.7 Quelle conséquence la limite de stabilité impose-t-elle ?

B.2.8 Comparez les valeurs des puissances actives maximales transmissibles pour la valeur de  $\theta = 18^\circ$

- Sans contrôle de la tension (relation établie au A.2.5)  $P_{tr}(\theta = 18^\circ) =$
- Avec contrôle de la tension (relation établie au B.2.5)  $P_S =$

En restant dans la limite de stabilité, le contrôle de la tension et l'injection de puissance réactive permettent d'augmenter de 5 % la puissance transmissible. On reste cependant loin des possibilités offertes par la limite thermique et de la puissance nominale transmissible sur réseau.

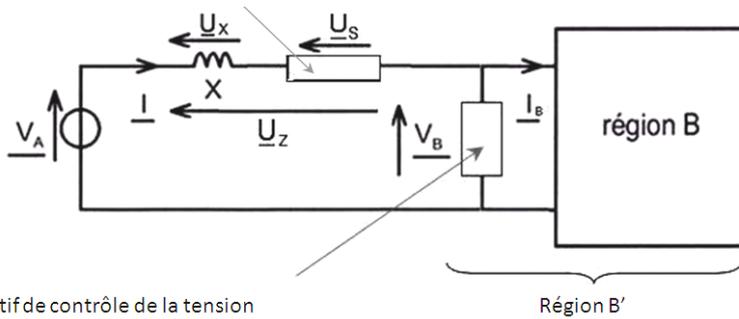
### C. Modification de l'impédance de ligne

Afin d'améliorer les capacités de transport de la ligne sans compromettre la stabilité du réseau ni dépasser la limite thermique, on insère en série avec la ligne un dispositif permettant de modifier son impédance.

Ce dispositif est un condensateur fixe de capacité C. Les relations établies dans la partie A restent valables.

**L'objectif est de pouvoir transporter 300 MW.**

Dispositif série de modification de l'impédance de ligne



On note :

$jX$  l'impédance propre de la ligne  
 $Z_S$  l'impédance du condensateur érie  
 $Z$  l'impédance équivalente de la ligne

La région B est résistive et le contrôle de tension assure  $V_B = V_A = 230$  kV avec

$$\varphi_B = (\vec{I}, \vec{V}_B) \neq 0$$

Dispositif de contrôle de la tension

Région B'

- C.1. Montrez que l'impédance équivalente de la ligne est  $Z = jX + Z_S$  et que l'on a  $Z = |X - Z_S|$
- C.2. L'ensemble { ligne + contrôle d'impédance } reste globalement inductif. Quel est le signe de  $\theta$  ?
- C.3. Tracez l'allure du diagramme de Fresnel à l'aide des indications suivantes :
  - Prenez  $\vec{V}_B$  comme origine des phases.
  - $\vec{V}_A$  et  $\vec{V}_B$  ont même origine. Sachant que  $V_B = V_A$ , sur quelle figure géométrique se trouve l'extrémité de  $\vec{V}_A$  ?
  - Placez le vecteur  $\vec{V}_A$  ( $\theta = 18^\circ$ ) et déduisez-en le vecteur  $\vec{U}_Z$  puis la direction de  $\vec{I}$ .
  - Vous ferez figurer les angles  $\varphi_A$ ,  $\varphi_B$  et  $\theta$ .
- C.4. En procédant comme au B.1.4, montrez que  $ZI \cos \varphi_A = V_A \cdot \sin \theta$
- C.5. Montrez que la puissance active transmise est  $P_A = \frac{V_A^2}{Z} \cdot \sin \theta$
- C.6. Montrez que l'intensité du courant dans la ligne est alors  $I = 2 \frac{V_A}{Z} \sin \frac{\theta}{2}$
- C.7. Que doit valoir l'impédance équivalente  $Z$  de la ligne pour que la puissance maximale transmissible soit de 300 MW avec  $\theta = 18^\circ$  (limite de stabilité)?
- C.8. Quelle sera alors la valeur efficace du courant en ligne ?
- C.9. Cette valeur est-elle compatible avec la limite thermique ?
- C.10. Calculez alors l'impédance  $Z_S$  du dispositif de contrôle d'impédance. On a toujours  $X = 130 \Omega$ .
- C.11. Déduisez-en la valeur de C.
- C.12. Calculez la valeur efficace  $U_S$  de la tension aux bornes du dispositif.
- C.13. Ajoutez alors sur le diagramme de Fresnel, les vecteurs  $\vec{U}_S$  puis  $\vec{U}_X$ .
- C.14. Calculez dans ce cas  $Q_A$  et  $Q_{B'}$ . Calculez  $Q_Z$ ,  $Q_X$  et  $Q_S$ .

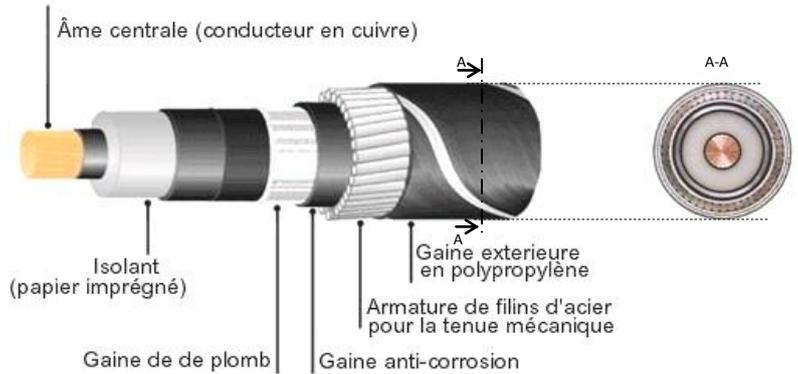
La modification de l'impédance de ligne permet de transporter une puissance active proche de la puissance nominale, tout en restant dans la limite thermique et dans la zone de stabilité, garantissant la sûreté du réseau.

## Exercice 8 : Câbles souterrains

Le transport de l'électricité n'est pas toujours possible par ligne aérienne. C'est par exemple le cas lorsque la liaison se fait entre un continent et une île (Italie – Corse et Sardaigne). Dans ce cas, on utilise des câbles. L'illustration suivante montre la constitution des câbles.

On considère un câble de 50 km de long.

Nous calculerons d'abord sa résistance, puis son inductance, et pour terminer sa capacité.



L'âme centrale en cuivre ( $\rho_{Cu} = 17.10^{-9} \Omega.m$ ) a pour section  $900 \text{ mm}^2$ .

1. En continu, quelle est la résistance totale  $R_0$  du câble ? (cf. exercice 3)
2. En alternatif (50 Hz), quelle est la résistance totale  $R$  du câble ? (cf. exercice 4)

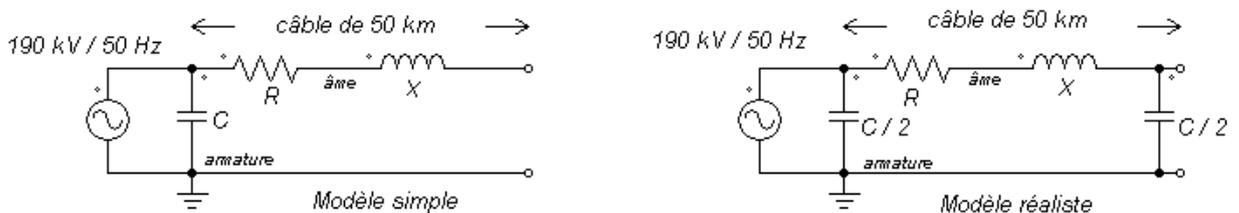
L'inductance linéique d'un tel câble est  $\ell = 0.4 \text{ mH / km}$ .

3. Calculez l'inductance totale  $L$  du câble puis sa réactance  $X$  à 50 Hz.
4. Que vaut la réactance en continu ?

L'âme et l'armature, séparées par l'isolant, forment les 2 faces d'un condensateur. Avec  $\epsilon_0 = \frac{1}{36\pi.10^9} \text{ F/m}$  la permittivité du vide et  $\epsilon_r$  la permittivité relative de l'isolant ( $\epsilon_r = 4$ ),  $R_{ext}$  ( $R_{ext} = 33.5 \text{ mm}$ ) et  $R_{int}$  les rayons extérieur et intérieur de l'isolant (dans la même unité), on a l'expression de la capacité linéique du câble:

$$C_l (F/m) = \frac{2\pi \cdot \epsilon_0 \epsilon_r}{\ln\left(\frac{R_{ext}}{R_{int}}\right)}$$

5. Calculez la capacité  $C$ , d'un mètre de câble (capacité linéique) puis la capacité totale  $C$  du câble.
6. Le câble est alimenté en alternatif 190 kV / 50 Hz. Calculez, à partir du modèle de votre choix, l'intensité du courant appelé par le câble à vide (l'autre extrémité n'appelant aucune puissance).



7. Ce courant est-il utile pour le transport d'énergie ?
8. Donnez le modèle du câble en continu. Peut-il y avoir un intérêt à transporter l'électricité en continu ?

Ce fut une vraie guerre entre Edison et Tesla: le premier construisait un réseau à courant continu, le second, à courant alternatif. C'est Tesla qui l'emporta grâce au transformateur permettant la réduction significative des pertes en lignes. Aujourd'hui l'immense majorité des transferts électriques est effectuée en courant alternatif. Cependant les transferts de puissance sont avantageux en courant continu haute tension (HVDC) pour les distances supérieures à 650 km en lignes aériennes et supérieures à 90 km pour les liaisons enterrées. C'est aussi le seul moyen d'assurer le transfert de d'énergie entre des réseaux de fréquence différente : par exemple entre la France (50 Hz) et l'Angleterre (60 Hz).

## Bibliographie :



Agrégation externe de physique appliquée 2009  
Agrégation interne de physique appliquée 2005  
Agrégation externe de physique appliquée 2003  
Baccalauréat Génie Electrotechnique 1999  
CAPES externe de physique appliquée 1992



[www.clubeea.org](http://www.clubeea.org)

Lignes et câbles en distribution électrique (Patrick LAGONOTTE)  
Câbles de transport d'énergie (Christian GLAIZE)



et Tension : stabilité et réglage. (Hervé LEFEBVRE)

[www.see.asso.fr/clubs\\_techniques/se/xmedia/Club\\_Tech\\_SE-2001-2008/2006/Contrôle\\_de\\_la\\_tension-28-09-2006/Tension\\_expose\\_RTE-V4.pdf](http://www.see.asso.fr/clubs_techniques/se/xmedia/Club_Tech_SE-2001-2008/2006/Contrôle_de_la_tension-28-09-2006/Tension_expose_RTE-V4.pdf)



Thèse de doctorat : Valorisation des services système sur un réseau de transport d'électricité en environnement concurrentiel (Martin HENNEBEL)

<http://tel.archives-ouvertes.fr/>



Cahier technique n° 203 : Choix de base des réseaux MT de distribution publique  
(Didier FULCHIRON)

<http://www.schneider-electric.com/sites/corporate/fr/produits-services/cahiers-techniques/cahiers-techniques.page>

## Prérequis :

*Exercice 1 : Vecteurs de Fresnel, impédance, géométrie*

*Exercice 2 : Régime triphasé, calcul des puissances, théorème de Boucherot*

*Exercice 3 : Pertes Joules*

*Exercice 4 : Pertes Joules*

*Exercice 5 : Calcul des puissances, théorème de Boucherot*

*Exercice 6 : Loi d'Ohm complexe, loi des mailles, loi des nœuds*

*Exercice 7 : Calcul des puissances, vecteurs de Fresnel, impédances, géométrie*

*Exercice 8 : Impédances*