

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement Supérieur
et de la Recherche scientifique



Université d'EL-Oued
Faculté des Sciences et de la Technologies



Mémoire de Fin d'Etude
En vue de l'obtention du diplôme de

LICENCE ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et de Technologies

Filière: Génie Électrique

Spécialité: Réseaux Électriques

Thème

Etude de l'effet pelliculaire
(Effet de peau) sur les lignes de transport
d'énergie électrique

Encadré par :
M. BESSOUS Nouredine

Réalisé par :
- DEHIMI Abdelhafedh
- BEHIR Abdesselam
- HAICHA Sofiane

Année universitaire : 2013/2014

Sommaire

Introduction Générale	1
-----------------------------	---

Chapitre I : Généralités Sur Le réseau Electrique

I-1 Introduction	2
I-2 Structure générale des réseaux électriques.....	2
I-3 Production d'énergie électrique.....	2
I -3-1 Les Centrales électriques.....	3
I-3-2 L'alternateur.....	3
I-4 Transport.....	4
I-4-1 Caractéristiques générales de transport et de la distribution.....	5
I-4-2 Principes fondateurs des réseaux électriques	5
I-4-3 Transport en haute tension, facteur de puissance quasi unitaire	5
I-4-4 Les niveaux de tensions des réseaux	7
I-4-5 Les lignes électriques.....	7
I-4-6 Composants des lignes aériennes	8
I-4-6-1 Les pylônes	8
I-4-6-2 Les câbles conducteurs.....	8
I-4-6-3 Câbles de garde.....	9
I-4-6-4 Les isolateurs.....	9
I-4-6-5 Les parafoudres.....	9
I-4-6-6 Eclateurs à cornes.....	10
I-4-6-7 Disjoncteurs.....	11
I-4-6-8 Les fusibles.....	11
I-4-6-9 Interrupteurs.....	11
I-4-7 Les postes électriques.....	12
I-4-8 Transformateur	13
I-4-9 Classification des transformateurs.....	15
I-4-10 Matériels de surveillance et de commande.....	16
I-4-10-1 Protection des réseaux électriques.....	16
I-4-10-2 Matériel de conduite et de surveillance.....	16
I-5 Consommation d'énergie électrique.....	17
I-5-1 Réseau de distribution électrique.....	17
I-5-2 Équilibre production – consommation.....	18

Sommaire

I-5-3 Réglementer la distribution de l'électricité.....	18
I-6 Organisation.....	19
I-7 Conclusion	19

Chapitre II : Etude de L'effet Pelliculaire

II -1 Introduction	20
II-2 Le courant électrique.....	20
II-2-1 Le courant continu.....	20
II-2-2 Le courant alternatif :	20
II-3 Comparaison entre le régime alternatif et continu.....	21
II-3-1 Le Système triphasé.....	22
II-3-2 Tensions triphasées équilibrées.....	23
II - 4 L'effet du courant.....	24
II – 4 -1 Type d'effet.....	24
II- 4 -2 Effet de peau.....	24
II-4-3 Classification.....	25
II-5 Explication du phénomène.....	26
II-6 Effet de peau pour un conducteur et les pertes.....	28
II-7 La coque fictive.....	28
II-8 Effet de peau dans les conducteurs cylindriques.....	29
II-9 Modélisation de l'effet pelliculaire dans un conducteur cylindrique en régime harmonique	29
II-10 Effet de peau dans un conducteur de section rectangulaire.....	30
II-11 Approche sur le champ magnétique extérieure.....	32
II-12 Épaisseur de peau dans un métal.....	32
II-13 Exemples de valeurs.....	34
II-14 Éviter L'effet de peau.....	34
II-15 Conclusion.....	36
Conclusion Générale.....	37

Introduction générale

Introduction générale

Des millions de kilomètres de câbles, des milliers de centrales et des milliards d'appareils interconnectés... Véritable colonne vertébrale du système électrique, les réseaux ont toujours accompagné la modernisation de nos sociétés.

Les problèmes ajoutés ou bien avec le réseau électrique impose une obligation de faire corriger à raison d'améliorer le système, l'un des obstacles intéressante c'est l'effet de peau.

Lorsqu'une pièce métallique est soumise à un champ magnétique variable, elle est le siège de courants conformément à la loi de Faraday-Lenz (3ème équation de Maxwell) et à la loi d'Ohm. Étant donné la résistivité finie du métal, ces courants, appelés courants de Foucault, provoquent des pertes par effet Joule. C'est notamment le cas dans le réseau électrique, les transformateurs, les moteurs et les actionneurs électromagnétiques. Les pertes par hystérésis concernent les matériaux ferromagnétiques et ont pour origine l'énergie qu'il faut fournir pour changer le sens de la magnétisation. L'étude de ces phénomènes est utile pour bien choisir les matériaux selon l'application et prendre les mesures adéquates pour les minimiser ces pertes.

L'effet pelliculaire porte une importance considérable en électricité, pour cela notre travail se base de donner une aperçu sur ce phénomène.

Chapitre 1

Généralités sur le réseau électrique

Généralités sur le réseau électrique

I-1 Introduction :

A notre époque, et sans électricité, la vie quotidienne serait difficilement envisageable, il est donc nécessaire de savoir la produire de manière efficace et continue. Pour répondre à la consommation croissante d'électricité, il a fallu inventer et construire des usines (centrales électriques) capables de produire de l'électricité en grande quantité. Une fois le courant produit, il doit être amené jusque chez le consommateur. Dans un pays, le Transport et la Distribution Publique assurent le transit de l'énergie électrique entre les points de production et les points de consommation.

I-2 Structure générale des réseaux électriques :

De façon très générique, un réseau électrique est toujours dissocié en quatre grandes parties:

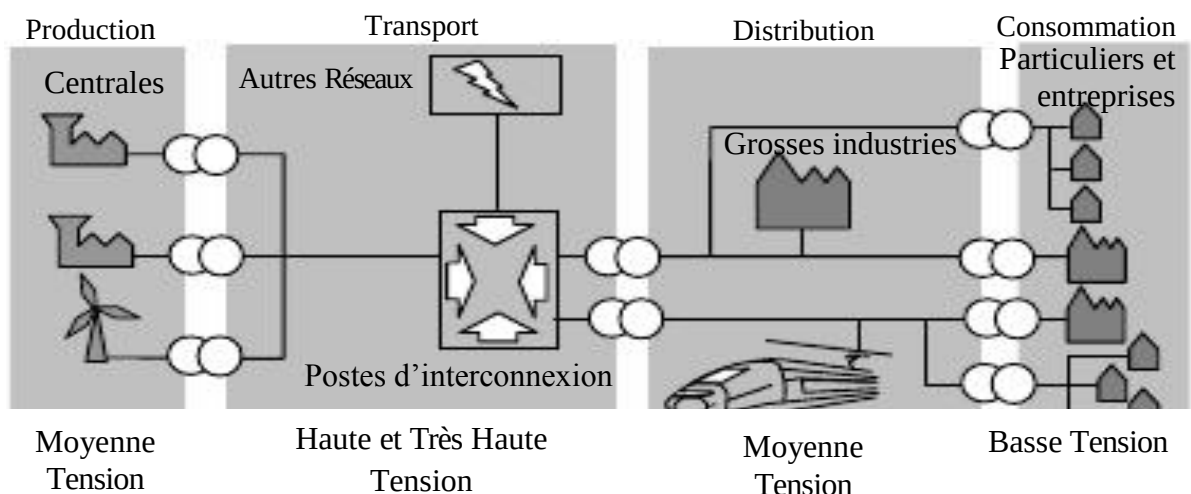


Figure I-1 : Réseau électrique simplifié.

I-3 Production d'énergie électrique :

Elle consiste à la génération de l'ensemble de la puissance consommée par le réseau tout entier. En grande majorité, les tensions (courants) associées à cette production sont produites sous la forme et d'après un système triphasé par l'intermédiaire des alternateurs entraînés à partir de divers types de sources d'énergie dites « primaires ».

Généralités sur le réseau électrique

I -3-1 Les Centrales électriques :

Il existe cinq principaux types de centrales électriques :

- Les centrales thermiques.
- Les centrales nucléaires.
- Les centrales hydroélectriques.
- Les centrales solaires ou photovoltaïques.
- Les centrales éoliennes.

Les éléments indispensables à la production de courant électrique sont :

- Une turbine en mouvement.
- Un alternateur c'est-à-dire un aimant entraîné par la turbine et entouré d'une bobine qui produit le courant électrique.

I-3-2 L'alternateur :

L'alternateur fait la transformation d'énergie mécanique en énergie électrique. Il est utilisé dans toutes les centrales électriques quelle que soit la source d'énergie exploitée.

La conversion utilise la loi d'induction de Faraday : (un champ magnétique alternatif ou mobile induit un courant électrique dans un circuit conducteur).

Un alternateur est de manière simplifiée est composé de deux parties comme:

Alternateur = rotor tournant à l'intérieur d'un stator (figure I-2) :

- Le rotor (inducteur) est un électro-aimant.
- Le stator (induit) est un cylindre fixe avec des enroulements en cuivre dans lequel est génère un courant alternatif triphasé suite à la rotation du rotor [1].

Généralités sur le réseau électrique



Figure I-2 : Alternateur de forte puissance 1300 MW - 1500 t/min- 50Hz triphasé.

I-4 Transport :

Il consiste à acheminer les puissances produites par les unités de production auprès des lieux de consommation. Les grandes centrales étant en général groupées autour des fleuves, des cours d'eau et des océans, le « grand transport » consiste à parcourir de longues distances en direction des extrémités vers les clients (abonnés). L'ordre de grandeur de ces distances impose, entre autre, le fait de véhiculer l'énergie électrique sous très haute tension (figure I-3).

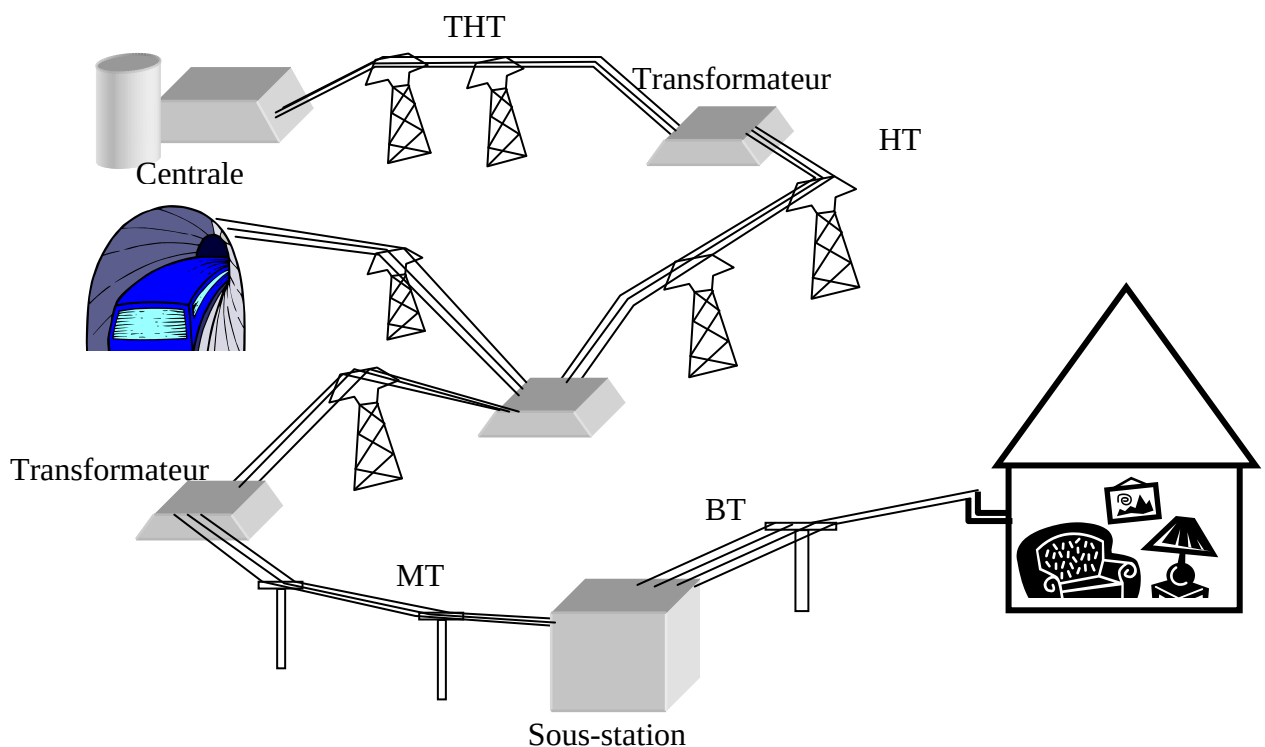


Figure I-3 Les étapes de transport pour un réseau électrique.

Généralités sur le réseau électrique

I-4-1 Caractéristiques générales de transport et de la distribution :

Les réseaux, en très grande majorité, transportent l'énergie électrique sous la forme de systèmes triphasés. Les dispositions des grandeurs caractéristiques de ces systèmes sont ainsi:

- Leur fréquence.
- Leurs niveaux de tension.
- Leurs différents types de couplage.

I-4-2 Principes fondateurs des réseaux électriques :

En règle générale, les grands réseaux électriques du monde se ressemblent. Cette similitude s'explique par l'existence de grands principes de base à tous, de grandes contraintes, qui justifient les structures et la nature des installations propres au transport et à la distribution de l'énergie électrique qui ont un appui scientifique et logique. Il est important, pour un électrotechnicien, de bien saisir ces différentes notions fondatrices [2].

I-4-3 Transport en haute tension, facteur de puissance quasi unitaire :

De façon absolument générale, il n'est concevable de transporter l'énergie électrique sur de grandes distances qu'à partir d'une tension relativement élevée. Il suffit, pour s'en convaincre, de considérer le schéma simplifié d'un transport d'énergie électrique représenté sur la figure I-4, et de noter les points suivants :

- Tout conducteur électrique possède une certaine impédance. Transporter l'énergie électrique sur de longues distances revient à utiliser des conducteurs très longs dont l'impédance équivalente n'est absolument pas négligeable. Sur la figure I-4, La partie réelle de cette impédance correspond à une résistance notée R .
- Le transport de l'énergie électrique revient, de façon générale, à la liaison par une ligne (ou un câble) d'une source vers un récepteur. L'objectif principal de cette liaison est la fourniture de la puissance $P = k.V.I$ où V est la tension efficace appliquée à la charge, I le courant efficace et k le facteur de puissance du récepteur [2].

Généralités sur le réseau électrique

- La puissance perdue par effet Joule dans la ligne s'écrit ainsi :

$$P_R = R.I^2 = R \frac{P^2}{K^2.V^2}$$

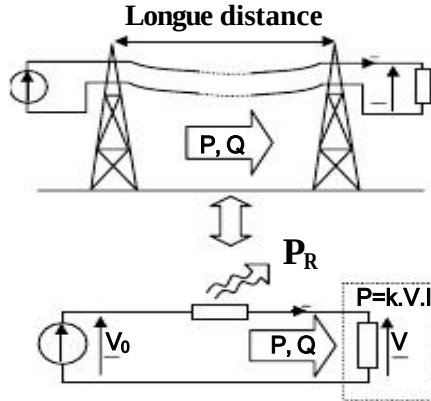


Figure I-4 :Transport simplifié de l'énergie électrique.

À puissance fournie constante, la minimisation des pertes dans la ligne passe donc par deux points essentiels :

- **La tension V (et donc V_0) doit être la plus grande possible.**
- **Le facteur de puissance doit être le plus proche possible de l'unité.**

Autrement dit, le transport lointain de l'énergie électrique ne peut se faire à **bon rendement** que sous haute, voire très haute, tension. On montre parallèlement que l'usage de hautes tensions permet à la fois de **réduire la sensibilité des tensions** à la circulation d'énergie réactive et **d'augmenter les puissances maximales** transmissibles.

En pratique, les plus hautes tensions utilisées dans le monde correspondent à des territoires très étendus où les distances entre production et consommation sont très grandes. Si la valeur de 400 kV constitue la tension d'exploitation la plus haute d'une majorité de grands réseaux.

Exemple :

- Il existe au Canada des lignes à 750kV entre phases .
- On recense même en Russie la valeur de 1 MV .

Généralités sur le réseau électrique

Il devient très difficile d'aller au-delà de ces tensions en raison des difficultés d'isolement des câbles par rapport aux pylônes. Parallèlement, les réseaux fonctionnent de telle manière à ce que le facteur de puissance associé à l'ensemble des récepteurs soit très proche de l'unité.

À tension donnée, il est également possible de minimiser les pertes en minimisant la résistance des lignes. Ceci n'est possible qu'en augmentant la section équivalente des conducteurs, c'est-à-dire également leur poids et le gabarit de l'ensemble des infrastructures. Concrètement, ce n'est pas envisageable sur de longues distances [2].

I-4-4 Les niveaux de tensions des réseaux :

- D'une façon générale, la plupart des pays mettent en œuvre :
- Un réseau de transport THT 220 800 KV
- Un réseau de répartition HT 60170 KV
- Un réseau de distribution MT 5 36 KV (selon CEI)
- Un réseau de livraison de l'abonné BT 400/230 V

I-4-5 Les lignes électriques :

Le genre de ligne utilisée est imposé par les facteurs suivant [3]:

- Puissance active à transporter.
- Distance de transport.
- Coût.
- Esthétique, encombrement et facilité d'installation. Nous distinguons quatre types de lignes.

• Lignes de transport THT :

Ces lignes qui relient les centrales éloignées aux centres d'utilisation. Ces lignes peuvent atteindre des longueurs de 1000 km et elles fonctionnent à des tensions allant jusqu'à 765 Kv.

Généralités sur le réseau électrique

- **Lignes de transport HT :**

Ces les lignes reliant les postes de transformation principaux aux les centrales de génération.

- **Lignes de distribution MT :**

Ces les lignes qui relient les clients aux postes de transformation principaux de la compagnie d'électricité.

- **Lignes de distribution BT :**

Ces les lignes installées à l'intérieur des édifices, usines et maisons pour alimenter les moteurs, cuisinières, lampes, etc.

I-4-6 Composants des lignes aériennes :

Une ligne aérienne est composée de pylônes (supports), de câbles conducteurs et des isolateurs.

I-4-6-1 Les pylônes :

Le rôle des pylônes est de maintenir les câbles à une distance minimale de sécurité du sol et des obstacles environnants, afin d'assurer la sécurité des personnes et des installations situées au voisinage des lignes.

I-4-6-2 Les câbles conducteurs :

Les énergies transportées sont principalement sous forme triphasées, on trouvera au moins 3 conducteurs par lignes , Les conducteurs en cuivre sont de moins en moins utilisés. En général les conducteurs sont conçus avec un alliage d'aluminium.

On utilise de l'aluminium qui possède certes moins de conductivité, mais qui est avantageux pour son poids permettant une réduction de pylônes très coûteux. Les conducteurs sont nus, et la section d'un conducteur est d'en moyenne 500mm². Il faut ajouter qu'il y a deux conducteurs par phase soit 1000mm² par phase. On utilise deux

Généralités sur le réseau électrique

conducteurs par phase à cause des effets de peaux ce qui provoque donc des pertes supplémentaires, voir la figure I-5 [3].



Figure I-5 : Section de la surface du câble conducteur.

I-4-6-3 Câbles de garde :

Les câbles de garde ne conduisent 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 foudrolement des conducteurs. Ils sont en général réalisés en acier. Au centre du câble d'acier on place parfois un câble fibre optique qui sert à la communication de l'exploitant.

I-4-6-4 Les isolateurs :

L'isolation entre les conducteurs et les pylônes est assurée par des isolateurs (chaînes d'isolateurs). Ceux-ci sont réalisés en verre, en céramique, ou en matériau synthétique. Les isolateurs 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, voir la figure I-6.



Figure I-6: Photo d'un isolateur.

I-4-6-5 Les parafoudres :

Les parafoudres sont des appareils destinés à limiter les sur tensions imposées aux transformateurs, instruments et machines électriques par la foudre et par les manœuvres de

Généralités sur le réseau électrique

commutation. La partie supérieure du parafoudre est reliée à un des fils de la ligne à protéger et la partie inférieure est connecté **au sol** par une mise à la terre de faible résistance, généralement de moins d'un ohm (la figure I-7).

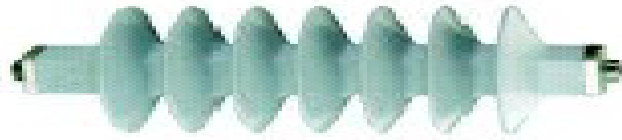


Figure I-7 : Photo d'un parafoudre [3].

I-4-6-6 Eclateurs à cornes :

L'éclateur est un dispositif simple constitué de deux électrodes, la première reliée au conducteur à protéger, la deuxième reliée à la terre. A l'endroit où il est installé dans le réseau, l'éclateur représente un point faible pour l'écoulement des surtensions à la terre et protège ainsi le matériel.

La tension d'amorçage de l'éclateur est réglée en agissant sur la distance dans l'air entre les électrodes, de façon à obtenir une marge entre la tenue au choc du matériel à protéger et la tension d'amorçage au choc de l'éclateur (Figure I-8) [3].

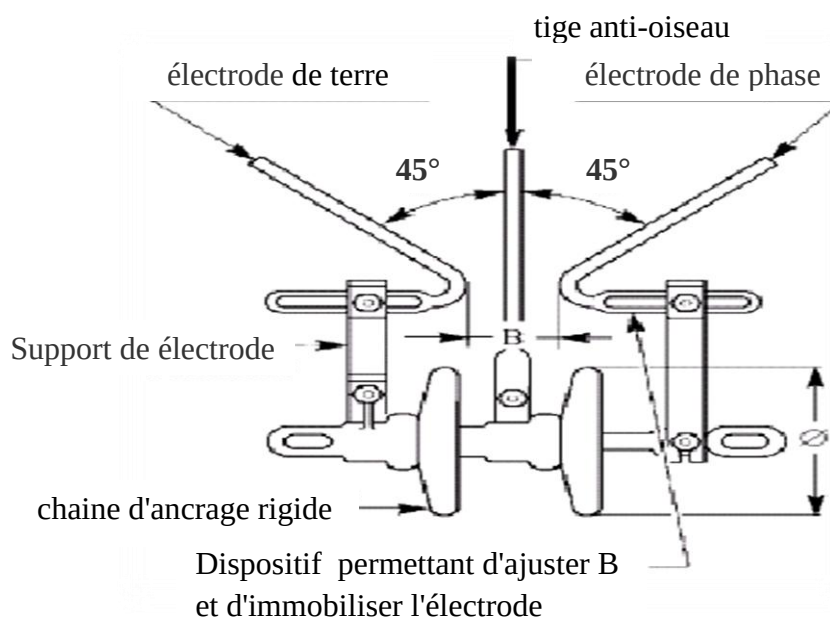


Figure I-8 : Eclateur MT avec tige anti-oiseaux.

Généralités sur le réseau électrique

I-4-6-7 Disjoncteurs :

Un disjoncteur est destiné à établir, supporter et interrompre des courants, sous sa tension assignée (tension maximale du réseau), dans les conditions normales de service et dans les conditions a normales spécifiées (court-circuit). C'est l'appareil de protection par excellence, capable d'une totale capacité d'intervention sans provoquer de sur tension excessive sur le réseau.

I-4-6-8 Les fusibles :

Il est utilisé soit directement comme un dispositif de coupure soit indirectement, connecté au circuit secondaire d'un transformateur de courant, avec un contact de fusion donnant un ordre de déclenchement au disjoncteur. L'inconvénient majeur de ces dispositifs réside dans le fait qu'ils sont endommagés par les défauts et qu'ils sont une faible sensibilité.

L'exploitant doit disposer d'un grand nombre de fusibles de rechange pour les différents calibres. La grande variété de réseaux électriques impose des modèles de fusibles de différentes natures selon l'application.

Il s'agit [3] :

- Des fusibles de type intérieur installés dans des tableaux HT en amont des transformateurs,
- Des fusibles de type extérieur servant de protection aux transformateurs aériens.
- Des fusibles immergés dans la cuve du transformateur.

I-4-6-9 Interrupteurs :

Pour isoler un élément de réseau MT, on dispose d'interrupteurs à commande mécanique(IACM) ; ils sont de deux types (Figure I-9):

Type I : Intensité nominale 200 (A), de pouvoir de coupure 31,5 ou 50 (A) de charge principalement active, et 200 (A) de charge de boucle, et de pouvoir de fermeture 10 (kA)efficace sous 24 (kV).

Généralités sur le réseau électrique

Type II : Intensité nominale 400(A), de pouvoir de coupure 100 (A) de charge principalement active, et 400 (A) de charge de boucle, et de pouvoir de fermeture 10 (kA) efficace sous 24 (kV). C et appareil peut être transformé en appareil télécommandé (IAT) ou en interrupteur automatique à ouverture dans le creux de tension (IACT).

Les appareils de coupure type IACM sont de conception simple et robuste. Leur montage se fait en horizontal sur poteaux : Béton, Métallique ou Bois.

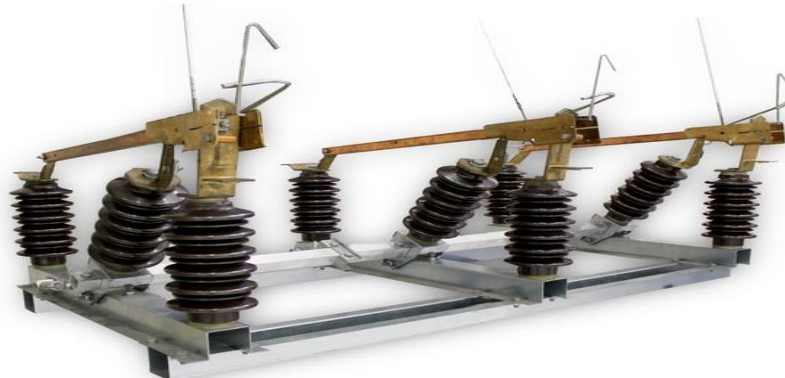


Figure I-9 : Photo d'un interrupteur.

I-4-7 Les postes électriques :

Les postes électriques sont les nœuds du réseau électrique. Ce sont les points de connexion des lignes électriques. Les postes des réseaux électriques peuvent avoir 2 finalités [3] :

- **l'interconnexion entre les lignes de même niveau de tension** : cela permet de répartir l'énergie sur les différentes lignes issues du poste .
- **la transformation de l'énergie** : les transformateurs permettent de passer d'un niveau de tension à un autre.

De plus, les postes électriques assurent des fonctions stratégiques :

- **Assurer la protection du réseau** : un système complexe de protection permet qu'un défaut sur un seul ouvrage n'entraîne pas la mise hors tension de nombreux ouvrages, ce qui risquerait de mettre une vaste zone hors tension. Cette protection est assurée par des capteurs qui fournissent une image de la tension et du courant à des relais de

Généralités sur le réseau électrique

protection, lesquels élaborent des ordres de déclenchement à destination des disjoncteurs.

- **permettre l'exploitation normale du réseau** : présence de plusieurs jeux de barre et de couplage afin de pouvoir prendre différents schéma électriques .
- **assurer la surveillance du réseau** : la tension du réseau et l'intensité dans les lignes sont surveillées dans les postes électriques, via des transformateurs de mesure, de tension et de courant.

I-4-8 Transformateur :

Les paramètres des transformateurs dépendent principalement du type de transformateur étudié et de ses caractéristiques. Le type de refroidissement utilisé, la puissance nominale, la charge, la température d'opération, le nombre d'enroulements, et l'âge du transformateur sont des variables qui influencent le calcul et la mesure des paramètres d'un transformateur. De plus, les impédances varient en fonction de la fréquence à laquelle elles sont calculées. En augmentant la fréquence, la résistance équivalente aura tendance à augmenter due à l'effet pelliculaire, alors que l'inductance équivalente aura tendance à diminuer [4].

Un modèle de transformateur très utilisé est celui présenté à la figure I-10. La méthode employée pour déterminer les paramètres de ce modèle se résume en deux essais : essais en circuit ouvert et essai en court-circuit. Cette méthode est bien documentée dans la littérature

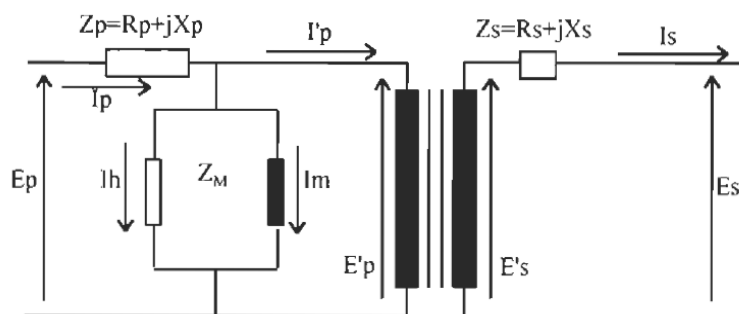


Figure I-10 : Modèle du transformateur.

Certains ouvrages, fournissent des valeurs typiques pour les paramètres des transformateurs. Cependant, il est possible de déterminer les valeurs exactes de ces paramètres, soit par mesure, soit grâce au fabricant. Afin de simuler un réseau typique pour notre étude, il sera donc possible d'utiliser les valeurs retrouvées dans la littérature ou, en

Généralités sur le réseau électrique

dernier recours, d'approximer ces valeurs dans le but d'évaluer l'effet global des perturbations sur le ou les transformateur(s) faisant partie du réseau de distribution. Dans le cadre de la simulation du banc d'essai, nous avons utilisé les valeurs données dans les notices techniques des transformateurs faisant partie du banc d'essai.

Les paramètres à déterminer pour les transformateurs sont :

- Puissance nominale
- Rapport de transformation primaire/secondaire
- Impédance interne
 - Rapport d'impédance ou de court-circuit
 - Rapport X/R

Les deux premières caractéristiques sont faciles à obtenir. Elles sont habituellement inscrites sur le transformateur. Pour ce qui est des impédances internes, leur détermination dépend du transformateur utilisé et de ses caractéristiques propres. Le modèle utilisé dans le cadre de cette étude représente le transformateur comme un diviseur de tension et de courant avec chute de tension causée par l'impédance interne inductive et résistive. Ce modèle est présenté à la figure I-11. Il est possible de rapporter l'impédance du transformateur soit du côté primaire, soit du côté secondaire. Dans notre cas, l'impédance est rapportée du côté secondaire. Elle est déterminée en supposant que le rapport X/R est suffisamment élevé pour évaluer l'impédance inductive à partir de la puissance apparente. La valeur de la résistance est déterminée à partir du rapport X/R typique fixé. Le rapport X/R est typiquement compris entre 10 et 30. Ce rapport est plus bas pour des transformateurs de distribution et plus élevé pour des transformateurs utilisés dans un réseau de transmission à très haute tension. Une valeur typique pour les transformateurs utilisés dans la présente étude se situe autour de 15, ceux-ci étant dans la partie distribution du réseau [4].

Généralités sur le réseau électrique

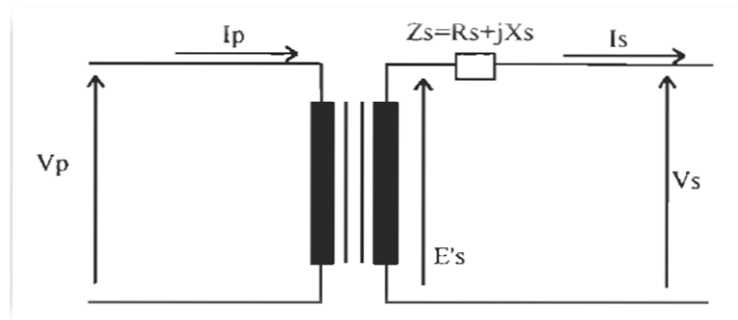


Figure I-11 : Modèle du transformateur employé.

L'impédance inductive sera donc évaluée à partir du calcul de la puissance apparente nominale, celle-ci étant connue. L'équation 1-3 permet de calculer l'impédance inductive équivalente du modèle en fonction de la puissance apparente nominale du transformateur, du rapport de courtcircuit (rapport d'impédance) et de la tension nominale d'opération .

$$Z_L = \frac{R_{cc} V_{nom}}{S_{nom}}$$

$$L = \frac{Z_L}{\omega}$$

Afin de calculer l'impédance résistive équivalente du modèle de transformateur, on se sert du rapport X/R. Lorsque celui-ci n'est pas fourni par le fabricant, il sera nécessaire d'approximer cette valeur en utilisant des valeurs typiques ou de faire les essais en court-circuit et en circuit ouvert afin de déterminer les impédances équivalentes .

$$Z_R = \frac{Z_L}{X/R}.$$

I-4-9 Classification des transformateurs :

- **Petits transformateurs** : Ils ont des puissances de moins de 1Kva en général en monophasé.
- **Transformateurs spécialisés** : Ils ont des puissances de 1 à 25 KVA soit en monophasé soit en triphasé.
- **Transformateurs de distribution** :
 - o Les transformateurs sur poteaux de 25-50-100 KVA.

Généralités sur le réseau électrique

- Les transformateurs dans des postes de distribution 100 à 2000 KVA.
- **Transformateurs pour le transport et l'interconnexion** : Ils ont des puissances de 2000 KVA à 1350 MVA.
- **Transformateurs spéciaux** : Ce sont les transformateurs pour les postes de soudure à l'arc, les fours à induction, les transformateurs de mesure etc...

I-4-10 Matériels de surveillance et de commande :

I-4-10-1 Protection des réseaux électriques :

Tout réseau électrique possède des systèmes de protection pour déconnecter le système de production en cas de défaut sur la ligne. L'objectif est de protéger les 3 constituants d'un système électrique :

- les organes de production (alternateur).
- les composants des réseaux de transport et de distribution (lignes aériennes et souterraines, transformateurs, jeux de barre) .
- les organes de consommation (clients finaux) .

I-4-10-2 Matériel de conduite et de surveillance :

La conduite s'effectue depuis des centres de conduite régionaux (dispatchings) ou nationaux .comprenant des dispositifs permettant :

- de commander les organes de coupure (disjoncteurs, sectionneurs),
- de connaître la position de ces organes.
- de mesurer un certain nombre de grandeurs (tension, intensité, fréquence) .
- de signaler des dysfonctionnements (alarmes) .

Un important réseau de voies de télécommunication fiables et sécurisées est nécessaire pour échanger ces informations entre le centre de conduite et les postes qu'il exploite.

Le matériel de surveillance est destiné à l'analyse a posteriori des incidents. Il comprend essentiellement des consigneurs d'état chargés de relever la position des organes de coupure, et des perturbographes qui, grâce à un système de mémoire, restituent

Généralités sur le réseau électrique

l'évolution des tensions et des courants pendant le déroulement des incidents. Lorsque des clients sensibles se trouvent à proximité du poste, des qualimètres, destinés à mesurer les coupures brèves, peuvent aussi être installés. Les données fournies par ces équipements sont consultées sur place. Par commodité, elles peuvent être transmises à distance, mais la fiabilité demandée aux voies de transmission utilisées est moins importante que dans le cas précédent [4].

I-5 Consommation d'énergie électrique :

Chaque récepteur électrique connecté au réseau consomme une puissance active et une puissance réactive. La consommation domestique, qui est généralement majoritaire, est se fait sous basse tension souvent monophasée (100 à 250 V). Certains « clients » industriels (grosses usines, ferroviaire, etc.) sont directement reliés en moyenne, haute ou très haute tension.

I-5-1 Réseau de distribution électrique :

Les réseaux de distribution ont pour but d'alimenter l'ensemble des consommateurs. Il existe deux sous niveaux de tension :

- les réseaux moyenne tension (anciennement MT devenu HTA de 3 à 50 kV)
- les réseaux basse tension (anciennement BT devenu BTB de 110 à 600 V), sur lesquels sont raccordés les utilisateurs domestiques.

Contrairement aux réseaux de transport et répartition, les réseaux de distribution présentent une grande diversité de solutions techniques à la fois selon les pays concernés, ainsi que selon la densité de population.

Les réseaux à moyenne tension (MT) ont de façon très majoritaire une structure arborescente, qui autorise des protections simples et peu coûteuses : à partir d'un poste source (lui-même alimenté par le réseau de répartition), l'électricité parcourt une artère (ou ossature) sur laquelle sont reliées directement des branches de dérivation au bout desquelles se trouvent les postes MT/BT de distribution publique, qui alimentent les réseaux basse tension (BT) sur lesquels sont raccordés les plus petits consommateurs. La structure arborescente de ces réseaux implique qu'un défaut sur une ligne électrique MT

Généralités sur le réseau électrique

entraînera forcément la coupure des clients alimentés par cette ligne, même si des possibilités de secours plus ou moins rapides existent [2].

Les réseaux de distribution sont généralement basés sur une structure arborescente de réseau : à partir d'un poste source (en rouge), l'énergie parcourt l'artère ainsi que ses dérivations avant d'arriver aux postes de transformation HTA/BTB [5].

I-5-2 Équilibre production – consommation :

L'électricité est une des rares énergies non stockable à grande échelle (hormis via les batteries, ou les barrages considérés comme des réserves d'énergie électromécanique à faible inertie). En permanence, les opérateurs des réseaux doivent s'assurer de l'équilibre entre l'offre et la demande. En cas de déséquilibre, on observe principalement deux phénomènes :

a - une consommation supérieure à la production : le risque de délestage fréquence métrique ou de black out n'est pas exclu, (perte rapide du synchronisme sur les alternateurs).

b - une production supérieure à la consommation : il peut y avoir dans ce cas une accélération des machines synchrones qui produisent l'électricité et un emballement pouvant conduire également à un black out par l'intermédiaire de protections fréquentométriques. Cette situation est connue des systèmes électriques insulaires où la sur-production notamment éolienne entraîne parfois des fréquences « hautes » [2].

Les interconnexions entre pays et des dispositifs d'« effacement » temporaire de certains consommateurs permettent de diminuer le risque de black out à l'échelle des pays, les pays étant « solidaires les uns aux autres » dans la gestion de l'équilibre offre - demande : on parle ici de réserve primaire mutualisée.

Généralités sur le réseau électrique

I-5-3 Réglementer la distribution de l'électricité :

Un réseau de distribution est généralement organisé radialement, chaque point de connexion au réseau de moyenne tension desservant un « arbre » se subdivisant à plusieurs reprises avant d'atteindre les transformateurs de distribution [2].

Ces réseaux radiaux se rejoignent en des points d'interconnexion normalement ouverts : ils permettent, au besoin, de fournir une source alternative d'électricité à une partie d'un réseau radial voisin, en cas de panne du tracé de desserte normal.

I-7 Conclusion :

On a fait dans ce chapitre une étude générale du réseau électrique, avec l'étude de ses différents composants nécessaire à la production, au transport, à la distribution et à la livraison de l'énergie électrique. Le but premier d'un réseau d'énergie est de pouvoir alimenter la demande des consommateurs. Comme on ne peut encore stocker économiquement et en grande quantité l'énergie électrique il faut pouvoir maintenir en permanence l'égalité : **Production = Consommation + pertes** Le réseau électrique doit permettre de livrer aux utilisateurs un bien de consommation adapté à leurs besoins, caractérisé.

Chapitre 2

Effet de peau

Etude de l'effet pelliculaire

II -1 Introduction :

L'effet de peau ou effet pelliculaire (ou plus rarement effet Kelvin) se produit dans tous les conducteurs parcourus par un courant électrique alternatif. Ce phénomène est accentué sur la fréquence de la tension qui est élevée. L'effet de peau signifie que le courant électrique ne circule pas uniformément dans toute la section du conducteur. C'est comme si la section du conducteur était plus petite, ce qui provoque alors une résistance plus élevée et donc des pertes joules plus importantes. Pour éviter ce phénomène il y a plusieurs possibilités mais dans le cas de la Haute tension seul la division des conducteurs sont appropriée [6].

II-2 Le courant électrique :

Il existe deux types de courant :

II-2-1 Le courant continu :

C'est un courant électrique continu (CC ou DC) dans lequel les électrons circulent continuellement dans la même direction, c'est-à-dire du pôle négatif vers le pôle positif. Sa vitesse de déplacement est de plusieurs mètres par heure avec une propagation, il a aussi plusieurs formes différentes (continu, continu ondulé, ...) [2].

II-2-2 Le courant alternatif :

C'est l'autre type de courant électrique qui est alternatif (CA ou AC). Les électrons circulent de manière alternative et la circulation des électrons s'effectue aux deux sens du circuit. En fait, c'est la rotation d'un alternateur qui génère un mouvement de va et vient des électrons, pour cela le courant alternatif est caractérisé par la fréquence [2].

Etude de l'effet pelliculaire

II-3 Comparaison entre le régime alternatif et continu :

Le tableau ci-dessous résume la différence entre les deux courants [2].

	Régime alternatif	Régime continu
Avantages	• Permet l'utilisation de transformateurs pour élever et abaisser la tension. • Facilite la coupure des courants par le passage naturel par zéro 2 fois par période c'est à dire 100 fois par seconde. • Production directe par alternateurs.	• Pas d'effet réactif, le facteur de puissance est unitaire (en dehors de déformations). • Facilite l'interconnexion de des réseaux, il suffit d'avoir partout la même tension. • Pas d'effet de peau, les câbles et les lignes sont plus simples et moins chers.
Inconvénients	• Implique des effets inductifs et capacitifs pénalisants pour un certain nombre de raisons (facteur de puissance <1 principalement). • Difficulté d'interconnexion de plusieurs réseaux (il faut garantir l'identité de la tension, de la fréquence et de la phase). • Implique un effet « de peau » (voir II-4-2).	• Difficulté de couper les courants continus, d'où des dispositifs de coupure plus performants et plus chers. • Terminaisons très coûteuses. • Impossibilité de produire ou d'élever la tension dans le domaine des très hautes tensions d'où des pertes importantes sur les lignes.

Tableau II-1 : Les avantages et les inconvénients des deux courants [2].

La distribution d'énergie électrique (même le transport) se fait par le courant alternatif et d'après un système triphasé.

Etude de l'effet pelliculaire

La fréquence :

Un courant alternatif périodique est caractérisé par sa fréquence, mesurée en hertz (Hz). C'est le nombre d'« allers-retours » qu'effectue le courant électrique en une seconde. Un courant alternatif périodique de 50 Hz effectue 50 « allers-retours » par seconde, c'est-à-dire qu'il change 100 fois (50 allers et 50 retours) de sens par seconde.

La fréquence du courant électrique distribué par les réseaux aux particuliers est généralement de 60 Hz en Amérique du Nord (avec des autres pays) et 50 Hz en Europe et quelques autres pays.

II-3-1 Le Système triphasé :

Le transport de l'énergie électrique depuis les lieux de production (source) jusqu'aux lieux de distribution (charge) se fait à travers trois fils (Figure1).

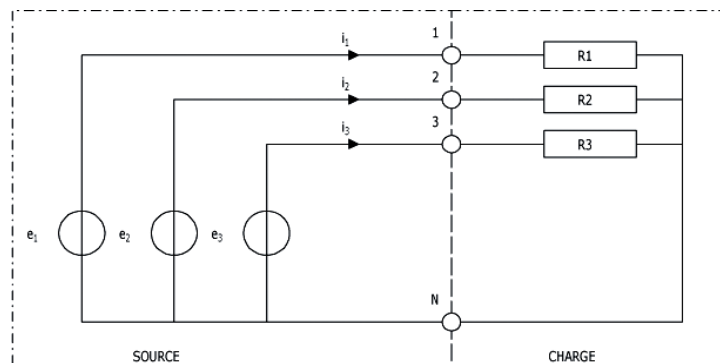


Figure II-1 : circuit d'alimentation en triphasé.

- Trois bornes 1, 2, 3, correspondant aux trois fils de transport et sont appelées "phases" ou "lignes"
- Une borne N appelée "neutre" permet d'assurer une tension constante aux récepteurs dans les installations non équilibrées (cas général) et la circulation du courant de neutre.

Etude de l'effet pelliculaire

II-3-2 Tensions triphasées équilibrées :

Ce sont surtout les installations industrielles qui sont alimentées par du courant alternatif triphasé. Un circuit triphasé reçoit trois tensions sinusoïdales de même fréquence et déphasées de 120° l'une par rapport à l'autre. Le système triphasé est dit équilibré lorsqu'il est formé de trois grandeurs ayant la même valeur efficace (ou la même amplitude) [7].

Dans un tel système l'expression des tensions est la suivante :

$$u_1 = U \sin \omega t$$

$$u_2 = U \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right)$$

$$u_3 = U \sin \left(\omega t - \frac{4\pi}{3} \right)$$

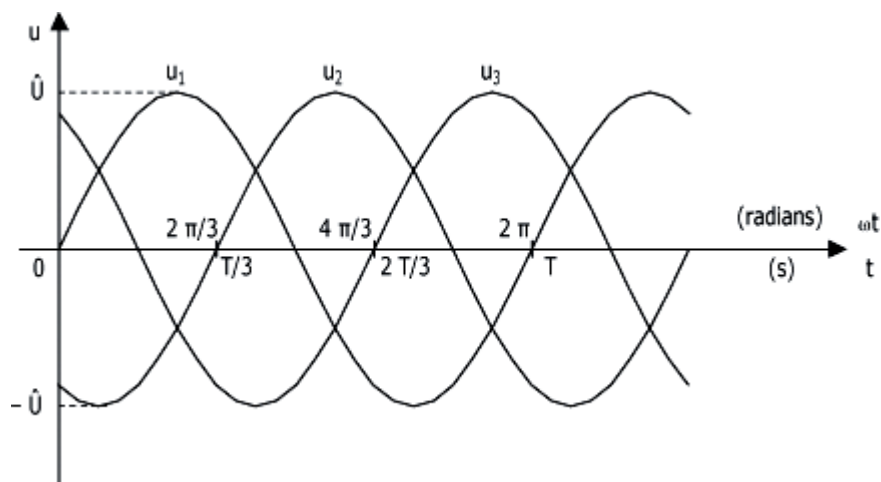


Figure II-2 : Trois tensions u_1 , u_2 et u_3 d'un système triphasé équilibré.

Etude de l'effet pelliculaire

II - 4 L'effet du courant :

II – 4 -1 Type d'effet :

Le courant électrique ne se voit pas, mais c'est à travers ses trois effets que l'on peut le détecter :

- Un effet thermique : Le fil de la lampe à incandescence est chauffé à blanc.
- Un effet magnétique : Une aiguille aimantée est déviée à proximité d'un fil parcouru par un courant.
- Un effet chimique : On obtient des dégagements gazeux sur les électrodes d'un électrolyseur.

II- 4 -2 Effet de peau :

L'effet de peau est un phénomène électromagnétique, si la fréquence est élevée, le courant a une tendance qui ne circule qu'en surface des conducteurs. Ce phénomène d'origine électromagnétique existe pour tous les conducteurs parcourus par des courants alternatifs. Il provoque la dispersion de la densité de courant par mesure qui s'éloigne à la périphérie du conducteur. Il en résulte une augmentation de la résistance du conducteur.

Cet effet peut être utilisé pour alléger le poids des lignes de transmission à haute fréquence en utilisant des conducteurs tubulaires, ou même des tuyaux, afin de trouver une ligne sans perte. Il sert aussi dans le blindage électromagnétique des fils coaxiaux en les entourant d'un mince étui métallique qui garde les courants induits par les hautes fréquences ambiantes sur l'extérieur du câble.

Etude de l'effet pelliculaire

II-4-3 Classification :

Le terme de courant continu recouvre plusieurs sens :

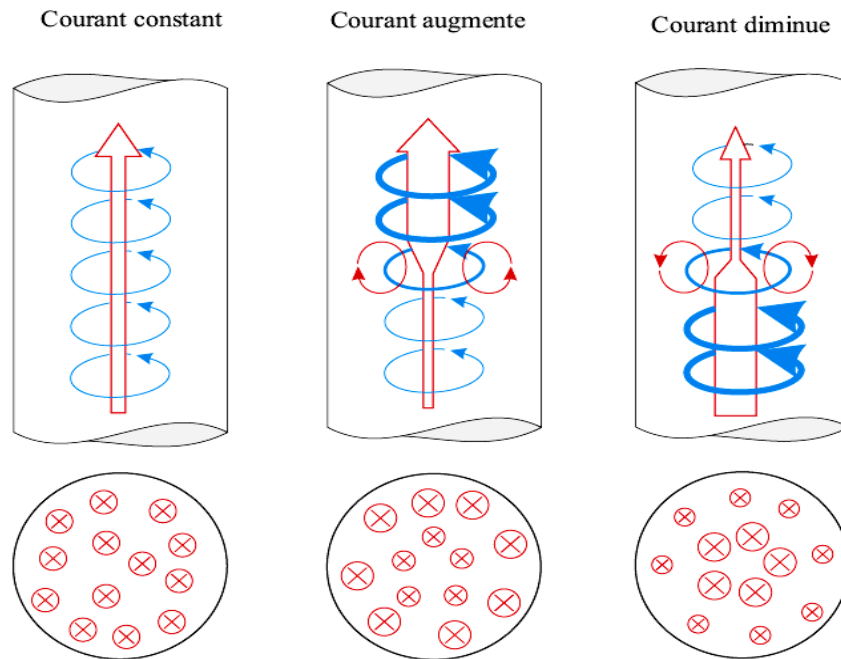


Figure II-5 : Sections dans les conducteurs pendant le passage d'un courant continu.

- **Courant constant :**

On voit sur la figure II-5 que le courant génère bien un flux magnétique tournant dans le fil, mais ce flux constant ne provoque pas l'apparition de courant supplémentaire. C'est le cas du courant continu.

- **Courant augmente :**

Dans ce cas de figure, on voit que lorsque le courant augmente, il y a variation de flux. Une variation de flux dans un matériau conducteur génère des courants induits (courant de Foucault), ses sens comme l'a dit la loi de Lenz, ils sont s'opposent à la cause qui les ont produits. L'effet sur la distribution de courant est d'augmenter le courant sur le pourtour du fil et de diminuer le courant au centre.

Etude de l'effet pelliculaire

- **Courant diminue :**

La diminution du courant provoque une circulation inverse que dans le cas précédent. La cause du courant étant la diminution de flux, les courants vont circuler de manière à maintenir celui-ci, donc augmentation de courant au centre et diminution sur le pourtour.

Cette démonstration ne semble pas probante, puisque l'on a dans un cas un déplacement du courant sur l'extérieur et dans l'autre, un déplacement du courant vers l'intérieur du conducteur. Mais en y regardant mieux, l'effet macroscopique est de s'opposer systématiquement aux variations dans le milieu du fil tandis que l'extérieur tend à varier plus que la moyenne. En fait, le courant tel qu'on le trouve dans le milieu du fil en haute fréquence ne varie plus, il tend vers la valeur moyenne du courant soit pour un courant sinusoïdal: 0 A.

II-5 Explication du phénomène :

L'effet pelliculaire, appelé quelque fois effet de peau ou de Kelvin, est un phénomène électromagnétique qui fait que, à fréquence élevée, le courant a tendance à ne circuler qu'en surface des conducteurs [8].

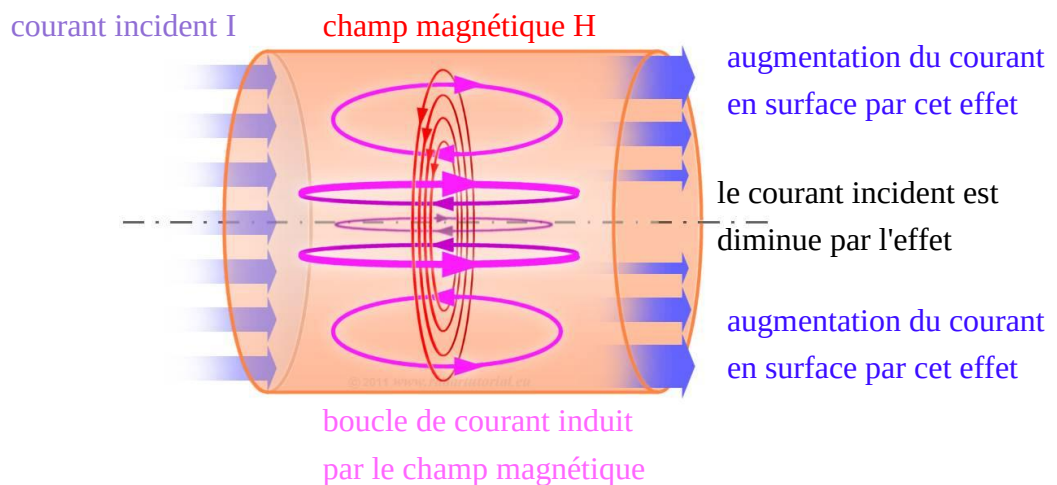


Figure II-6 : Diagramme montrant l'effet pelliculaire [8].

Etude de l'effet pelliculaire

Tout courant se déplaçant dans un conducteur génère un champ magnétique autour de ce dernier. Quand un courant continu traverse un conducteur la différence de potentielle est uniforme et les charges se déplacent dans le conducteur de manière isotrope, ce qui donne un champ magnétique constant (H). Dans un courant alternatif, les charges oscillent et le champ magnétique varie, ce qui induit une boucle de courant électrique inverse.

Dans la figure II-6, on peut voir que la boucle va de la périphérie du conducteur vers le centre. La direction de rotation est toujours inverse à celle de la variation de courant dans le conducteur. Ainsi, la somme du courant alternatif avec celui de la boucle est toujours nulle au centre du conducteur alors que ces deux courants s'additionnent en périphérie. Il en résulte une décroissance de la densité de courant en $1/e$, e étant l'inverse du logarithme naturel, à mesure que l'on s'éloigne de la périphérie du conducteur.

Cette section réduite dans laquelle les charges se déplacent augmente la résistance du conducteur. La résistance de cette mince peau de surface définit donc la résistance équivalente du conducteur et souvent des conducteurs tubulaires sont utilisés pour le courant alternatif afin d'alléger la ligne de transmission. La résistance est proportionnelle avec la fréquence du courant, ce qui peut être un grave inconvénient, et se calcule par l'équation suivante:

$$R_{\omega} = \frac{l}{r} \sqrt{\frac{\mu_0 \mu_r \omega}{4\pi\sigma}}$$

l : longueur du câble.

r : rayon du conducteur.

μ_0 : constante (perméabilité de vide) magnétique.

μ_r : perméabilité magnétique relative du conducteur.

σ : conductivité.

ω : fréquence angulaire (pulsation) ($\omega=2\pi f$).

Etude de l'effet pelliculaire

Cette propriété des courants alternatifs est cependant utile pour blinder les fils coaxiaux des ondes parasites venant de l'environnement. En effet, même un mince enveloppe de métal autour d'un tel câble permettra d'écouler les courants induits par ces ondes en surface sans affecter le signal transmis à l'intérieur.

II-6 Effet de peau pour un conducteur et les pertes :

Ce phénomène d'origine électromagnétique existe pour tous les conducteurs parcourus par des courants alternatifs.

On a donc un courant qui ne circule pas uniformément dans toute la section du conducteur. Tout se passe comme si la section utile du câble était plus petite. La résistance augmente donc, ce qui nous conduit à des pertes par effet joule plus importantes.

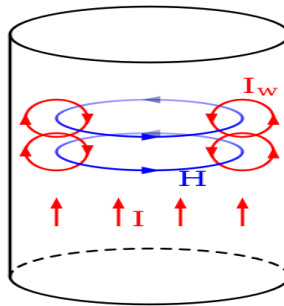


Figure II-7 : Formation de boucle de courant induit par la variation du champ magnétique (H) dans un courant alternatif.

II-7 La coque fictive :

Cherchant à faciliter l'interprétation de l'effet de peau, Boucherot proposa en 1905 la notion de « coque fictive » dénommée aussi « épaisseur de peau » ou « profondeur de pénétration ». Sur le plan de l'effet Joule, tout se passe dans le conducteur comme si la totalité du courant véhiculé l'était dans une couche périphérique ou coque, d'épaisseur δ , la densité de courant étant uniforme dans cette coque et nulle à l'intérieur [9]:

$$\delta = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{10\rho}{\mu f}}$$

Etude de l'effet pelliculaire

Avec :

δ : épaisseur de la coque est exprimée en m

ρ : la résistivité est exprimée en Ω/m

μ : la perméabilité valant $4\pi \cdot 10^{-7}$ pour le vide

f : la fréquence est exprimée en Hz.

II-8 Effet de peau dans les conducteurs cylindriques :

Pour cette forme particulière, les calculs sont moins complexes et les résultats plus précis. Le seul paramètre dont on se préoccupe en général est le rapport K ou coefficient de pertes supplémentaires qui met en évidence, lorsqu'il dépasse trop l'unité, la géométrie inadéquate d'un conducteur. Plusieurs formules empiriques ont été proposées, celle de Levasseur est particulièrement simple et conduit à des erreurs inférieures à 2 % [9]:

$$K = \sqrt[6]{\left(\frac{3}{4}\right)^6 + \left(\frac{S}{P\delta}\right)^6} + 0.25$$

Avec :

S : la section du conducteur.

P : son périmètre.

δ : l'épaisseur de peau.

II-9 Modélisation de l'effet pelliculaire dans un conducteur cylindrique en régime harmonique :

Soit $I(r)$ le courant circulant dans l'épaisseur comprise entre la surface et le rayon r du cylindre, et I le courant total.

Si l'on représente graphiquement le module de la fonction de répartition du courant dans le conducteur cylindrique, c'est-à-dire $|I/I(r)|$, on constate que plus de 80 % du courant circule dans l'épaisseur de peau, ce qui justifie l'approximation faite lors du calcul de la résistance effective du conducteur. Le dépassement de la valeur 1 qui apparaît sur la

Etude de l'effet pelliculaire

figure est dû à la rotation de phase de la densité de courant qui peut s'inverser à certaine profondeur par rapport au courant total [10].

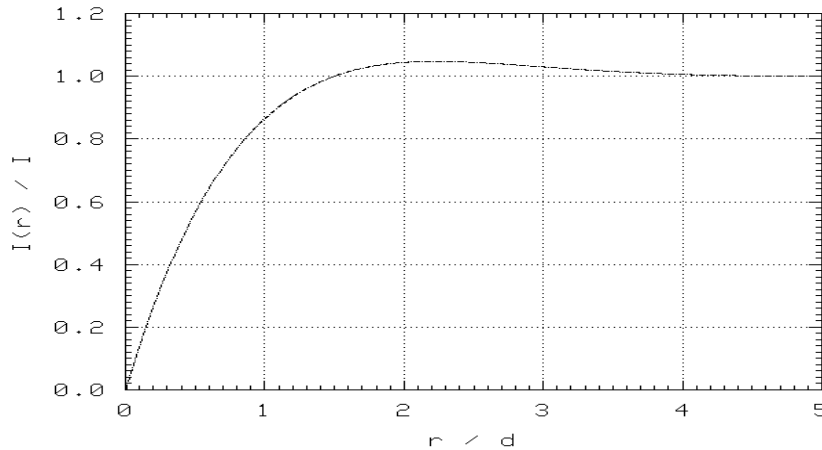


Figure II-8 : Fonction de répartition du courant dans un conducteur cylindrique en régime harmonique [10].

En abscisse : la profondeur en p.u. de l'épaisseur de peau, en prenant la surface pour origine. En ordonnée : le rapport du module du courant circulant entre la surface et une profondeur r donnée sur le module du courant total traversant la section du conducteur. Le rayon a du cylindre a été choisi arbitrairement à 5 fois l'épaisseur de peau.

II-10 Effet de peau dans un conducteur de section rectangulaire :

Les calculs sont dans ce cas beaucoup plus complexes et restent imprécis, compte tenu des hypothèses sur la répartition du champ magnétique. Les auteurs qui s'y sont livrés ont le plus souvent complété leurs résultats par des expérimentations, elles aussi délicates.

D'une façon qualitative, (la Figure11) extraite de l'importante étude de Schwenkhagen et confirmée par Renaud, illustre l'importance du phénomène dans une barre de cuivre de 100 x 10 mm à 50 Hz [9].

Les courbes indiquent, pour chaque point intérieur situé dans l'axe, la densité de courant relative par rapport à la densité moyenne et le déphasage par rapport à la tension.

Etude de l'effet pelliculaire

La détermination par le calcul ou l'expérience du coefficient K de pertes supplémentaires reste cependant sujette à caution, vues les quelques valeurs proposées pour la barre de 100 x 10 en cuivre : 1,19 - 1,18 - 1,15 - 1,14 - 1,05 - 1,008. D'après nos propres recoupements le coefficient 1,15 serait le plus probable [9].

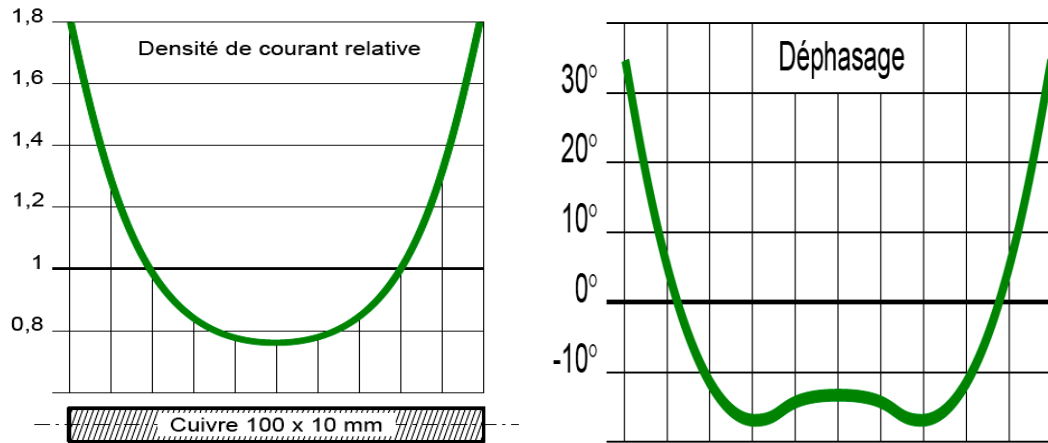


Figure II-9 : densité de courant et déphasage dans une barre rectangulaire [9].

(La figure12) résultant d'un programme de calcul proposé par Silvester permet d'obtenir un ordre de grandeur satisfaisant du coefficient K pour un conducteur rectangulaire quelconque. Les courbes sont établies en fonction de la résistance R_c en courant continu et pour 50 Hz.

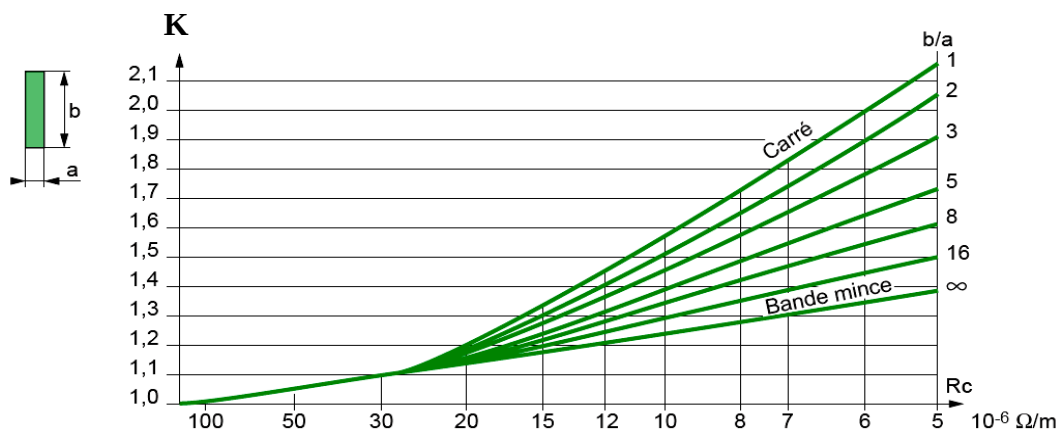


Figure II-10 : Coefficient de pertes supplémentaires par effet de peau dans les conducteurs rectangulaires [9].

Etude de l'effet pelliculaire

II-11 Approche sur le champ magnétique extérieure :

Considérons un conducteur cylindrique parcouru par des courants volumiques uniformes en régime stationnaire, sous l'effet d'un champ électrique $\vec{E}_0$ appliqué au conducteur. En régime variable, les courants variables vont être la source d'un champ $\vec{B}$ variable, créant lui-même un champ $\vec{E}$ (par l'équation de Maxwell-Faraday) s'opposant au champ électrique initial. Nous allons voir que cet effet d'opposition n'est pas uniforme en ce sens qu'il a tendance à « expulser » le courant en le confinant à La périphérie du conducteur : ce courant sera alors localisé dans une pellicule au voisinage de la surface externe, pellicule d'autant plus mince, que la fréquence des courants est élevée : c'est l'effet de peau comme nous avons expliqué. De même, une onde électromagnétique se propageant dans le vide et arrivant sur la surface d'un conducteur va tenter d'y pénétrer. Cependant elle engendrera alors, par son champ électrique, des courants variables eux-mêmes créateurs d'un champ électromagnétique qui s'opposera à la pénétration de l'onde : celle-ci s'affaiblira au fur et à mesure de sa progression à l'intérieur du métal : l'onde dans le métal sera quasiment confinée dans une épaisseur faible [11].

II-12 Épaisseur de peau dans un métal :

L'effet de peau s'interprète d'une autre manière qualitativement comme un phénomène d'induction électromagnétique : le Courant variable $\vec{j}_0$ imposé par le générateur et qui serait uniformément réparti en l'absence de phénomène d'induction crée un champ magnétique $\vec{B}_0$ dépendant du temps ; ce champ crée donc des courants induits $\vec{j}_1$ qui à leur tour crée un champ variable $\vec{B}_1$; ce champ crée à son tour des courants $\vec{j}_2$ etc... Les courants induits s'opposent à la cause qui leur a donné naissance d'après la loi de Lenz, ce qui se manifeste concrètement par une réduction de la densité de courant au sein du conducteur. L'effet de peau est d'autant plus efficace que les courants varient vite, ce qui explique l'influence de $\omega = 2\pi f$ sur l'épaisseur de peau.

Etude de l'effet pelliculaire

L'épaisseur de peau détermine, en première approximation, la largeur de la zone où se concentre le courant dans un conducteur. Elle permet de calculer la résistance effective à une fréquence donnée. Dans ce calcul, on néglige la partie réelle devant la partie imaginaire : la conductivité des métaux étant très élevée [5].

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\mu \cdot \sigma \cdot \omega}} = \sqrt{\frac{2 \cdot \rho}{\mu \cdot \omega}} = \frac{1}{\sqrt{\sigma \mu \pi f}}$$

δ : épaisseur de peau en mètre [m]

ω : pulsation en radian par seconde [rad/s] ($\omega=2.\pi.f$)

f : fréquence du courant en hertz [Hz]

μ : perméabilité magnétique en henry par mètre [H/m]

ρ : résistivité en ohm-mètre [$\Omega.m$] ($\rho=1/\sigma$)

σ : conductivité électrique en siemens par mètre [S/m]

Pour un conducteur de diamètre significativement plus grand que δ , on peut calculer la résistance effective à une fréquence donnée en considérant que seule la partie extérieure d'épaisseur δ contribue à la conduction. Par exemple pour un conducteur cylindrique de rayon R , on aura une section utile de :

$$S_u = \pi \cdot (R^2 - (R - \delta)^2)$$

$\delta = \sqrt{\frac{2}{\mu_0 \gamma \omega}}$ Caractérise l'épaisseur de la couche de conducteur dans laquelle sont confinés champs et courants : elle est d'autant plus faible que la conductivité et les fréquences sont élevées.

Etude de l'effet pelliculaire

Ainsi, pour le cuivre on a :

- pour $f = 50 \text{ Hz}$ $\delta \approx 1 \text{ cm}$.
- pour $f = 5 \text{ KHz}$ $\delta \approx 1 \text{ mm}$.

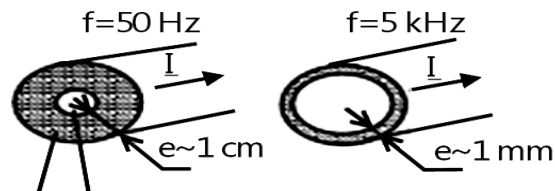


Figure II-11 : L'épaisseur de peau et la largeur de la zone où se concentre le courant dans un conducteur.

II-13 Exemples de valeurs :

Pour un conducteur en cuivre, on a les valeurs au tableau ci-dessous [5]:

fréquence	δ
50 Hz	9,38 mm
60 Hz	8.57 mm
10 kHz	0.66 mm
100 kHz	0.21 mm
1 MHz	66 μm
10 MHz	21 μm

Tableau II-2 : Illustration de l'influence de la fréquence sur l'épaisseur [5].

II-14 Éviter L'effet de peau :

L'effet de peau est généralement une nuisance, car il crée des pertes supplémentaires, des atténuations à fréquence élevée, etc. Une manière efficace d'en diminuer l'effet est de diviser la section d'un fil conducteur, c'est-à-dire de le remplacer par plusieurs conducteurs en parallèle isolés entre eux.

Etude de l'effet pelliculaire

Dans l'idéal, chaque « brin » du conducteur ainsi formé devrait avoir un rayon inférieur à δ . Le fil de Litez (Figure II-12) est un type de conducteur qui pousse à l'extrême cette division [5].

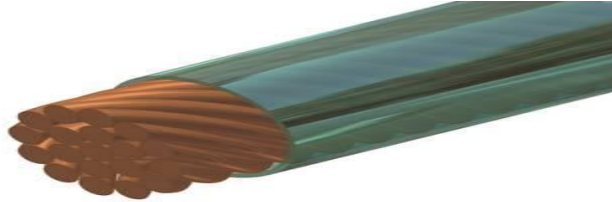


Figure II-12 : Fil de Litez.

Une autre technique consiste à plaquer le conducteur avec de l'argent. Lorsque la «peau» est entièrement dans la couche d'argent, elle bénéficie de ce que l'argent a la plus faible résistivité de tous les métaux. Cette méthode peut être un bon compromis pour un courant composé de deux composantes, l'une à basse fréquence qui circulera dans la totalité de la section, l'autre à très haute fréquence qui circule dans l'argent.

On peut enfin envisager des géométries de conducteurs permettant de limiter l'effet de peau. Dans les postes électriques haute tension, on utilise fréquemment des conducteurs tubulaires creux en aluminium ou cuivre pour transporter de forts courants. L'épaisseur du tube est en général de l'ordre de δ , ce qui permet une utilisation effective de l'ensemble du conducteur. C'est aussi particulièrement le cas dans les installations comme les émetteurs, où l'on peut trouver des bobinages réalisés en tubes creux, à l'intérieur desquels circule un liquide de refroidissement. En basse tension on utilise parfois des géométries plus complexes et permettant un meilleur comportement thermique, mais l'idée est toujours d'avoir des épaisseurs de conducteur ne dépassant pas δ .

Etude de l'effet pelliculaire

II-15 Conclusion :

Les conducteurs électriques forment les lignes et les câbles sont parcourus par des courants alternatifs et, à ce titre, subissent un phénomène « effet de peau ». Ce phénomène physique revient au fait que les courants véhiculés dans ces conducteurs ont tendance à se répartir sur leur périphérie (on parle de « peau ») plutôt qu'en leur centre.

En conséquence, tous les conducteurs électriques de diamètres supérieurs à l'épaisseur de peau du métal utilisé sont réalisés à partir de conducteurs plus fins tressés de manière à représenter globalement la section nécessaire. L'ensemble des lignes et des câbles qui constituent les réseaux électriques est ainsi réalisé à partir du tressage de brins dont le diamètre avoisine le centimètre.

Conclusion générale

Conclusion générale

Nous avons vu que le courant était créé par un champ électromagnétique. Celui-ci pénètre peu dans un conducteur, en présence de la conductivité et la fréquence. Noter que la conductivité est l'inverse de la résistivité. A l'intérieur du conducteur, le champ décroît exponentiellement. On a défini une profondeur de pénétration δ qui est la distance à laquelle l'amplitude du champ électromagnétique a diminué. Nous avons vu un tableau qui résume la profondeur de pénétration en fonction de la fréquence qui ont une relation proportionnelle.

Le courant induit en un point du conducteur est proportionnel au champ électromagnétique en ce point. Ainsi dans un conducteur cylindrique, la densité du courant est maximum à la surface et décroît exponentiellement en allant vers le centre. On peut dire que le courant "circule" à la surface du conducteur. On appelle cette propriété "effet de peau".

Enfin, on dit que l'analyse de l'impédance interne d un conducteur cylindrique nous oblige de proposer un schéma équivalent. Ce schéma selon les référence occupe le domaine fréquentiel.

Le phénomène qui a été étudié est donc très important au réseau électrique et pour toutes les phases (production, transport et distribution).

La bibliographie

- [1] : cours elec – production de l'énergie électrique PDF
- [2] : Electrotechnique - Luc Lasne. 2008 - Professeur agrégé à l'université de Bordeaux.
- [3] : Généralités sur les réseaux électriques – master R, Août 07- 2008.
- [4] : ERIC LE COURTOIS - Étude et simulation des perturbations dans un réseau de distribution électrique ; Conception d'un banc d'essai et mise au point de deux systèmes d'acquisition. OCTOBRE 1996.
- [5] : WWW.Wikipédia.com .
- [6] : Extraits de l'encyclopédie libre Wikipédia, Version du 15 Sep. 2009.
- [7] : Exercices et Cours de Mathématiques - Copyright 2000-2014 Maxi cours RCS PARIS.
- [8] : l'encyclopédie radartutorial.eu, Version 1.3, 3 Nov. 2008.
- [9] : Cahier technique n° 83 - Cahier Technique Schneider Electric, édition janvier 1977.
- [10] : www.schema-electrique.be/effet.fr
- [11] : Cours PC Brizeux - Ch. E5 Phénomènes d'induction électromagnétique.

Liste des figures

Figure I-1 : Réseau électrique simplifié.....	2
Figure I-2 : d'alternateur de forte puissance 1300 MW - 1500 t/min- 50Hz triphasé.....	4
Figure I-3 : Schéma Réseaux de transport électriques.....	4
Figure I-4 : Transport simplifié de l'énergie électrique.....	6
Figure I-5 : Section de la surface du câble conducteurs.....	9
Figure I-6 : photo d'un isolateur.....	9
Figure I-7 : Photo d'un parafoudre.....	10
Figure I-8 : Eclateur MT avec tige anti-oiseaux.....	10
Figure. I-9 : photo d'un interrupteur.....	12
Figure I-10 : Modèle du transformateur.....	13
Figure I-11 : Modèle du transformateur employé.....	14
Figure II-1 : circuit d'alimentation en triphasé.....	22
Figure II-2 : Trois tensions u_1 , u_2 et u_3 d'un système triphasé équilibré.....	23
Figure II-5 : Sections dans les conducteurs pendant le passage d'un courant continu.....	25
Figure II-6 : Diagramme montrant l'effet pelliculaire	26
Figure II-7 : Formation de boucle de courant induit par la variation du champ magnétique (H) dans un courant alternatif.....	28
Figure II-8 : Fonction de répartition du courant dans un conducteur cylindrique en régime harmonique.....	30
Figure II-9 : densité de courant et déphasage dans une barre rectangulaire.....	31
Figure II-10 : Coefficient de pertes supplémentaires par effet de peau dans les conducteurs rectangulaires.....	31
Figure II-11 : L'épaisseur de peau et la largeur de la zone où se concentre le courant dans un conducteur.....	34
Figure II-12 : Fil de Litz.....	35