



Les systèmes de distribution souterraine, la première partie

Notions générales: Dans cette série des articles, nous allons couvrir le sujet des systèmes de distribution/répartition souterraine. On va expliquer les appareillages, les composants et les appareils électriques suivants: les câbles (moyenne et basse tension), les transformateurs de distribution, les appareillages de sectionnement, les terminaisons, les extrémités embrochables, les épissures, le voyants et les détecteurs des défauts du câble. Mais avant de commencer à couvrir ce sujet, on va donner brièvement un résumé des méthodes différentes de la production de l'énergie électrique et un résumé des propriétés des lignes de transport de l'énergie électrique.

Résumé des méthodes différentes de la production de l'énergie électrique: On peut classifier les méthodes de production de l'énergie électrique en deux catégories qui sont les méthodes conventionnelles et les renouvelables. Il existe 3 principaux types de centrales pour produire de l'énergie électrique, selon les méthodes conventionnelle, qui sont les centrales hydrauliques, les centrales thermiques et les centrales nucléaires. Les énergies renouvelables que on utilise pour produire l'énergie électrique sont l'énergie du soleil (solaire, la mère des toutes formes d'énergies), l'énergie du vent (éolienne), l'énergie de la biomasse et l'énergie de la chaleur de la terre (géothermique).

Les centrales hydrauliques: Elles convertissent l'énergie de l'eau mouvement en énergie électrique. Les types de centrales hydrauliques selon la hauteur de chute sont: les centrales haute chute, de moyenne chute et de basse chute. Les centrales haute chute ont des hauteurs de chute supérieures à 300 m (elles utilisent des turbines Pelton). Les centrales de moyenne chute ont des hauteurs comprise entre 30 et 300 m (elles utilisent des turbines Francis). Les centrales de basse chute ont des hauteurs de chute inférieures à 30 m (elles utilisent des turbines Francis ou Kaplan). Une centrale hydro-électrique comporte principalement le barrage de retenu et le déversoir, la conduite d'amenée, la conduite d'échappement, alle des machines et le poste de transformation.

Les centrales thermiques: Les centrales thermiques produisent l'électricité à partir de la chaleur qui se dégage de la combustion du charbon, du mazout ou du gaz naturel.

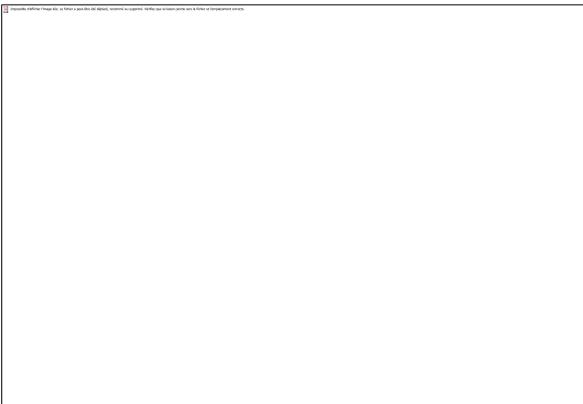
© 2000-2001 Microsoft Corporation. All rights reserved. Microsoft, the Microsoft Dynamics logo, and the Microsoft Dynamics logo are either registered trademarks or trademarks of Microsoft Corporation in the United States and/or other countries.

© 2000-2001 Microsoft Corporation. All rights reserved. Microsoft, the Microsoft Dynamics logo, and the Microsoft Dynamics logo are either registered trademarks or trademarks of Microsoft Corporation in the United States and/or other countries.



Les parties principales d'une centrale thermique sont les chaudière, le réservoir d'eau et vapeur, les turbines, les condenseurs, le réchauffeur (échangeur de chaleur), la pompe d'alimentation, le brûleur, et les ventilateurs.

Le centrales nucléaires: Elles produisent l'électricité à partir de la chaleur libérée par une réaction nucléaire (la fission nucléaire). Une centrale nucléaire est identique à une centrale thermique sauf que la chaudière brûlent le combustible fossile est remplacée par une réaction contenant le combustible nucléaire en fission. Il existe plusieurs types de centrales nucléaires, qui sont les réacteurs à eau pressurisé, les réacteurs à eau bouillante, les surgénérateurs et les réacteurs à thorium. Une centrale nucléaire comporte bâtiment du réacteur, enceinte de sûreté (cuve métallique), cheminée de rejet, enceinte du réacteur, éléments combustibles, barres de réglage, pompe de refroidissement, évaporateur, régulateur de pression, réservoir d'immersion, bassin de stockage des éléments combustibles, chargeur pour éléments combustibles, conduite de vapeur à haute pression, vannes de sécurité, bâtiment des machines, soupape de réglage et de mise hors service rapide, turbine (corps à haute pression), séparateur d'eau/réchauffeur, dérivation de vapeur, turbine (corps à basse pression), alternateur, excitatrice, transformateur, réservoir d'eau d'alimentation, pré-chauffeur, conduite d'eau d'alimentation, condenseur, conduits d'eau de refroidissement (circuit de refroidissement) et stockage intermédiaire de déchets.



L'énergie éolienne: Vent est simplement l'air en mouvement. Toutes les énergies renouvelable viennent du soleil sauf l'énergie géothermique et l'énergie de la marée basse/haute en plus de l'énergie des combustibles fossiles. De 1% à 2% de l'énergie solaire est convertie en énergie éolienne. La raison

d'avoir le vent est l'échauffement écart des couches de l'atmosphère aux régions différentes du globe et le déplacement de masse d'air. L'échauffement d'air change selon la saison et le reflet de la surface de la terre. Les éléments principaux d'une éolienne sont: Une hélice avec un diamètre jusqu'au 65 M, les pales (1, 2 ou 3) avec une vitesse de rotation égale 15 à 50 rpm, un alternateur (synchrone ou asynchrone) entraînant un multiplicateur ou avec un couplage direct, un dispositif d'orientation qui met l'hélice (nacelle) en face du vent et le mât en treillis ou une tour en acier.

L'énergie solaire: On distingue les systèmes que produisent l'électricité ou la chaleur en 4 catégories: thermique (chaleur), photovoltaïque (lumière, photon), océan (l'écart de température d'eau), et mare solaire. On peut diviser le premier groupe en la creuset parabolique, le récepteur centrale (la tour de puissance) et le plat et le moteur. Dans le deuxième groupe, on peut classifier les matériaux des cellules photovoltaïques en couche épaisse (mono ou multi cristalline) et celle mince. En passant à travers les couches de silicium d'une cellule solaire la lumière libère des porteurs de charges positives et négatives. La cellule produit du courant continu à partir de la lumière solaire. Le troisième groupe prend avantage du fait que la température à la surface du océan est plus élevée qu' à la profondeur. On utilise cette différence de la température d'océan pour échauffer un fluide intermédiaire. Ce fluide donne sa chaleur au liquide qui va tourner la turbine et à tour produire l'électricité. On trouve deux types de cycles pour produire l'électricité utilisant cette méthode, le cycle ouvert et le cycle fermé. On peut installer ces systèmes en plein mer ou à côte. Le quatrième groupe, l'étang (mare) on crée la différence (écarts) de la température entre la surface et la profondeur quand on ajoute du sel à la mare. La température d'eau à la profondeur est plus élevée qu' à la surface.

Introduction sur la biomasse: On appelle biomasse l'ensemble des végétaux et des animaux ainsi que le déchets organiques. Les végétaux englobent les cultures énergétiques comprennent des plantes très diverses. Les déchets peuvent être solide (industriels, agricole ou ménages) ou liquide (eaux usées et déjections animales). Les trois méthodes principales de conversions thermochimiques de biomasse sont la combustion, la pyrolyse et la gazéification. Les deux principales voies de conversion biologique sont la digestion anaérobie et la fermentation alcoolique.

L'énergie géothermique: Plus de 99% de la masse de la terre est à une température de plus de 1000 °C. A la surface de la terre la chaleur rayonne avec un flux moyen $.065 \text{ w/m}^2$. Cette chaleur stockée dans le sous-sol de la radioactive naturelle des roches de la croûte terrestre et pour une faible part des échanges thermiques avec les zones internes de la terre. On peut classifier les ressources géothermiques en la géothermie de très basse énergie (moins de 30 °C), la géothermie de basse énergie (30-100 °C), la géothermie de moyenne énergie (100-150 °C), la géothermie de haute énergie (150-350 °C). On peut diviser les modes d'utilisation de l'énergie géothermique en 2 catégories: usage direct (chaleur) et a usage indirect (électricité).

L'énergie des vagues et de la houle: Les vagues d'océan sont des formes d'énergie éolienne qui est concentrée sur la surface de l'eau de mer. Un frottement se développe entre l'air pendant que le vent souffle à travers l'eau, et les vagues sont produites pendant que l'énergie est transférée entre les deux. La prise de mouvement des vagues, sa conversion en énergie mécanique et après électrique, produite l'énergie des vagues. Il y a plusieurs techniques de base pour convertir l'énergie des vagues. Les systèmes terrestres (dispositifs côtiers) comprennent un canal à fermeture progressive ainsi que des systèmes à puits fixes contenant de l'eau en mouvement. Les systèmes en mer (dispositifs de pleine mer) comprennent des puits flottant, des bouées ainsi que d'autres dispositifs auxiliaires.

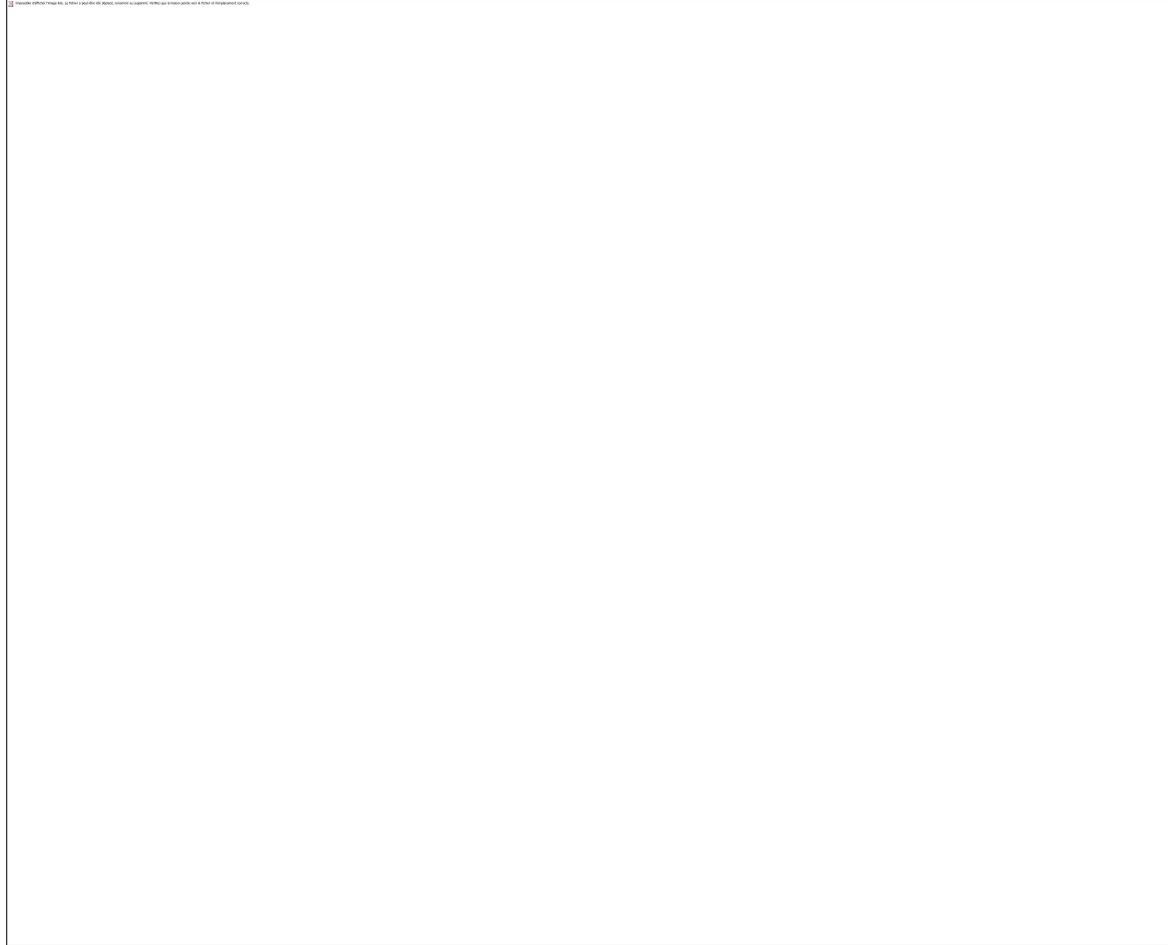
L'énergie marémotrice: A l'origine du phénomène des marées se situe l'attraction gravitationnelle. La lune, proche à la terre, exerce sur les masses d'eau une force attractive suffisamment forte pour les déplacer. L'action de soleil se limite à cause de sa position éloignée de la terre à renforcer ou s'opposer aux effets de la lune. Les forces attractives de la lune et du soleil sont proportionnelles à la distance qui les sépare de la terre et varient au cours du temps. L'usine marémotrice fonctionne sur le même principe que les moulins à marées. Les moulins sont entraînés par la marée. A marée haute, l'eau fait

tourner la roue dans un sens et remplit un bassin. A marée basse, l'eau sort du bassin qui se vide, la roue tourne alors dans l'autre sens. Dans l'usine marémotrice, la roue du moulin est remplacée par des turbines actionnant des alternateurs qui produisent de l'électricité.

Résumé des propriétés des lignes de transport de l'énergie électrique: Le réseau de transport et de distribution doit satisfaire les exigences suivantes: assurer au client la puissance dont il a besoin, fournir une tension stable dont les variations n'excèdent pas +/- de 6% a 10% (selon les normes locales de la région) de la tension nominale, fournir une fréquence stable dont les variations n'excèdent pas +/- 0,1 HZ, fournir l'énergie à un prix acceptable, maintenir des normes de sécurité rigoureuses et veiller à la protection de l'environnement. Le réseau de transport (315 a 765 KV) comprend les centrales, ainsi que les lignes de transport et les postes de transformation de celles-ci. Le réseau de répartition (sous-transport) comprend les lignes (36 a 315 KV) et les postes de transformation intermédiaires (entre le réseau de transport et le réseau de distribution). Le réseau de distribution comprend les lignes et les postes de transformation servant à alimenter les clients. Ce réseau est composé de 2 parties, le réseau de distribution à moyenne tension (2,4 a 36 KV) et le réseau de distribution à basse tension (120 V a 1000 V). Le genre de ligne utilisée de même que ses spécifications sont imposés par les données suivantes: puissance active à transporter, distance de transport (qui va influencer sur la chute de tension et par conséquent va affecter les sections traversées des conducteurs et ses poids), coût, esthétique, encombrement et facilité d'installation. Les lignes de transport sont les lignes reliant les postes de transformation principaux aux centrales de génération. Elles sont constituées de fils aériens ou de câbles souterrains. On trouve aussi les lignes servant à échanger de l'énergie entre deux grands réseaux. Les conducteurs des lignes aériennes à haute tension sont toujours nus. On emploie des câbles en cuivre ou des câbles en aluminium avec âme en acier (ACSR). Les isolateurs servent à supporter les conducteurs et à les isoler de la terre. On amarre les conducteurs aux isolateurs. On emploie des chaînes d'isolateurs constituées d'un certain nombre (selon la tension nominale de la ligne) d'éléments réunis par des pièces métalliques. On emploie des pylônes métalliques (en treillis) pour supporter les lignes de transport. Les pylônes doivent supporter le poids des conducteurs, les forces du vent, la traction des conducteurs et le poids de la glace s'y accumule. On relie les pylônes des lignes de transport à des prises de terre exécutées avec grande précaution afin de leur assurer une faible résistance. Les conducteurs non isolés qui sont disposés au sommet de pylônes (fils de garde) servent à intercepter la foudre avant que la décharge n'atteigne les conducteurs sous-tension de la ligne. Il y a trois types d'oscillation dans les lignes aériennes. l'oscillation simple, oscillation de basse fréquence et haute amplitude et l'oscillation de haute fréquence et basse amplitude. Il n'y a pas de danger du premier type d'oscillation. Le deuxième type d'oscillation a lieu dans les tempêtes de grésil et du vent fort. Dans ce cas la fréquence est presque de 1 HZ, et l'amplitude est environ 7 mètre. Le troisième produit une fréquence de 100 Hz et amplitude de 1 pouce. Cette oscillation se développe quand la vitesse du vent est entre 2 et 10 mile par heure. Sous ces conditions d'oscillation, les conducteurs aux supports ou attaches subissent de la fatigue que éventuellement va causer la rupture mécanique des attaches. Pour éviter la rupture des attaches sous condition d'oscillation, on monte des amortisseurs (une boîte avec des poids) ou on attache d'une pièce de conducteur (même calibre de conducteur principal) de quelques mètres longueur au serre-fil (attache). Les hautes tensions créent des décharges importantes autour des conducteurs (effet couronne). Ces décharges produisent des pertes, de plus, elles possèdent un spectre de fréquences radiophoniques. Ce spectre de fréquences brouille la réception sur les postes de radio et les téléviseurs situés dans le voisinage de la ligne. Pour réduire l'effet couronne, on diminue le champ électrique créé par les conducteurs en grossissant leur diamètre ou les arrangeant en fisceaux par phase ou le utilisant des conducteurs creux. Malgré leur grande diversité, les lignes possèdent des propriétés électriques communes. En effet toutes les lignes possèdent une résistance, une réactance inductive et une réactance capacitive. Ces impédances sont réparties uniformément sur toute la longueur de la ligne. On peut représenter la ligne par une série de sections R, L, C identiques. Il existe toujours une limite à la puissance qu'une ligne peut transporter. Cette puissance maximale est proportionnelle au carré de la

tension et inversement proportionnelle à l'impédance de la ligne.

Les câbles souterrains de distribution et leurs caractéristiques électriques et mécaniques: On peut distinguer les câbles souterrains selon leur tension (0,6 KV, 15, 25, 35, 46 KV). Pour une tension nominale d'un câble, on peut classer les câbles selon le type d'isolation (isolant sec - solide, câble à huile), nombre des conducteurs, l'épaisseur d'isolation (100% ou 133% de tension nominale), calibre du conducteur de neutre (pour les câbles avec le neutre intégré) et sa capacité (pleine capacité ou 1/3 capacité);, forme du conducteur neutre (concentrique, massif ou toronné), type de la gaine (chemisée, enformée ou câble en conduit). Les principaux éléments d'un câble sont: le conducteur (âme) qui transmet le courant électrique, l'isolant qui fournit l'isolement entre le conducteur et la terre ou autres objets dans les alentours et la gaine qui protège le câble contre les attaques chimiques ou électrochimique comme telle contre les ruptures mécaniques.



L'âme du câble est du cuivre ou de l'aluminium. L'âme peut être massif ou toronné. La classe (AA, A, B, C, D) du conducteur toronné est une indication de sa souplesse. D est le plus souple et AA le plus rigide. Un brin (toron) est composé de nombreux fils. Les fils sont toronnés ensemble afin de faire une couche de l'âme. Les couches successives sont mises en sens opposé. Les conducteurs toronnés sont plus souple que les conducteurs massifs. Les conducteurs toronnés sont mieux pour l'isolant du câble, ils ne le brisent pas. En général, les câbles du calibre entre 1/0 et 4/0 va avoir 18 ou 19 torons, du calibre de 250 à 500 MCM va avoir 35 à 37 torons, de 600 à 1000 MCM va avoir 58 à 61 brins et du calibre 1250 va avoir 91 torons. La quantité des torons égale $3n(n+1)+ 1$, dont n est le nombre de couche des torons. Le diamètre du conducteur égal $(2n+1)D$, dont D est le diamètre d'un toron. En général, le conducteur toronné a une résistance plus élevée que un conducteur massif par environ 2%. Le mode avec lequel on donne le calibre d'un câble est 19/.1, par exemple. Le 19 est le nombre des torons, .1 est la section de chaque toron en mm ou AWG. On peut distinguer 3 catégories des conducteurs

selon leur forme. Ils sont le concentrique, compact (ramassé) et ceux de forme réduite. Les principales mesures d'un câble sont: la section de l'ame qui est en cuivre ou en aluminium, le diamètre sur l'isolant, le diamètre sur l'écran d'isolant, le diamètre sur le neutre concentrique ou ruban de cuivre et le diamètre sur la gaine. On peut calculer l'épaisseur de la gaine des autres données disponibles. Les principales normes qui couvrent la fabrication et les essais des câbles sont: ICEA (insulated cables engineers association) S-66-524 et ACNOR (CSA) norme numero 22.2 #3 et les autres normes des autorités locales (Hydro Quebec, Ontario Hydro,...). Les propriétés des matériaux isolants des conducteurs sont: haute résistance d'isolant, haute rigidité diélectrique, aspects mécaniques convenables (haut effort de traction), non absorbant de l'humidité et de l'eau et doivent avoir une bonne résistance à l'attaque chimique. On trouve les matériaux d'isolant suivants dans les câbles d'énergie: des caoutchouc (élastomère), polyéthylène, chlorure de polyvinyle (PVC), huile et papier.

Les isolements des conducteurs: On peut diviser les matériaux caoutchoucs en 2 catégories, naturel (par exemple le polyisoprène) et synthétique. On appelle le caoutchouc synthétique élastomère. Le caoutchouc dans son état naturel est un isolant. Son inconvénient est sa caractéristique d'absorber de l'eau et de l'humidité. Par conséquent, l'isolant perd sa propriété d'isolement. Le caoutchouc vulcanisé n'absorbe pas l'humidité, plus rigide et élastique. On produit le caoutchouc vulcanisé quand on mélange le caoutchouc avec 30% de soufre et autres solvants convenables. On divise les élastomères en 2 groupes, l'un pour usage général et l'autre pour usage spécial. Le premier groupe possède des propriétés semblable au caoutchouc naturel est le deuxième a des propriétés mieux que le caoutchouc naturel surtout sa résistance contre le feu et l'huile. Les quatre types principaux sont le polyisobutylène, le polychloroprène, le polystyrène-butadiène et le silicone ou polysiloxane, le nom plus correct, (polymères inorganiques). Les caoutchoucs sont des matériaux de polymère de hydrocarbure semblable en structure aux thermoplastiques. La définition d'un élastomère selon le ASTM (American Society for Testing & Material) est: à la température ambiante et quand le matériau est étiré de plusieurs fois sa longueur d'origine et qui va reprendre sa forme initiale sans déformation permanente, immédiatement, après l'enlèvement de la traction (la force d'étirage), c'est un élastomère. Quelques thermoplastiques atteignent la propriété de l'élasticité des élastomères, par exemple le polyéthylène. Autres exemples des élastomères sont: les oléfines, les silicones, les styrènes. Tous les polymères amorphes ne sont pas des élastomères. Certains sont des thermoplastiques. L'une des différences est la température de transition vitreuse. C'est la température au-dessus de laquelle un polymère devient mou et souple et au-dessous de laquelle il est dur et cassant. En général, pour les polymères amorphes, les élastomères ont une basse température de transition vitreuse et les thermoplastiques ont une haute température de transition vitreuse.

Le polyisobutylène est un caoutchouc synthétique ou élastomère. Il quelquefois appelé caoutchouc butyle ou isobutylène-isoprène élastomère. Il est un copolymère d'isobutylène et 1 à 3 % isoprène. Il est similaire au caoutchouc naturel, mais il a une bonne résistance contre les produits chimiques, le rayonnement du soleil et les conditions d'environnement. Il a une haute rigidité diélectrique, mais il a des faibles propriétés mécaniques (basse résistance à la traction, basse élasticité, retrait linéaire et allongement à la rupture). On utilise ce type d'isolement avec des câbles et autres appareils électriques. Le silicone (polysiloxane): il est un élastomère de dans la famille de silicone. Les silicones sont des polymères inorganiques. C'est à dire que il n'y a pas d'atomes de carbone dans la chaîne principale. La chaîne principale est composée d'atome de silicium et oxygène alternés. Chaque silicium a 2 groupes qui lui sont attachés et qui peuvent être des groupes organiques (par exemple, des groupes méthyles. Quelques exemples des polymères de silicone sont: polydiméthyle siloxane, polyméthyle-phényle-siloxane et polydiphényle siloxane. On peut classer les silicones en les sélections pour usage général, pour l'application à la basse température, pour l'usage à la haute température, haute résistance à la traction, haute résistance au déchirement, haute résistance au fluide chimique et aux résines. On peut vulcaniser les silicones par l'entrecroisement de la chaîne linéaire et ils coulent sous le chauffage et la pression. Ils résistent les chaleurs, l'attaque chimique (sauf les forts acides et les fortes bases). La rigidité

diélectrique égale 20 KV/cm (500 V/mil).

Le polychloroprène: Il est généralement vendu sous le nom Néoprène. C'est le premier élastomère synthétique qui a été disponible dans le marché (a eu un succès commercial). Il résiste très bien aux huiles, les attaques chimiques, le rayonnement du soleil et le vieillissement. Il ressemble au caoutchouc naturel en sa structure, propriétés mécaniques et chimiques. Il a une basse rigidité diélectrique. Il est fabriqué à partir de monomère chloroprène. Le chloroprène a deux doubles liaisons, il est appelé diène. **Le polystyrène-butadiène-styrène (SBS):** il est un caoutchouc dur. Sa chaîne principale est faite de trois segments. Le premier segment est une longue chaîne polystyrène, le segment de milieu est une longue chaîne de polybutadiène et le dernier segment est une autre longue section de polystyrène. Le polystyrène est un plastique dur et résistant qui donne au SBS sa longévité. Le polybutadiène est un caoutchouc et donne au SBS ses propriétés de caoutchouc. On considère le SBS un plastique si le pourcentage de styrène est plus que 50 %. Quand on change le pourcentage de polystyrène et de polybutadiène, on peut produire le SBS avec des propriétés variées. Le SBS est un type inhabituel de matériau appelé thermoplastique élastomère. Ce sont des matériaux qui se comportent comme des caoutchoucs élastomères à température ambiante mais peuvent être mis en œuvre comme des thermoplastiques lorsqu'ils sont chauffés.

Le chlorure de polyvinyle de chlorure (ou polychlorure de vinyle): il est un polymère dérivé de l'acétylène. On peut produire le PVC dans plusieurs types selon le processus de polymérisation. Ses propriétés de l'élasticité et la résistance d'isolement sont inférieures au caoutchouc vulcanisé. On peut classer le PVC en 3 catégories qui sont: pour usage général, pour les lieux d'haute température et le PVC dur. Il résiste à l'eau et au feu. Quand on essaie de brûler le PVC, les atomes de chlore sont relâchés et ils inhibent la combustion. Il est similaire au polyéthylène mais sur certains atomes de carbone de la chaîne principale l'un des hydrogènes est remplacé par un atome de chlore.

Le polyéthylène (PE): le polyéthylène est le polymère le plus commun. Une molécule de polyéthylène comprend une longue chaîne d'atomes de carbone avec 2 atomes d'hydrogène attachés à chaque atome de carbone. En général, les polymères sont des substances constituées de grandes molécules formées par la répétition d'un même motif composé d'une ou plusieurs unités de base. On appelle ces unités de base les monomères. Le nombre moyen des monomères dans les polymères (molécules finales) est le degré de polymérisation. Si ce degré de polymérisation est élevé, on a un haut polymère. Si le degré est faible, on a un oligomère. Le homopolymère est constitué d'un seul type de monomère dont le motif se répète dans la molécule. Le copolymère est constitué de plusieurs types de monomères. Il existe 3 types de polymérisation (l'ensemble des procédés de formation de chaînes à partir de monomères), ils sont la polycondensation, la polymérisation en chaîne et la polymérisation par transfert (télomérisation). Il existe 5 techniques principales de mise en œuvre des réactions de polymérisation: en solution, en masse, en suspension, en émulsion et la polymérisation sous rayonnement. La polymérisation en chaîne n'est valable que pour les monomères à doubles liaisons chimiques. Il consiste à ouvrir ce lien double à l'aide d'une certaine substance. En ouvrant ce lien double, on permet à ce monomère de se lier à d'autres afin de former le polymère. Au cours de la polycondensation, les monomères s'associent avec élimination simultanée d'atome ou de groupes d'atomes. Dans ce cas, les réactions qui démarrent la polymérisation (réaction d'initiation) sont de type ionique. C'est la seule façon d'obtenir des polymères semi-cristallins aux propriétés mécaniques particulières. La télomérisation permet un groupe activant dans la molécule à initier le procédé qui établit une réaction de transfert (en croissance) aux extrémités des chaînes. Il ainsi limite la longueur des chaînes. Il y a plusieurs résines de PE, le plus important pour l'industrie électrique sont le polyéthylène à basse densité (LDPE), le polyéthylène linéaire à basse densité (LLDPE) et polyéthylène de haute densité (HDPE). Pour le premier, le procédé de polymérisation de l'éthylène se fait à très haute pression avec une petite quantité d'oxygène comme catalyseur. Ce type de polymérisation présente de nombreuses chaînes collatérales, le produit final est à basse densité. Pour le deuxième, le procédé de polymérisation de l'éthylène fonctionne à basse pression avec un catalyseur organe-métallique. Il présente

moins de chaînes collatérales, ce qui le rend moins sujet à l'oxydation et aux attaques des rayons UV. Le poids moléculaire est mentenu plus bas que celui du HDPE. On ajoute en outre pour abaisser sa densité d'autres monomères qui forment de chaînes collatérales. Pour le dernier, le procédé de polymérisation d'éthylène a lieu a basse pression avec un catalyseur organo-métallique. Ce type de polymérisation présente moins de chaîne collatérales. Le produit final a une densité plus élevée et a plus grande rigidité. En général, les avantages de polyéthylène sont: son poids léger, très haute résistance contre les attaques chimiques, bonne résistance à la traction et haute rigidité. Les propriétés des polyéthylènes peuvent être adaptées avec l'utilisation d'additifs. Les polymères sont transformés en objets pratiques selon sept procédés différents, listés ci-après: moulage par injection, moulage par compression, moulage par soufflage, roto-moulage, moulage par extrusion soufflage, extrusion couchage et calandrage. Les résines de HDPE ont une cristallisation de jusqu'au 95%. Le LDPE résine a une cristallisation entre 60 et 70 %. Le LLDPE a une cristallisation entrée 60 et 75 %. Le degré de la cristallisation est une indication de la densité de résine. Avec les résines haute densité, le température de ramollissement, la résistance contre la pénétration du gaz et de l'humidité et la rigidité sont hauts. Mais l'haute densité de la résine cause la réduction de la rigidité a la basse température et la résistance à traction et la fissure. Pour le LLDPE, la gamme de densité est de .915 à .94; pour le LDPE, elle est de .91 à .93 et pour le HDPE de .94 à .965 gm/cm³.

Les papiers imprégnés: une couche de papier convenable est guipée sur le conducteur. L'épaisseur des papiers guipés est fonctionne de la tension nominale du câble. On le fait sécher dans une chamre étanche de vapeur sous une température élevée et à vide. Après cet étape, la pâte isolante est forcée au câble de papier imprégné pour remplir tous les pores (trous) dans l'isolant du câble. C'était la dernière étape dans la fabrication du câble à papier imprègne;. Maintenant on laisse le câble pour refroidir sous la pâte afin de réduire la formation des vacants à cause du rétrécissement de la pâte isolante.

La résistance d'isolement: pour les câbles monophasés, la résistance d'isolement égale $(\frac{\rho}{2} \ln \frac{D}{2r})$ (In (D/2r)); dont ρ est la résistivité de diélectrique, r est le rayon du conducteur, l est le longueur du câble et D est le diamètre de neutre ou de gaine.

La capacitance et la contrainte électrique du câble monophasé à une âme: la capacitance en cm/cm égale $\frac{2.3}{9} \ln \frac{D}{d}$, dont d est le diamètre du conducteur. On peut écrire cet équation comme suivante .0388 $\frac{2.3}{9} \ln \frac{D}{d}$ F/mille. On peut donner la contrainte électrique à une distance x de l'axe du câble comme ceci $E/x \ln \frac{D}{d}$, elle est maximum à la surface du conducteur $E/r \ln \frac{D}{d}$. La contrainte à la gaine égale $2 E/D \ln \frac{D}{d}$, dont E est la tension de crête du conducteur (la différence du potentiel entre le conducteur et la gaine). Le rapport de la contrainte à la surface du conducteur et à celle de la gaine = D/d. Avec les câbles haute tension, on peut obtenir une contrainte plus uniforme entre le conducteur et la gaine si on emploie des isolants des différentes constantes électriques dans le même câble ou on utilise plusieurs gaines (repartie à la section du câble). Le facteur de puissance d'un cable

d'un conducteur (âme): On va suppose que la résistance diélectrique d'isolant égale $\frac{1}{\rho}$, est constante d'un bout a l'autre du cable et indépendant de la contrainte. Quand on applique une tension alternative de fréquence f, un courant va exister égal la tension divisée par la résistance d'isolant par cm longueur. La résistance d'isolant égale

$\frac{1}{\rho} \frac{D}{2} \ln \frac{D}{d} dx / (2 \pi l x)$ /cm. Les pertes dans les circuits de courant alternatif sont les résultats de la phénomène d'absorption et en général sont beaucoup moins que celles des circuits de courant continu.

Le courant de charge = $\frac{1}{\rho} C V$, dont

$C = \frac{2.3}{9} \ln \frac{D}{d}$ cm/cm et en décalage en avant de la tension de 90 °. le courant total, I, est l'addition

des vecteurs V/R et $\frac{1}{\rho} CV$ et en décalage en avant de la tension par un angle de $\theta = 1/\rho C R$.

L'inverse de la résistance s'appelle conductance (G=1/R). Pour le câble, la conductance de l'isolant

égale $C \cos \delta$. Avec cette valeur on peut savoir la qualité de l'isolant. Si l'angle $\delta = 90^\circ$ (ou presque), c'est à dire $\cos \delta = 0$ (ou presque), l'isolant du câble est dans un bon état. L'angle de perte de l'isolant d'un câble, $\delta = 90^\circ - \theta$, c'est à dire $\cos \delta$ est égal, presque, $\tan \theta$. Les pertes diélectriques égales $V^2/R = V^2G = V^2 \cos \delta$. La contrainte et la température influent le facteur de puissance de n'importe quel matériel diélectrique. Il augmente avec l'augmentation de n'importe laquelle de ces deux variables (contrainte et température). Les conditions qui affectent le claquage de l'isolant sont la durée de l'application de la tension, la forme des électrodes, la température, la pression, la présence de l'humidité, la présence de espaces gazeux dans l'isolant. Les raisons les plus répandus de défaillance des câbles sont l'instabilité thermique et la dispersion (de charbonne). La première a lieu quand le facteur de puissance augmente rapidement avec l'augmentation de la température. Une petite hausse de la température cause une très haute perte diélectrique dans le câble qui par conséquent cause une autre hausse additionnelle de température dans le câble. La deuxième phénomène est la dispersion progressive de l'âme à la gaine (ou la contraire de la gaine à l'âme), ce procédé cause éventuellement un court-circuit entre l'âme et le neutre ou la gaine métallique.

La résistance du conducteur de câble: On peut donner la résistance, R, comme suivant:

$R_{ca} = R_{cc} (1 + Y_s + Y_p)$, dont R_{ca} est la résistance sous condition de courant alternatif, R_{cc} est la résistance sous condition de courant continu, Y_s est le facteur de correction pour l'effet de peau (effet pelliculaire) et Y_p est le facteur de correction pour l'effet de proximité. L'inductance d'un circuit de deux conducteurs et chaque conducteur a multiple brins (torons) $= .46 \log (GMD/GMR) = .2 \ln (GMD/GMR) \text{ mH/KM} = 2 (10^{-7}) \ln (GMD/GMR) \text{ H/m}$, dont GMD (geometrical mean distance) est la distance équivalente entre les torons de conducteur A et les torons de l'autre conducteur (B), m est le nombre de toron de conducteur A, GMR (geometrical mean radius) est la distance équivalente entre les torons du même conducteur (A) et n est le nombre de toron de conducteur B.

$$GMD = [(D_{11}' D_{12}' \dots D_{1n}') (D_{21}' D_{22}' \dots D_{2n}') \dots (D_{m1}' D_{m2}' \dots D_{mn}')]^{1/mn},$$

$$GMR = [(R' D_{12} D_{13} \dots D_{1m}) (R' D_{21} D_{23} \dots D_{2m}) \dots (R' D_{m1} D_{m2} \dots D_{m m-1})]^{1/m^2},$$

$R' = R e^{-1/4} = R (.7788)$, dont R est le rayon du conducteur.