



REPUBLIC ALGERIENNE DEMOCRATIQUE
ET POPULAIRE



Ministère de l'Enseignement supérieur et de Recherche Scientifique

Mémoire

UNIVERSITE DE BADJIMOKHTAR-ANNABA

Faculté des Sciences de l'ingénierie

Département d'électrotechnique

Analyse des régime de fonctionnement d'une ligne
de transport d'énergie électrique haute tension

Présente par :

Sekhri Meriem

Bouasla Mohamed Ali

Encadre par :

Mme. Tourab. W

Année universitaire :2020 /2021

Remerciement

*Nous tiendrons à remercier toutes les personnes qui nous
L'avons aidée lors de la rédaction de ce mémoire.*

*nous voudrions dans un premier temps remercier, mon
directeur de mémoire M.TOURAB Wafa , professeur
de Réseau électrique à l'université de BadjiMoukhtar Annaba,
pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux
conseils, qui ont contribué à alimenter ma réflexion.*

*Nous remercions également toute l'équipe pédagogique de
l'université de BadjiMoukhtar et les intervenants
professionnels responsables de notre formation, pour avoir
assuré la partie théorique de celle-ci.*

*Nous remercions également le jury qui a assisté et jugé notre
travail.*

Dédicace

Je dédie cette thèse à ma très chère mère

Aucune dédicace très chère maman, ne pourrait exprimer la profondeur des sentiments que j'éprouve pour vous, vos sacrifices innombrables et votre dévouement firent pour moi un encouragement.

Vous avez guetté mes pas, et m'avez couvé de tendresse, ta prière et ta bénédiction m'ont été d'un grand secours pour mener à bien mes études.

Vous m'avez aidé et soutenu pendant de nombreuses années avec à chaque fois une attention renouvelée.

Puisse Dieu, tout puissant vous combler de santé, de bonheur et vous procurer une longue vie.

Ta fille meriem.

Dédicace

Je dédie ce travail

A ma famille, elle qui m'a doté d'une éducation digne, son amour a fait de moi ce que je suis aujourd'hui

Particulièrement a mon grand-père feu Belaid.S , ceci est ma profonde gratitude pour ton éternel amour.

A mon très cher père

Tu as toujours été à mes côtés pour me soutenir et m'encourager. Que ce travail traduit ma gratitude et mon affection.

A la femme qui a souffert sans me laisser souffrir, qui n'a jamais dit non à mes exigences et qui n'a épargné aucun effort pour me rendre heureuse: mon adorable mère.

Ton garçon Mohamed Ali

Sommaire

CHAPITRE 01: Généralités sur les ligne hautes tension

<i>1/Introduction générale</i>	<i>08</i>
<i>2/ Courant alternatif ou continu</i>	<i>10</i>
<i>Histoire</i>	<i>11</i>
<i>3/Transport d'énergie électrique</i>	<i>15</i>
<i>4/La ligne à haute tension</i>	<i>16</i>
<i>5/Pourquoi sont-elles utilisées ?</i>	<i>18</i>
<i>6/Les types</i>	<i>19</i>
<i>7/Les composants</i>	<i>20</i>

CHAPITRE 02 :Caractéristique de ligne HT

<i>1/Les lignes HT haute tension</i>	<i>23</i>
<i>2/Les carecteristiquestrensversale</i>	<i>25</i>
<i>3/Paramètres du modèle</i>	<i>25</i>
<i>Quadripole passif</i>	<i>27</i>
<i>2 Ligne sans perte</i>	<i>28</i>

CHAPITRE 03 :Calcul du régime de tension

<i>Régime de Tension</i>	<i>31</i>
<i>Calcul du régime de tension</i>	<i>32</i>

<i>Analyse et commentaire</i>	35
<i>Régime de puissance</i>	34
<i>Régime maximal</i>	36
<i>Régime moyenne</i>	37
<i>Régime minimaux</i>	38
<i>La courbe qui représenté $U=f(L)$</i>	39

CHAPITRE 04 :Amélioration du régime deFonctionnement de la ligne

<i>Amélioration de régime de fonctionnement par la conception un faisceau</i>	41
<i>Faisceau a deux conducteurs par phase</i>	44
<i>Faisceau a trois conducteurs par phase</i>	45
<i>Conclusion</i>	47
<i>Bibliographie</i>	48

CHAPITRE 01:

Généralités sur

les ligne

hautes tension

Introduction générale :

L'énergie électrique est l'énergie transférée ou emmagasinée grâce à l'électricité¹. Cette énergie est transférée d'un système à un autre par un mouvement de charges. Elle n'est pas une véritable énergie comme l'énergie cinétique ou l'énergie potentielle, mais un vecteur énergétique, un moyen de transférer l'énergie comme le sont la chaleur ou le travail.

Les systèmes susceptibles de fournir de l'énergie par transfert électrique sont les alternateurs, présents dans pratiquement toute installation de production d'électricité, ou des systèmes chimiques comme les piles. Les systèmes susceptibles de transformer l'énergie issue de l'électricité sont par exemple les résistances électriques, qui la transforment en énergie thermique, les moteurs, qui la transfèrent par un travail mécanique, les lampes, qui la transforment en rayonnement et en énergie thermique, et d'autres systèmes électrotechniques ou électroniques. Le transport d'énergie électrique se fait au moyen d'un conducteur électrique, par exemple un métal ou une solution ionique.

L'énergie électrique ne peut pas être emmagasinée en grande quantité sans être transformée. Seules de petites quantités de charges électriques le peuvent, sous forme d'énergie dite électrostatique (ou énergie potentielle électrostatique), par exemple dans les condensateurs et super condensateurs.

L'expression « énergie électrique » est impropre en physique mais est une commodité de langage permettant d'indiquer que l'électricité requiert et transporte de l'énergie. Pour stocker de l'énergie fournie par transfert électrique, il faut utiliser un convertisseur capable de stocker l'énergie reçue, par exemple en énergie chimique, dans les accumulateurs, ou la convertir en énergie mécanique ou en énergie potentielle (par exemple dans une STEP ou un barrage hydro-électrique).

réseau électrique est un ensemble d'infrastructures énergétiques plus ou moins disponibles permettant d'acheminer l'énergie électrique des centres de production vers les consommateurs d'électricité.

Il est constitué de lignes électriques exploitées à différents niveaux de tension, connectées entre elles dans des postes électriques. Les postes électriques permettent de répartir l'électricité et de la faire passer d'une tension à l'autre grâce aux transformateurs.

Un réseau électrique doit aussi assurer la gestion dynamique de l'ensemble production - transport - consommation, mettant en œuvre des réglages ayant pour but d'assurer la stabilité de l'ensemble.

Lors de la première moitié du XIX^e siècle, les inventeurs mettent au point de nombreux types de machines électriques à courant continu, mais leur utilisation de manière industrielle ne se développe qu'après l'invention de la dynamo (génératrice de courant continu) par Zénobe Gramme en 1869 (présentée à l'Académie des sciences, à Paris, en 1871¹), qui est rapidement améliorée².

À l'Exposition internationale d'Électricité de Paris de 1881, Marcel Deprez présente pour la première fois une installation de distribution d'énergie électrique alimentée par deux dynamos. À l'automne 1882, les premiers réseaux électriques apparaissent simultanément à New York et Bellegarde, en France². Ils sont très locaux et utilisent le courant continu.



L'éclairage électrique était souvent créé lors d'expositions internationales (exemple : 1897).

Thomas Edison a joué un rôle déterminant dans le développement de l'électricité : il fonde en 1878 l'Edison Electric Light Co (qui devient en 1892 General Electric), dépose le brevet de l'ampoule électrique en 1879, puis crée le réseau électrique de New York. Ce dernier, qui avait essentiellement pour but l'éclairage, se développe rapidement : de 1 200 ampoules en 1882, il passe à 10 000 ampoules l'année suivante. Ce réseau, qui souffre de nombreuses pannes, est constitué de petites centrales électriques (30 kW) et

d'un réseau de distribution à 110 V. Il est cependant très limité car l'acheminement de l'électricité n'est possible que sur quelques kilomètres.

À cette époque, les premières expérimentations de transport de l'énergie électrique se développent et sont menées notamment par Marcel Deprez, qui utilise le courant continu. Ce sont cependant des échecs relatifs car elles ne permettent pas le transport de puissances industrielles (Deprez réussit en 1882 à transporter 400 W sur 57 km de distance, mais avec un rendement global de seulement 30 %. Les ingénieurs Lucien Gaulard et John Gibbs travaillent quant à eux sur le courant alternatif. Bien que le transformateur soit connu depuis 1837, ils mettent au point en 1884 un transformateur de forte puissance utilisant du courant triphasé, ce qui permet de changer facilement le niveau de tension. La même année ils démontrent l'intérêt du transformateur en mettant en service une ligne de 80 km de long alimenté en courant alternatif sous 2 000 V.

Courant alternatif ou continu :

Le transport de puissances importantes sur de longues distances nécessite des tensions élevées. Il faut donc des transformateurs pour passer d'une tension à une autre ; or les transformateurs passifs ne fonctionnent qu'avec du courant alternatif. Les changements de tension sur un système à courant continu ne sont pas aussi efficaces (plus de pertes) qu'en alternatif (transformateur). Les gains lors du transport d'électricité sur les lignes sont contrebalancés par les pertes plus importantes lors des phases d'élévation de la tension et d'abaissement de la tension. De plus la coupure des courants dans les disjoncteurs est facilitée par le passage répétitif à zéro du courant alternatif. Ce dernier entraîne quand même des contraintes d'utilisation, notamment les deux suivantes :

- l'existence d'**effets inductifs et capacitifs** dans les lignes électriques qu'il faut compenser afin d'en limiter les effets sur la tension ;
- la création d'un effet de peau qui concentre le courant à la périphérie des câbles électriques, augmentant ainsi les pertes Joules et nécessitant dans certains cas des dispositions particulières.

Le courant alternatif s'est imposé dans presque tous les réseaux, mais pour certains projets particuliers le courant continu devient plus intéressant malgré l'obligation de

recourir à des stations de conversion onéreuses (exemple des interconnexions sous-marines ou celles de très longues distances où il limite la perte en ligne). L'amélioration des performances et la baisse du coût des composants d'électronique de puissance nécessaires pour les stations de conversion rendent les réseaux ou interconnexions en courant continu haute tension (HVDC, jusqu'à au moins 800 kV) particulièrement intéressants et rentables dans certains projets, en particulier ceux où la possibilité de n'utiliser que deux conducteurs, voire un seul, diminue les coûts liés à la longueur et/ou à l'infrastructure support

Le courant parcourt le réseau électrique pour se déplacer de la centrale de production vers le consommateur final. Le réseau de transport sert à conduire l'électricité sur de grandes distances. Le courant électrique est transporté par 48 000 km de lignes à très haute tension (en 225 KV ou en 400 KV).

Histoire :

Aux débuts de l'énergie électrique commerciale, la transmission de l'énergie électrique à la même tension que celle utilisée par l'éclairage et les charges mécaniques limitait la distance entre la centrale et les consommateurs. En 1882, la génération était avec le courant continu (DC), qui ne pourrait pas facilement être augmenté dans la tension pour la transmission à longue distance. Différentes catégories de charges (par exemple, l'éclairage, les moteurs fixes et les systèmes de traction / de chemin de fer) ont nécessité des tensions différentes et ont donc utilisé différents générateurs et circuits^{3,4}.

En raison de cette spécialisation des lignes et parce que la transmission était inefficace pour les circuits haute tension à basse tension, les générateurs devaient être proches de leurs charges. À l'époque, il semblait que l'industrie allait devenir ce qu'on appelle maintenant un système de production décentralisée avec un grand nombre de petits générateurs situés près de leurs charges⁵.

La transmission de l'énergie électrique à courant alternatif (AC) est devenu possible après que Lucien Gaulard et John Dixon Gibbs ont construit ce qu'on appelle le second générateur, l'un des premiers transformateur fourni avec un rapport de rotation 1:1 et circuit magnétique ouvert, en 1881.

La première ligne AC longue distance faisait 34 kilomètres (21 miles) de long, construite pour l'Exposition internationale de 1884 à Turin, en Italie . Il était alimenté par un alternateur Siemens & Halske 2000 V, 130 Hz et comportait plusieurs générateurs secondaires Gaulard avec leurs enroulements primaires connectés en série, alimentant les lampes à incandescence. Le système a prouvé la faisabilité de la transmission de courant alternatif sur de longues distances⁴.

Une toute première ligne de courant alternatif a été mise en service en 1885 à via dei Cerchi, à Rome, en Italie , pour l'éclairage public. Il était alimenté par deux alternateurs Siemens & Halske de 30 CV (22 kW), 2000 V à 120 Hz et utilisait 19 km de câbles et 200 transformateurs abaisseurs de 2000 V à 20 V connectés en parallèle avec un circuit magnétique fermé. pour chaque lampe. Quelques mois plus tard, il a été suivi par le premier système de courant alternatif britannique, qui a été mis en service à la galerie Grosvenor , à Londres. Il comportait également des alternateurs Siemens et des transformateurs abaisseurs de 2400 V à 100 V - un par utilisateur - avec des connexions primaires shuntées⁶ .



Travaillant pour Westinghouse, William Stanley Jr. a passé son temps à se remettre de la maladie à Great Barrington en installant ce qui est considéré comme le premier système de transformateur AC pratique au monde.

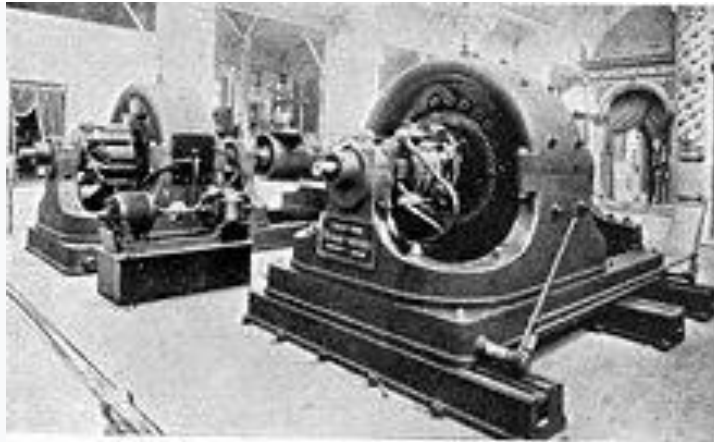
Travaillant à partir de ce qu'il considérait comme une conception Gaulard-Gibbs impraticable, l'ingénieur électricien William Stanley Junior. développa ce qui est considéré comme le premier transformateur AC série pratique en 1885⁷. Travaillant

avec le soutien de George Westinghouse , il installa en 1886 système d'éclairage à courant alternatif à Great Barrington, Massachusetts. Alimenté par un générateur Siemens 500 V à moteur à vapeur, la tension a été abaissée à 100 volts en utilisant le nouveau transformateur Stanley pour alimenter les lampes à incandescence de 23 entreprises le long de la rue principale avec très peu de perte de puissance de plus de 4000 pieds⁸. Cette démonstration pratique d'un transformateur et d'un système d'éclairage à courant alternatif amènerait Westinghouse à commencer à installer des systèmes à courant alternatif plus tard dans l'année⁷.

1888 a vu des conceptions pour un moteur à courant alternatif fonctionnel, quelque chose que ces systèmes avaient manqué jusqu'alors. Il s'agissait de moteurs à induction fonctionnant sur un courant polyphasé , inventés indépendamment par Galileo Ferraris et Nikola Tesla (avec la conception de Tesla sous licence par Westinghouse aux États-Unis). Cette conception a été développée plus loin dans la forme triphasée pratique moderne par Mikhaïl Dolivo-Dobrovolski et Charles Eugene Lancelot Brown⁹. L'utilisation pratique de ces types de moteurs serait retardée de nombreuses années par des problèmes de développement et la rareté des systèmes d'alimentation polyphasés nécessaires pour les alimenter^{10,11}.

La fin des années 1880 et le début des années 1890 verraient la fusion financière de nombreuses petites entreprises d'électricité en quelques grandes sociétés telles que Ganz et Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft (AEG) en Europe et General Electric et Westinghouse Electric aux États-Unis. Ces sociétés ont continué à développer des systèmes à courant alternatif, mais la différence technique entre les systèmes à courant continu et à courant alternatif suivrait une fusion technique beaucoup plus longue¹². En raison de l'innovation aux États-Unis et en Europe, l'économie d'échelle du courant alternatif avec de très grandes centrales liées aux charges via la transmission longue distance se combinait lentement avec la possibilité de relier tous les systèmes existants qui devaient être fournis. Ceux-ci comprenaient des systèmes à courant alternatif monophasé, des systèmes à courant alternatif polyphasé, un éclairage à incandescence à basse tension, un éclairage à arc à haute tension et des moteurs CC existants dans les usines et les tramways. Dans ce qui était en train de devenir un système universel , ces différences technologiques étaient provisoirement comblées par le développement de commutateurs et de groupes convertisseurs qui permettaient de raccorder le grand nombre de systèmes existants au réseau AC^{12,13}. Ces bouche-trous

seraient lentement remplacés pendant que les systèmes plus anciens étaient retirés ou améliorés.



Les générateurs de polyphasés à courant alternatif de Westinghouse sont exposés à l'Exposition universelle de 1893 à Chicago, dans le cadre de leur «Tesla Poly-phase System"». Ces innovations polyphasées ont révolutionné la transmission

La première transmission du courant alternatif monophasé utilisant la haute tension a eu lieu dans l'Oregon en 1890 lorsque l'énergie a été fournie par une centrale hydroélectrique à Willamette Falls à la ville de Portland, à 14 milles en aval¹⁴. Le premier courant alternatif triphasé utilisant la haute tension a eu lieu en 1891 lors du Salon international de l'électricité de 1891 à Francfort. Une ligne de transmission de 15 000 V, longue d'environ 175 km, relie Lauffen à Francfort^{6,15}.

Les tensions utilisées pour la transmission d'énergie électrique ont augmenté tout au long du XX^e siècle. En 1914, cinquante-cinq systèmes de transmission fonctionnant chacun à plus de 70 000 V étaient en service. La tension la plus élevée alors utilisée était de 150 000 V¹⁶. En permettant l'interconnexion de plusieurs centrales sur une vaste zone, les coûts de production d'électricité ont été réduits. Les centrales disponibles les plus efficaces pouvaient être utilisées pour alimenter les charges variables pendant la journée. La fiabilité a été améliorée et les coûts d'investissement ont été réduits, car la capacité de production en attente pouvait être partagée par un nombre beaucoup plus important de clients et une zone géographique plus étendue. Des sources d'énergie à distance et à faible coût, telles que l'énergie hydroélectrique ou le charbon de mine, pourraient être exploitées pour réduire les coûts de production d'énergie^{3,6}.

L'industrialisation rapide du XX^e siècle a fait des lignes de transport d'électricité et des réseaux un élément d'infrastructure essentiel dans la plupart des pays industrialisés.

L'interconnexion des centrales de production locales et des petits réseaux de distribution a été fortement stimulée par les exigences de la Première Guerre mondiale, avec de grandes centrales électriques construites par les gouvernements pour alimenter les usines de munitions. Plus tard, ces centrales ont été connectées pour alimenter les charges civiles grâce à la transmission à longue distance¹⁷.

Transport d'énergie électrique :



500 kV triphasé puissance électrique des Lignes de Transmission au Barrage de Grand Coulée

La transmission d'énergie électrique est le mouvement massif d'énergie électrique d'un site de production, tel qu'une centrale électrique, à une sous-station électrique. Les lignes interconnectées qui facilitent ce mouvement sont appelées réseau de transmission. Ceci est distinct du câblage local entre les sous-stations à haute tension et les clients, ce qui est généralement appelé la distribution d'énergie électrique. Le réseau de transport et de distribution combiné est connu sous le nom de « power grid », réseau électrique en Amérique du Nord , ou simplement « the grid », le réseau. Au Royaume-Uni , en Inde , en Malaisie et en Nouvelle-Zélande, le réseau est connu sous le nom de « National Grid ».

Une large zone synchrone de la grille (Réseau maillé en tension continue), aussi connu comme une interconnexion en Amérique du Nord, relie directement un grand nombre de générateurs de livraison d'alimentation en courant alternatif (CA) avec la fréquence identique d'un grand nombre de consommateurs. Par exemple, il y a quatre grandes interconnexions en Amérique du Nord (Western Interconnection (en), Eastern Interconnection, Interconnexion du Québec et Electric

Reliability Council of Texas (en) (ERCOT)). En Europe, une grande grille se connecte à la plupart des pays d'Europe continentale (en).

Historiquement, les lignes de transport et de distribution appartenaient à la même société, mais à partir des années 1990, de nombreux pays ont libéralisé (en) la régulation du marché de l'électricité d'une manière qui a conduit à séparer les activités de transport d'électricité des activités de distribution¹

La ligne à haute tension :

est l'une des principales formes d'infrastructures énergétiques et le composant principal des grands réseaux de transport d'électricité. Elle permet le transport de l'énergie électrique, des centrales électriques vers les réseaux de distribution qui alimentent les consommateurs selon leurs besoins. Ces lignes sont aériennes, souterraines ou sous-marines, quoique les professionnels réservent plutôt ce terme aux liaisons aériennes.

Les lignes à haute tension aériennes sont composées de câbles conducteurs, généralement en alliage d'aluminium, suspendus à des supports, de types pylônes ou poteaux. Ces supports peuvent être faits de bois, d'acier, de béton, d'aluminium ou parfois en matière plastique renforcée

Depuis les années 1960, certaines lignes sont régulièrement exploitées à des tensions supérieures à 765 kV. Les lignes à courant continu haute tension permettent de transporter l'énergie avec moins de pertes en ligne sur de très grandes distances¹ car elles supportent des tensions trois à quatre fois plus élevées pour une même isolation et fonctionnent éventuellement sous l'eau. Mais l'utilisation de tensions et de courants continus interdit l'usage du transformateur ce qui est un inconvénient considérable.

Histoire :

Le 2 juillet 1729, la première transmission d'impulsions électriques sur une longue distance a été faite par le physicien Stephen Gray qui a utilisé des cordes de chanvre humide suspendus par des fils de soie (l'importance des conducteurs métalliques n'était pas appréciée à l'époque). Il voulait prouver la possibilité de transférer de l'électricité par ce moyen. La première déclinaison pratique en sera la télégraphie.

- **En 1882, la première transmission à haute tension se fait entre Munich et Bad Brook.**
- **En 1891, le premier usage de courant alternatif triphasé sur lignes aériennes se fait à l'occasion du Salon international de l'électricité, à Francfort,**
- **En janvier 1906, la Société Grenobloise de Force et Lumière utilise 5 000 ch de la production électrique de l'usine de La Volta lyonnaise, près de Saint-Marcel en Tarentaise, pour alimenter le tramway électrique lyonnais, via une ligne de 180 km, distance qui n'a encore jamais été atteinte en Europe, sur deux fils en laiton d'un diamètre de six millimètres⁵.**
- **En 1909, l'Énergie électrique du Sud-Ouest alimente le tramway de Bordeaux, avec l'énergie du barrage de Tuilières, construit entre 1905 et 1907 sur la Dordogne, via une ligne à 55 000 volts sur 120 kilomètres⁶.**
- **En 1909, la Compagnie électrique de la Loire et du Centre compte parmi ses fournisseurs la Société Hydroélectrique de l'Eau d'Olle, dont l'électricité est distribuée jusqu'à Saint-Étienne, Saint-Chamond et Roanne via une ligne à 60 000 volts entre Grenoble et Saint-Chamond⁷.**
- **En 1912, la première ligne à haute tension (110 kV) entre en service.**
- **En 2003, la construction de la plus grande ligne à haute tension a débuté en Chine¹³.**
- **En 2009 (le 6 janvier), la State Grid Corporation of China active sa première ligne à 1 000 kV¹⁴. La tension maximale de service est égale à 1 100 kV.**
- **En 2012, début des travaux de la ligne française Cotentin-Maine de 160 km qui reliera la centrale nucléaire de Flamanville à la Mayenne^{15,16}.**

L'Inde prévoit un fort développement de son réseau 800 kV^[Quand ?], et vers 2013-2014, la mise en service d'un réseau 1 200 kV¹⁷.

Pourquoi sont-elles utilisées ?

On utilise des lignes à Haute Tension pour transporter l'électricité parce que l'augmentation de la tension limite les pertes d'énergie (c'est ce qu'on appelle « l'effet Joule »). La Haute et la Très Haute Tension permettent donc de transporter l'énergie sur de très longues distances.

Le choix d'utiliser des lignes à haute tension s'impose dès qu'il s'agit de transporter de l'énergie électrique sur des distances supérieures à quelques kilomètres. Le but est de réduire les chutes de tension en ligne, les pertes en ligne, et également d'améliorer la stabilité des réseaux.

Les pertes en ligne sont dues à l'effet Joule, qui ne dépend que de deux paramètres : la résistance et le courant ($P = R.I^2$). L'utilisation de la haute tension permet, à puissance transportée ($P = U.I$) équivalente, de diminuer le courant et donc les pertes. Par ailleurs, pour diminuer la résistance, aux fréquences industrielles, il n'y a que deux facteurs, la résistivité des matériaux utilisés pour fabriquer les câbles de transport, et la section de ces câbles. À matériau de fabrication et section équivalents, les pertes sont donc égales, en principe, pour les lignes aériennes et pour les lignes souterraines.

Les lignes à haute tension font partie du domaine « haute tension B » qui comprend les valeurs supérieures à 50 kV en courant alternatif. L'expression « très haute tension » est parfois utilisée, mais n'a pas de définition officielle. Les tensions utilisées varient d'un pays à l'autre. Schématiquement, dans un pays, on trouvera des tensions de l'ordre de 63 kV à 90 kV pour de la distribution urbaine ou régionale, de l'ordre de 110 à 220 kV pour les échanges entre régions, et de l'ordre de 345 à 500 kV pour les principales interconnexions nationales et internationales. Dans certains pays, comme au Québec, on utilise aussi du 735 kV, et même des tensions plus élevées comme en Chine (1 100 kV), Inde (projet 1 200 kV), Japon (projet 1 100 kV) et dans l'ex-URSS où des essais de transport en « ultra haute tension » ont été effectués en 1 500 kV — mais ce type de tension ne se justifie que pour un transport sur une distance de l'ordre du millier de kilomètres, pour lequel un transport en courant continu peut être une solution intéressante.

Les types 1 :

Le réseau de transport : lignes très haute et haute tension

Il est constitué de deux types de lignes : les lignes très haute tension (THT) et les lignes haute tension (HT). Il représente un peu plus de 100 000 kilomètres de lignes en France.

Les lignes THT permettent de transporter de grandes quantités d'électricité sur de longues distances avec des pertes minimales. Ces lignes, dont la tension est supérieure à 100 kilovolts (kV) constituent le réseau de grand transport ou d'interconnexion. Elles permettent de relier les régions et les pays entre eux ainsi que d'alimenter directement les grandes zones urbaines. La majorité des lignes THT ont une tension de 400 kV.

Les lignes haute tension constituent le réseau de répartition ou d'alimentation régionale et permettent le transport à l'échelle régionale ou locale. Elles acheminent l'électricité aux industries lourdes, aux grands consommateurs électriques comme les transports ferroviaires et font le lien avec le second réseau. Leur tension est comprise entre 10kV et 100kV.

Le réseau de distribution : lignes moyenne et basse tension

Tout comme le premier, ce réseau est constitué de deux types de lignes : les lignes moyenne tension (MT) et les lignes basse tension (BT).

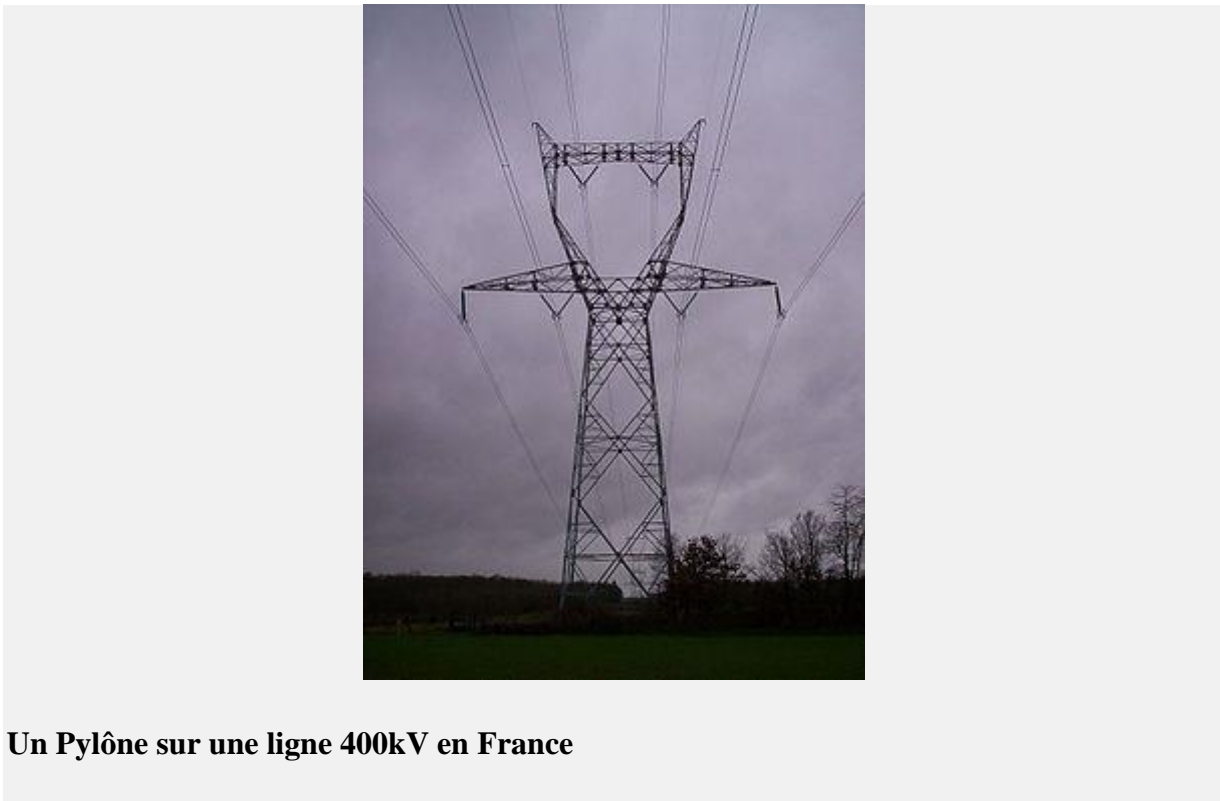
Les lignes moyenne tension permettent le transport de l'électricité à l'échelle locale vers les petites industries, les PME et les commerces. Elles font également le lien entre les clients et les postes de transformations des compagnies de distribution du courant. Les lignes MT ont une tension comprise entre 15kV et 30kV et représentent 586 000 kilomètres sur le réseau électrique français.

Les lignes basse tension sont les plus petites lignes du réseau. Leur tension est de 230V ou 400V. Ce sont celles qui nous servent tous les jours pour alimenter nos appareils ménagers. Elles permettent donc la distribution d'énergie électrique vers les ménages et les artisans et représentent plus de la moitié du réseau national avec 654 000 kilomètres dont 213 000 kilomètres en souterrain.

Les composants²

Pylônes

Pour les lignes aériennes, les opérateurs de transport d'électricité, utilisent des pylônes, en général réalisés en treillis d'acier. Leur fonction est de supporter et de maintenir les conducteurs à une distance suffisante du sol et des obstacles : ceci permet de garantir la sécurité et l'isolement par rapport à la terre, les câbles étant nus (non isolés) pour en limiter le poids et le coût.



Un Pylône sur une ligne 400kV en France

Conducteurs

Le courant électrique est transporté dans des conducteurs. L'énergie électrique étant transportée sous forme triphasée, on trouvera au moins 3 conducteurs par ligne. Pour une phase, on peut aussi trouver un faisceau de conducteurs (de 2 à 4) à la place d'un simple conducteur afin de limiter les pertes (voir plus bas). Les conducteurs en cuivre sont de moins en moins utilisés. On utilise en général des conducteurs en aluminium, ou en alliage aluminium-acier ; on trouve aussi des conducteurs composés d'une âme centrale en acier sur laquelle sont tressés des brins d'aluminium. Les conducteurs sont nus, c'est-à-dire non revêtus d'un isolant.

Isolateurs

L'isolation entre les conducteurs et les pylônes est assurée par des isolateurs. Ceux-ci sont réalisés en verre, en céramique, ou en matériau synthétique. Les isolateurs en verre ou céramique ont en général la forme d'une assiette. On les associe entre eux pour former des chaînes d'isolateurs. Plus la tension de la ligne est élevée, plus le nombre d'isolateurs dans la chaîne est important. Sur une ligne 400 kV (400 000V), les chaînes d'isolateurs comportent 19 assiettes. On peut alors deviner la tension des lignes avec leur nombre d'isolateurs.

Câbles de garde

Les câbles de garde ne transportent pas le courant. Ils sont situés au-dessus des conducteurs. Ils jouent un rôle de paratonnerre au-dessus de la ligne, en attirant les coups de foudre, et en évitant le foudroiement des conducteurs. Ils sont en général réalisés en almelec-acier. Au centre du câble de garde on place parfois un câble fibre optique qui sert à la communication de l'exploitant. Si on décide d'installer la fibre optique sur un câble de garde déjà existant, on utilise alors un robot qui viendra enrouler en spirale la fibre optique autour du câble de garde.

CHAPITRE 02:

Caractéristique

de ligne HT

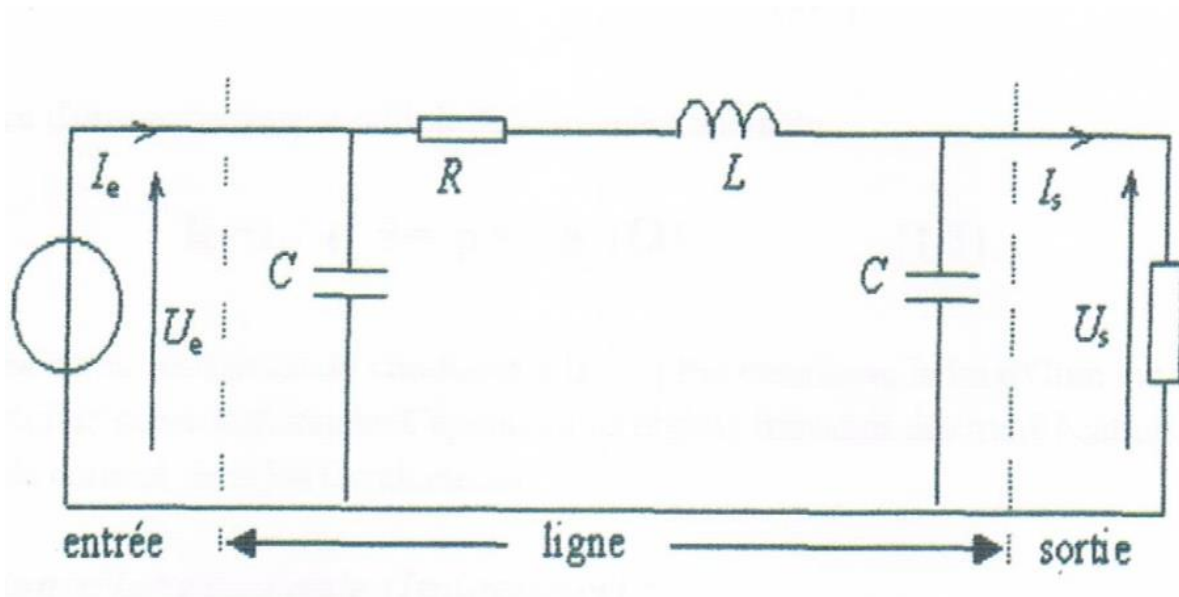
Les lignes HT haute tension :

Les lignes à haute tension sont les lignes principales des réseaux de transport d'électricité. Elles peuvent être aussi bien aériennes que souterraines ou sous-marines, quoique les professionnels réservent plutôt le terme aux liaisons aériennes.

Elles servent au transport sur les longues distances de l'électricité produite par les diverses centrales électriques, ainsi qu'à l'interconnexion des réseaux électriques.

Méthode Général de calcul :

Une ligne aérienne (de longueur inférieure à 100km) peut se mettre sous la forme du schéma équivalent suivant :



Le schéma est composé par :

.L'impédance effective longitudinale (composée de la résistance linéique R' et de la Réactance linéique $X'=j'\omega L'$

$$\text{Longitudinale} = R' + j X' [\Omega/m] \dots \dots \dots (1.1)$$

.L'impédance effective transversale composée de la susceptance linéique :

$$Y' = j \omega C' [S/m] \dots \dots \dots (1.2)$$

Les caractéristiques transversales :

Résistance longitudinale :

Partons de la loi d'Ohm locale :

$$\mathbf{J} = \boldsymbol{\alpha} \mathbf{E} \quad (1.3)$$

Où :

\mathbf{J} : est la densité de courant [A/m^2] ;

$\boldsymbol{\alpha}$: est la conductivité électrique [$\Omega^{-1}\text{m}^{-1}$]

\mathbf{E} : est le champ électrique (dans le conducteur) [V/m], appliquée à un conducteur de longueur L [m], de section ' S ' [m^2] et de conductivité ' $\boldsymbol{\alpha}$ ' [$\Omega^{-1}\text{m}^{-1}$], parcouru par un courant continu d'intensité I [A], nous trouvons :

$$\mathbf{I} = \boldsymbol{\alpha} S/L \times V \quad (1.4)$$

La résistance d'un conducteur se définit de la manière suivante :

$$R = L/\boldsymbol{\alpha} S = \rho \times L/S \quad [\Omega] \quad (1.5)$$

Où $\rho = 1/\boldsymbol{\alpha}$ est la résistivité du conducteur [Ωm] Par extension

, la loi d'Ohm est également utilisée en régime quasi-stationnaire. cependant ce régime introduit des modifications dans la répartition du courant dans les conducteurs.

Réactance longitudinale :

Quotient de la valeur initiale d'une variation brusque du terme fondamental de la composante de la tension d'induit produite par le flux longitudinal total, par la valeur de la variation simultanée du terme fondamental de la composante du courant d'induit longitudinal, la machine tournant à sa vitesse assignée et les composantes à amortissement rapide pendant les premières périodes étant négligées.

$$L = \phi/i \quad [\text{H}]$$

Où :

\emptyset : est le flux induit par le courant [Wb]

I : est le courant circulant dans le conducteur [A]

Nous avons deux types d'inductances :

L'inductance propre (ou self –inductance) d'un conducteur électrique parcouru par un courant est définie à un instant donné comme étant le rapport entre les valeurs du flux induit par le courant et ce courant lui –même .

L'inductance mutuelle se manifeste par l'interaction entre les conducteurs de phases, entre les conducteurs des différents ternes et entre tous les conducteurs parcourus par un courant tel que le fil de garde et le retour par la terre.

4. Les caractéristiques transversales :

4.1. Réactance transversale (capacité) :

Nous pouvons assimiler les lignes aériennes à un condensateur qui est constitué de deux conducteurs (les conducteurs de phase et la terre). A cause de la présence des charges, sur ce deux conducteurs, le potentiel a des valeurs différentes sur ces deux-ci. Si nous prenons comme valeur du potentiel de la terre la valeur zéro (la référence), la valeur de la tension du conducteur de phase représente la différence de potentiel

La relation linéaire qui lie la charge électrique (q_+ , q_-) sur les deux conducteurs et la différence de potentiel entre eux-ci est donnée par :

$$C = q/u [F]$$

5. Paramètres du modèle :

Les paramètres linéiques sont définis pour l'unité de longueur qui, dans le cas des réseaux représente

1 km. Leur détermination découle des analyses des effets électromagnétiques sur ces conducteurs et le milieu isolant qui les entoure ; de même que de leur nature et leur construction.

Pour déterminer la valeur de ces paramètres sur de grandes longueurs, il est nécessaire de tenir compte, en plus, de l'effet de distribution du champ électromagnétique sur cette longueur.

Pour définir ces effets de manière objective, on peut partir des équations de la ligne.

Pour chaque élément Δx de la ligne, on peut écrire:

$$U - (U + \Delta U) = I \cdot Z_0 \cdot \Delta x$$

$$I(I + \Delta I) = (U + \Delta U) \cdot Y_0 \cdot \Delta x$$

Où bien:

$$-\Delta U = I \cdot Z_0 \cdot \Delta x$$

$$-\Delta I = U \cdot Y_0 \cdot \Delta x + \Delta U \cdot Y_0 \cdot \Delta x$$

La réactance, la conductance et susceptance respectivement :

$$X = 0.144 \cdot I_g (Dm/rc) + 0.016$$

$$= 0.144 \cdot I_g (10.08/16.55 \cdot 10^3) + 0.016$$

$$= 0.42 \text{ a/km}$$

Où :

$$Dm = \sqrt[3]{(a \cdot a \cdot a)} = 1.26 \cdot a = 10.08 \text{ m}$$

$$g_0 = \Delta p_{\text{constant}} / U_n^2 = 2.7 / (220)^2 = 5.57 \cdot 10^8 \Omega^{-1} / \text{km}$$

ou :

$$b_0 = 7.58 \cdot 10^4 / I_g (Dm/rc) = 2.7 \cdot 10^6 \Omega^{-1} / \text{km}.$$

On peut constater que dans le circuit longitudinal $R_0 X_0$ et dans celui

Transversal $g_0 b_0$ ceci conduit, pendant les différentes analyses à prendre relativement

$$r_0 = g_0 = 0$$

6. Modèle mathématique de la ligne :

Il existe plusieurs modèles mathématiques de représentation des lignes électriques; pour le calcul des différents régimes de fonctionnement, on utilise la représentation sous forme de quadripôle dont les différents paramètres «A,B,C,D».

6.1. Représentation d'une ligne :



Quadripôle passif :

Le quadripôle passif présente deux paires de bornes. Appelé parfois boîte noire, il intervient généralement comme un organe de liaison entre un réseau R1R1, relié à ses bornes d'entrée et un réseau R2R2 relié à ses bornes de sortie.

Cette configuration entrée et sortie montre intuitivement qu'au quadripôle Q peut être associée une représentation matricielle, c'est-à-dire des systèmes linéaires d'équations (entre tensions et courants).

Un tel quadripôle ne contient pas de générateur. Il est formé de composants passifs : résistors, diodes, condensateurs, bobines.

$$I_1 = I_2 \operatorname{ch} y_0 l + \frac{S_2}{\sqrt{3}(Z_c)} \operatorname{ch} y_0 l \dots \dots \dots (1)$$

Aux équations d'un quadripôle passif :

$$\begin{bmatrix} U^o \\ I^o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} U^e \\ I^e \end{bmatrix}$$

$$U_1 = A.U_2 + \sqrt{3}.B.I_2$$

$$I_1 = C \cdot \frac{U_2}{\sqrt{3}} + D I_2 \dots \dots \dots (2)$$

Donne :

$$A = D = \text{ch}(y_0 l)$$

$$C = \frac{1}{Z_c} \text{sh}(y_0 l)$$

$$B = Z_0 \text{sh}(y_0 l)$$

Ainsi on peut écrire:

$$U_1 = U_2 \left(1 + Z \frac{Y}{2}\right) + I_2 \sqrt{3} \cdot Z$$

$$I_1 = U_2 = \frac{1}{\sqrt{3}} \left(2 + \frac{ZY}{2}\right) \cdot \frac{Y}{2} + I_2 \left(1 + \frac{ZY}{2}\right) \dots \dots \dots (3)$$

En comparant les expressions(1),(2),(3) on peut écrire :

$$1 + \frac{ZY}{2} = A = D = \text{ch } y_0 l$$

$$Z = B = Z_c \text{sh } y_0 l$$

$$Y + Z \left(\frac{Y}{2}\right)^2 = C = \frac{1}{Z_c} \text{sh } y_0 l$$

Ligne sans perte :

Les lignes sans pertes n'existent malheureusement pas en pratique, mais cette étude permet d'établir des résultats intéressants que l'on pourra transposer aux lignes réelles présentant des pertes généralement faibles.

La ligne est donc supposée sans pertes : les conducteurs sont idéaux de conductivité infinie, et le diélectrique entre les conducteurs est un isolant parfait, de conductivité nulle.

On a alors : $R = 0$ et $G = 0$.

et de ce fait :

$$\gamma = \sqrt{LC} p \quad ; \quad Z_c = R_c = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

Ainsi, l'impédance caractéristique est purement résistive.

La tension $V(x, p)$ s'écrit alors :

$$V(x, p) = V_1(p) \exp[-\sqrt{LC} p x] + V_2(p) \exp[\sqrt{LC} p x]$$

soit, en revenant dans l'espace des temps :

$$v(x, t) = v_1(t - \sqrt{LC} x) + v_2(t + \sqrt{LC} x)$$

CHAPITRE

03: Calcul

du régime

de tension

Régime de Tension :

Il est donné comme tâche, dans ce paragraphe, d'analyser le comportement de la ligne du point de vue de la tension sous l'effet de la variation de la longueur. La tension U_2 du consommateur étant prise comme référence.

Pour ce faire on utilise les expressions en posant :

$$I_2 = \frac{S_2}{\sqrt{3}(U^2)} = \frac{P_2 - jQ_2}{\sqrt{3}(U^2)}$$

En exprimant les puissances en unité relative par rapport à la puissance naturelle (caractéristique) (P_c) on peut écrire :

$$U_2 = [\cos \alpha_0 L + jQ_2^* \sin \alpha_0 L + jP_2^* \sin \alpha_0 L] .$$

$$I_2 = \frac{S_2}{\sqrt{3}(U^2)} [P_2^* \cos \alpha_0 L + j(\sin \alpha_0 L - Q_2^* \cos \alpha_0 L)] .$$

La puissance caractéristique pour la ligne donnée peut être recalculée, en posant $U = 220 \text{ kV}$

Et :

$$Z_c = \sqrt{\frac{r^0 + jx_0}{g^0 + jb_0}} = \sqrt{\frac{x_0}{b_0}} = 103 \sqrt{\frac{0.24}{2.7}} = 400 \Omega$$

On trouve en effet :

$$P_c = \frac{U_z^2 - (200)^2}{Z_c Z_c} = 121 \text{ MW}$$

Pour la charge donnée on peut trouver :

$$P_2^* = 200/121 = 1.65 \text{ MW}$$

$$Q_2^* = 190/121 = 1.57 \text{ MVAR}$$

Calcul du régime de tension :

Le calcul du régime de tension de la ligne est basé sur les équations d'état qui donnent la variation de la tension avec la longueur :

$$U_1 = U_2 (\cos \alpha_0 L + Q_2 \sin \alpha_0 L + j P_2 \sin \alpha_0 L)$$

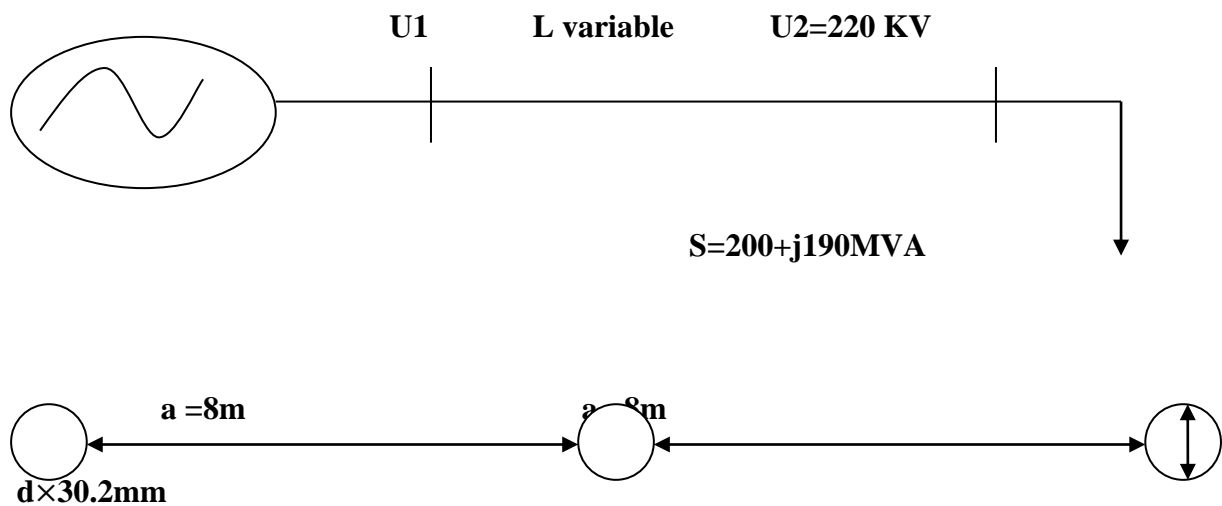
$$U_0 = U_2 (\cos \alpha_0 L + Q_2 \sin \alpha_0 L)$$

$$U_1 = U_2 (P \sin \alpha_0 L)$$

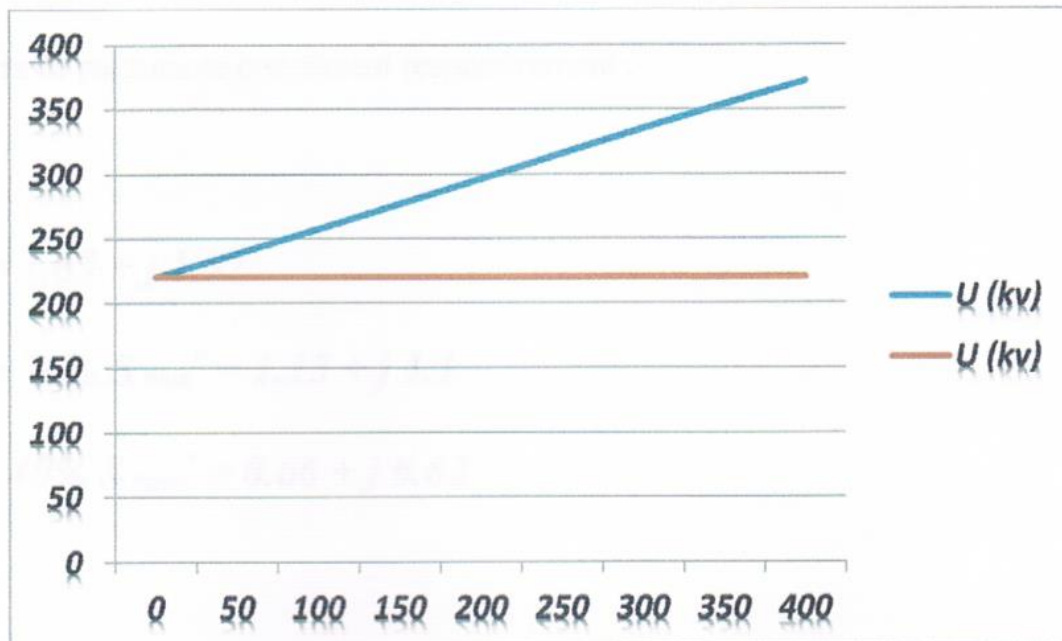
$$U = \sqrt{U_a^2 + U_R^2} \text{ (KV)}$$

$$s(^{\circ}) = \arctg \frac{U_r}{U_a}$$

$$\Delta U \% = \frac{U - U_2}{U_2}$$



L(Km)	Ua	Ur	U(KV)	$\delta(^{\circ})$	$\Delta U\%$
0	220	0	220	0	0
50	237.77	18.99	238.52	4.56	8.40
100	254.89	37.94	257.69	8.46	17.13
150	271.32	56.78	277.19	11.81	25.99
200	287	75.47	296.75	14.73	34.88
250	301.89	93.95	316.17	17.28	43.71
300	315.96	112.17	335.28	19.54	52.40
350	329.16	130.08	353.93	21.56	60.87
400	341.46	147.64	372.01	23.38	69.09



Analyse et commentaire:

En faisant varier la longueur (L) dans l'intervalle(0-400)Km, on peut voir comment varie la distribution de la tension et obtenir ainsi son épure le long de la ligne.

D'après la figure(2) on peut constater du graphique qui en allant de l'extrémité de la ligne vers son origine, la tension augmente considérablement cette augmentation représente plus de 100% U_n .

Autrement dit pour maintenir une tension nominale au niveau du de la source et pour le cas considérée, d'une tension de l'ordre 400 KV ce qui est inconcevable.

Si l'écart de tension doit être maintenir dans les normes (10%) la charge transportée que sur la longueur considérée.

Régime de puissance :

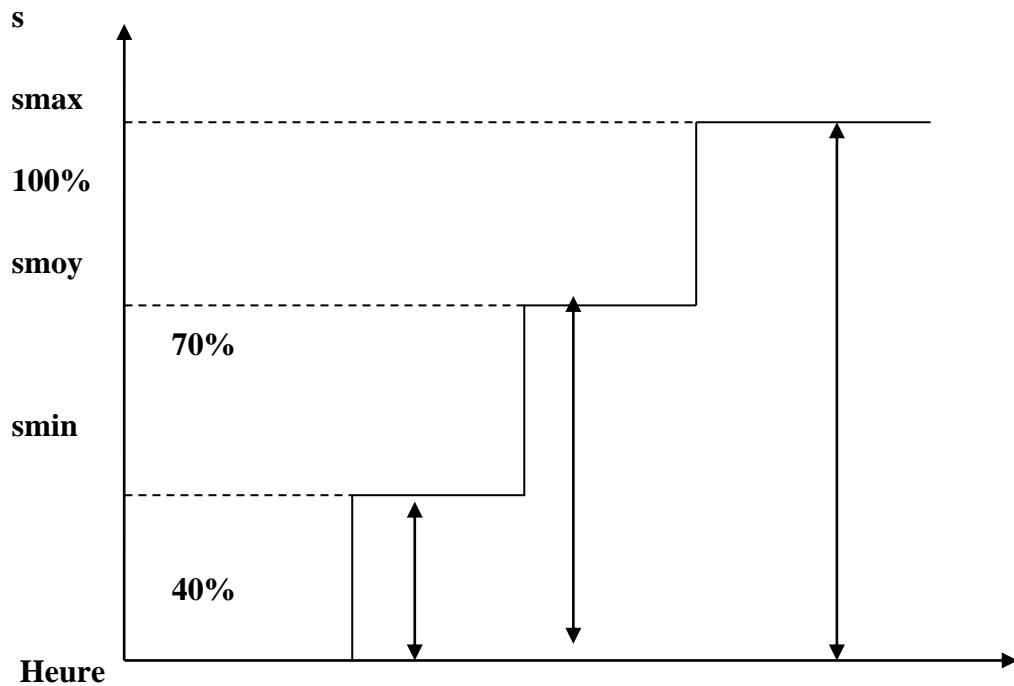
La consommation de l'énergie électrique à lieu théoriquement suivant un graphique de charge aléatoire, cependant pour les régimes du réseau, on a souvent recours, suivant l'objet recherché par ces dernières, à des approximations du graphique. L'effet de la charge peut être examiné pendant un régime dynamique ou statique. Dans ce qui suit il sera considéré des caractéristiques statiques de l'effet de charge. Pour tenir compte du fait que la charge est normalement variable entre ces deux régimes (maximale et minimal). Et pour simplifier l'analyse, on suppose que la charge varie suivant un modèle graphique donné.

Les paliers de puissances constituent respectivement :

$$S_{\max}^* = 1.56 + j1.57$$

$$S_{\text{moy}}^* = 70\% S_{\max}^* = 1.15 + j 1.1$$

$$S_{\min}^* = 40\% S_{\max}^* = 0.66 + j 0.62$$



Dans un souci de recherché une meilleure utilisation de la ligne donnée et d'analyse son comportement sous l'effet de variation de la charge, il est nécessaire de déterminer, la distribution de la tension et de la puissance et les écarts de tension.

Pour analyser ces régimes on peut utiliser les expressions et dans les quelles on fait varier les puissances P_2^* et Q_2^*

Ainsi pour chaque palier de variation de la puissance de charge on peut tracer des caractéristique de la tension et de la puissance.

$$P^* = \frac{P}{P_{nat}}$$

$$Q^* = \frac{Q}{P_{nat}}$$

Régime maximal :

$$S_2=100\%(P_{ch}+jQ_{ch})=200+j 190$$

$$P_2^*=1.56Q_2^*=1.57$$

L(Km)	Ua	Ur	U(KV)	$\delta(^{\circ})$	$\Delta U\%$
0	220	0	220	0	0
50	237.77	18.99	238.52	4.56	8.40
100	254.89	37.94	257.69	8.46	17.13
150	271.32	56.78	277.19	11.81	25.99
200	287	75.47	296.75	14.73	34.88
250	301.89	93.95	316.17	17.28	43.71
300	315.96	112.17	335.28	19.54	52.40
350	329.16	130.08	353.93	21.56	60.87
400	341.46	147.64	372.01	23.38	69.09

Régime moyenne :

$$S_2=100\%(P_{ch}+jQ_{ch})=0.7(200+j 190)=144+j 133$$

$$P_2^*=1.15 \quad Q_2^*=1.1$$

L(Km)	Ua	Ur	U(KV)	8(°)	ΔU%
0	220	0	220	0	0
50	237.77	18.99	238.52	4.56	8.40
100	254.89	37.94	257.69	8.46	17.13
150	271.32	56.78	277.19	11.81	25.99
200	287	75.47	296.75	14.73	34.88
250	301.89	93.95	316.17	17.28	43.71
300	315.96	112.17	335.28	19.54	52.40
350	329.16	130.08	353.93	21.56	60.87
400	341.46	147.64	372.01	23.38	69.09

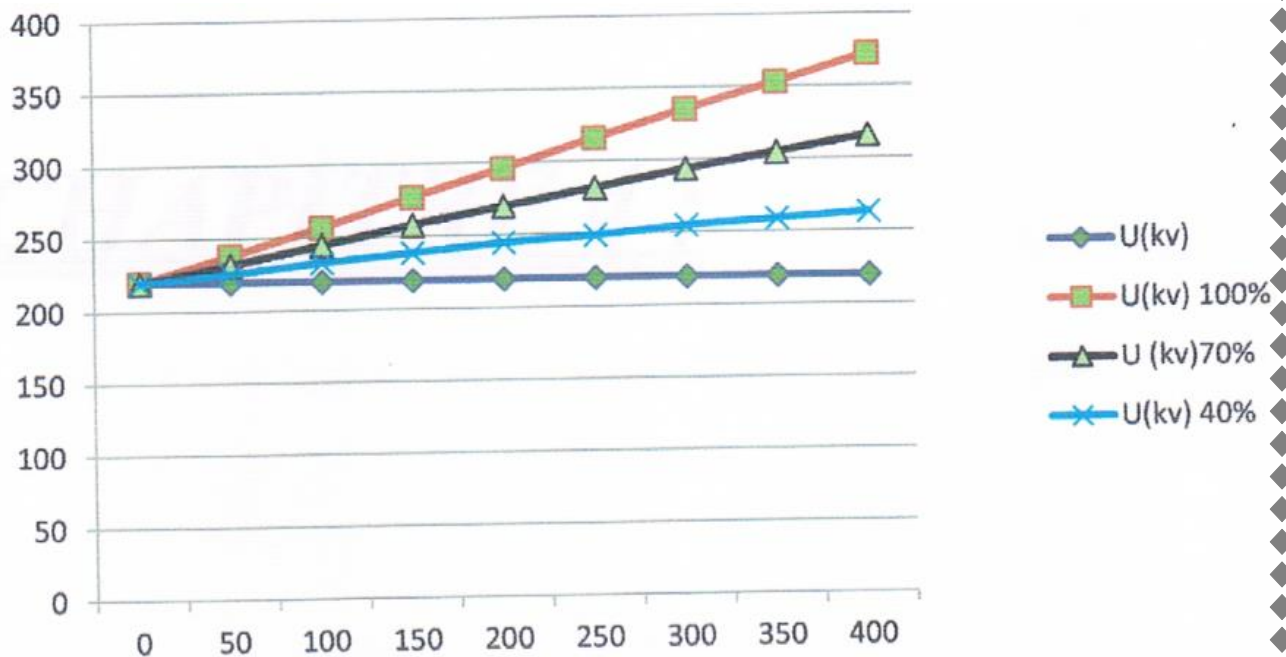
Régime minimaux:

$$S_2 = 100\%(P_{ch} + jQ_{ch}) = 0.4(200 + j190) = 80 + j76$$

$$P_2^* = 0.66Q_2^* = 0.62$$

L(Km)	U _a	U _r	U(KV)	δ(°)	ΔU%
0	220	0	220	0	0
50	237.77	18.99	238.52	4.56	8.40
100	254.89	37.94	257.69	8.46	17.13
150	271.32	56.78	277.19	11.81	25.99
200	287	75.47	296.75	14.73	34.88
250	301.89	93.95	316.17	17.28	43.71
300	315.96	112.17	335.28	19.54	52.40
350	329.16	130.08	353.93	21.56	60.87
400	341.46	147.64	372.01	23.38	69.09

La courbe qui représenté $U=f(L)$:



Analyse et commentaire :

Il en découle que pour le régime à charge maximale, la tension s'écarte inadmissiblement de sa valeur nominale, pratiquement sur toute la longueur considérée (sur 50 km). Pour la charge moyenne, elle s'écarte sur environ 100 km à partir de la source. Pendant le régime à charge nulle qui diminue considérablement par rapport aux deux régimes précédents, l'écart maximal de tension représenté sur toute la longueur environ (250 km)

et il est inadmissible. Ainsi il apparaît clairement qu'en l'absence de moyens de contrôle de la tension le graphique de charge donnée ne peut être idéalisé par le modèle de ligne considérée.

CHAPITRE

04 :

Amélioration du régime de Fonctionnement de la ligne

1-Amélioration de régime de fonctionnement par la conception un faisceau :

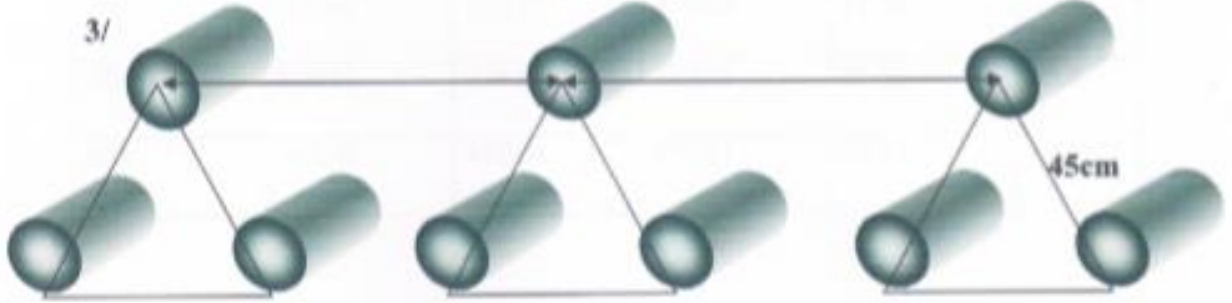
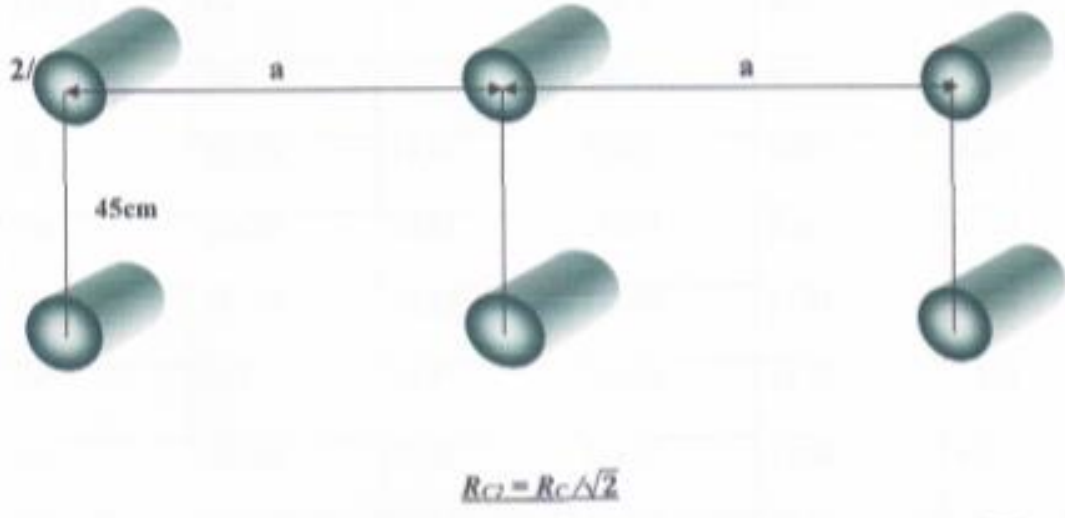
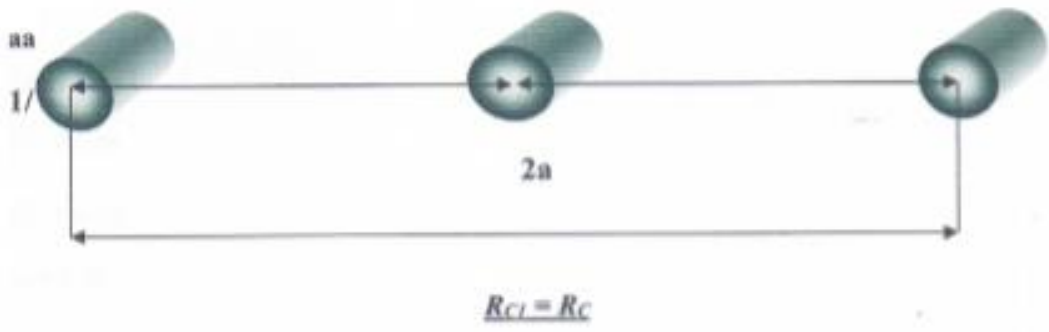
Dans cette partie de travail on va chercher à améliorer le régime de fonctionnement de la ligne, par changement de sa configuration en une ligne en faisceau, avec deux conducteurs par phases disposés en nappe (figure 3). Pour cette nouvelle conception, il serait utile de calculer de nouveau les paramètres caractéristiques en fonction du nombre de conducteurs par phase pour pouvoir déterminer la variation de tension avec la longueur. En effet en partant de l'équation (*) du 1^{er} chapitre, tous en considérant des paramètres de quadripôle ligne calculés pour des nouvelles valeurs de (r_0, x_0, g_0, b_0) :

$$x_0 = 0.144 \lg Dm / R_{\text{éq}} + 0.016/n$$

$$b_0 = \frac{7.5810^{-6}}{\lg \frac{Dm}{R_{\text{éq}}}}$$

$$R_{\text{éq}} = \sqrt[n]{r c d m^{n-1}}$$

Où Dm, dm : distances moyennes géométriques respectivement entre phases et entre les conducteurs d'une phase.



Pour n=1

p*=0.59

Q*=0.56

$\alpha=0.06$

L (km)	Ua	Ur	U (kv)	δ (°)	$\Delta U\%$
0	220	0	220	0	0
50	237.77	18.99	238.52	4.56	8.40
100	254.89	37.94	257.69	8.46	17.13
150	271.32	56.78	277.19	11.81	25.99
200	287	75.47	296.75	14.73	34.88
250	301.89	93.95	316.17	17.28	43.71
300	315.96	112.17	335.28	19.54	52.40
350	329.16	130.08	353.93	21.56	60.87
400	341.46	147.64	372.01	23.38	69.08

1.1 Faisceau a deux conducteurs par phase :

$$r_{\text{eq}} = \sqrt{r' \cdot a}$$

$$p^* = 1.25$$

$$Q^* = 1.18$$

$$\alpha = 0.06$$

L (km)	Ua	Ur	U (kv)	δ (°)	$\Delta U\%$
0	220	0	220	0	0
50	223.28	14.39	233.72	3.52	6.23
100	245.93	28.74	247.60	6.66	12.54
150	257.90	43.01	261.46	9.46	18.84
200	269.16	57.07	275.10	11.09	25.04
250	279.69	71.17	288.60	14.24	31.18
300	289.45	84.97	301.66	16.35	37.11
350	298.42	98.55	314.25	18.27	42.84
400	306.56	111.85	326.32	20.04	48.20

1.2 Faisceau a trois conducteurs par phase :

Calcul de Réq :

$$\cos 30^\circ = \frac{\frac{a}{2}}{\rho f} = \frac{a}{2\rho f} = \frac{\sqrt{3}}{2} \rightarrow \rho f = \frac{a}{\sqrt{3}}$$

Donc:

$$\text{Réq} = \frac{a}{\sqrt{3}} * 3 \sqrt{\frac{3r'}{a}} = \frac{a}{\sqrt{3}} * 3 \sqrt{\frac{3 \cdot \sqrt{3} \cdot r'}{a}} = 3 \sqrt{\frac{3 \cdot \sqrt{3} \cdot r' \cdot a^3}{3 \cdot \sqrt{3} \cdot a}} = 3 \sqrt{r' \cdot a^2}$$

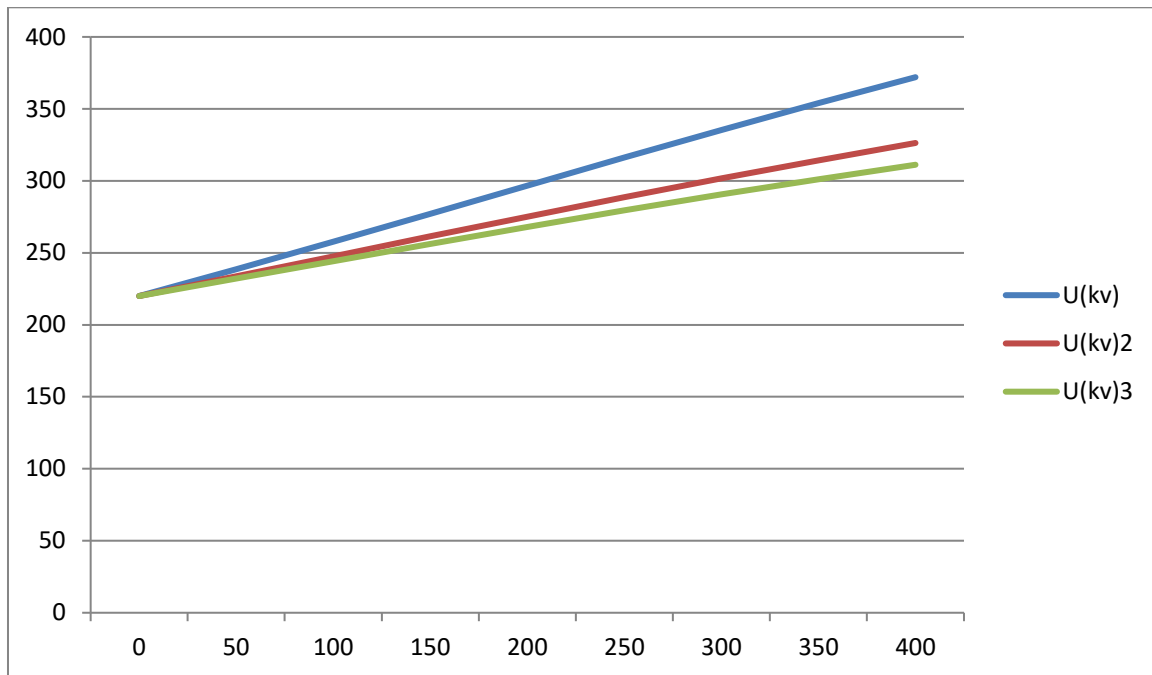
$$p^* = 1.11$$

$$Q^* = 1.05$$

$$\alpha = 0.06$$

L (km)	Ua	Ur	U (kv)	δ (°)	ΔU%
0	220	0	220	0	0
50	231.78	12.78	232.13	3.15	5.51
100	242.94	25.52	244.27	5.99	11.03
150	252.42	38.20	256.28	8.57	16.49
200	263.22	50.77	268.07	10.91	21.85
250	272.29	63.20	279.52	13.06	27.05
300	280.61	75.46	290.57	15.05	32.07
350	288.17	87.51	301.16	16.89	36.89
400	294.93	99.32	311.20	18.61	41.45

Le graph $U=f(L)$:



Analyse et commentaire :

D'après la figure (4) on constate une amélioration du régime de tension en passant de la conception simple de la ligne à la conception en faisceau.

L'écart de variation de la tension est plus important lorsque la longueur de la ligne augmente.

En effet le passage à la conception faisceau avec 3 conducteurs par phase et marqué par un écart de tension moins important que celui de la conception avec deux conducteurs par phase.

On note une amélioration du régime de tension de la ligne presque sur la totalité de sa longueur.

Conclusion :

L'électricité est transmise à haute tension (115 kV ou plus) pour réduire la perte d'énergie qui se produit dans la transmission à longue distance. La puissance est généralement transmise par des lignes électriques aériennes. La transmission d'énergie souterraine a un coût d'installation significativement plus élevé et des limitations opérationnelles plus grandes, mais réduit les coûts de maintenance

Pour le régime de puissance les écarts de tension des menus avec la diminution de la puissance de charge mais resste presque sur toute la longueur de la ligne. les problèmes spécifiques des écarts de tension ainsi proposé par la nécessité de réaliser un transport d'énergie électrique a des grande distance peuvent être partiellement ésolus, pendant les étapes de l'élaboration de la ligne par un bon choix de la configuration de ses phases en faisceau.

Bibliographie

**cours de fonctionnement et d'exploitation.*

**Mémoire de fin d'étude.*

**Transport d'énergie électrique à très grande distance et en très grande quantité en utilisant le courant alternatif Considérations sur Tinterconnexion Inga-Shaba PAR G. de Rosenbaum*

**Donald G. Fink and H. Wayne Beaty, Standard Handbook for Electrical Engineers, 11 e édition, McGraw-Hill, New York, 1978*

**Ligne de transmission - Définition et Explications (www.techno-science.net)*

**Electrotechnique 4ieme édition par WILDI et SYBILLE.*

**Les lignes du transport HT par ELEC international symposium.*