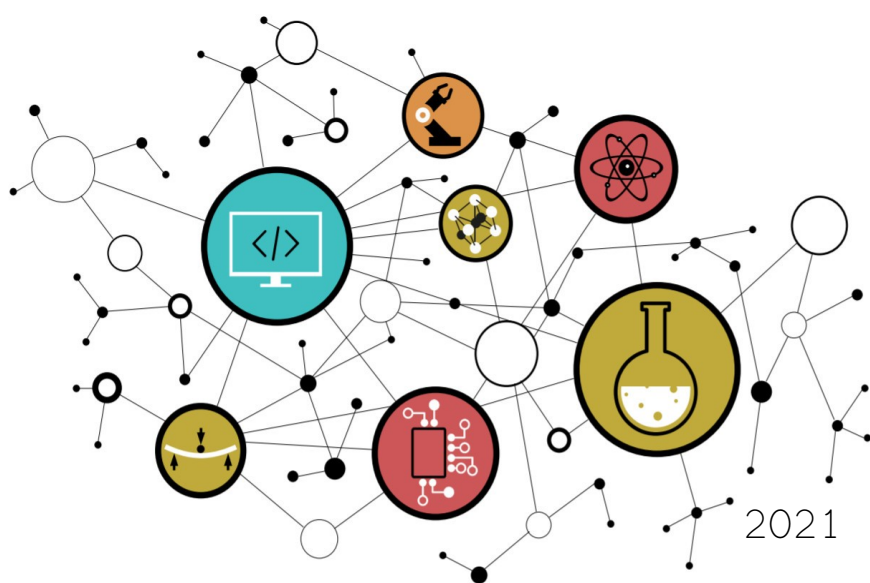


TRAITEMENT DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE

Polycopié de Cours



CONTACTS



Établissement

ENSICAEN
6 boulevard Maréchal Juin
CS 45053
14050 CAEN cedex 04

Référents et encadrants

Dimitri Boudier (3A GENE)
dimitri.boudier@ensicaen.fr
+33 (0)2 31 45 27 61

Matthieu Denoual (3A GENE - 3A EMS)
matthieu.denoual@ensicaen.fr
+33 (0)2 31 45 26 98

hugo descoubes (3A EMS)
hugo.descoubes@ensicaen.fr
+33 (0)2 31 45 27 61

RESSOURCES



Les différentes ressources numériques sont accessibles sur la plateforme pédagogique de l'ENSICAEN (aucune authentification requise)

- 3A GENE :

<https://foad.ensicaen.fr/course/view.php?id=122>

- 3A EMS :

<https://foad.ensicaen.fr/course/view.php?id=672>

ÉVALUATION



- Pour les GENE et les EMS :

L'évaluation sur table (1h30) portera sur les séances de Cours Magistral (potentiellement sur tout point présent dans les supports ou présenté à l'oral). Cet enseignement vise à élargir la culture scientifique et technologique de l'élève ingénieur avant d'attaquer dans le monde professionnel. Le photocopié sera donc interdit le jour de l'évaluation. Néanmoins, l'apprenant pourra avoir en possession autant de feuilles manuscrites qu'il lui semblera nécessaire ce même jour. Les questions de cours resteront à ouverture large et ne viseront que rarement des points très spécifiques.

- Pour les GENE seulement :

Les travaux pratiques ne seront pas évalués et n'ont pour objectif que d'illustrer la trame de Cours Magistral en étudiant plus en détail quelques appareillages clés du domaine. Nous découvrirons également les problématiques et spécificités de l'expérimentation sur des appareillages dans le domaine de la puissance.

SOMMAIRE

1. TRAITEMENT DE L'ENERGIE ÉLECTRIQUE

hugo descoubes

1. INTRODUCTION

2. PRODUCTION

- 2.1. Nucléaire
- 2.2. Fossile
- 2.3. Hydraulique
- 2.4. Éolien
- 2.5. Énergies renouvelables ou EnR

3. TRANSPORT

- 3.1. Réseaux de transport et de répartition
- 3.2. Réseau de distribution

4. PROTECTION

- 4.1. Protection des biens
- 4.2. Protection des personnes

5. CONVERSION

- 5.1. Transformateur
- 5.2. Machines électriques tournantes
- 5.3. Électronique de puissance

6. STOCKAGE

7. UTILISATION

2. CIRCUITS TRIPHASES

Dimitri Boudier (3A GENE) ou Matthieu Denoual (3A EMS)

3. TRANSPORT ET DISTRIBUTION

Dimitri Boudier (3A GENE) ou Matthieu Denoual (3A EMS)

4. PROTECTION CONTRE LES COURT-CIRCUITS

Dimitri Boudier (3A GENE) ou Matthieu Denoual (3A EMS)

5. SYSTEMES DE LIAISON A LA TERRE

Dimitri Boudier (3A GENE) ou Matthieu Denoual (3A EMS)

6. SECURITE ELECTRIQUE

Dimitri Boudier (3A GENE) ou Matthieu Denoual (3A EMS)

7. TRANSFORMATEUR

hugo descoubes

8. MACHINES ELECTRIQUES TOURNANTES

hugo descoubes

9. ELECTRONIQUE DE PUISSANCE

hugo descoubes

TRAITEMENT ENERGIE ELECTRIQUE



ENSICAEN

3^{ème} année (BAC+5)

MAJEURE NUCLEAIRE

MAJEURE ENERGIE MATERIAUX STRUCTURAUX



SciencesPo Rennes

Antenne de Caen

5^{ème} année (BAC+5)

CONCERTATION ET TERRITOIRES EN TRANSITIONS



hugo descoubes

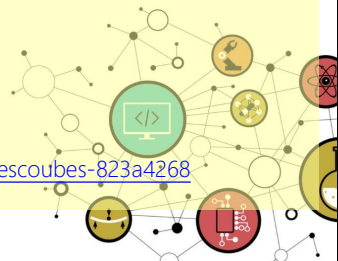
Professeur agrégé de classe Normale
Responsable des enseignements
de Systèmes Embarqués à l' ENSICAEN

hugo.descoubes@ensicaen.fr

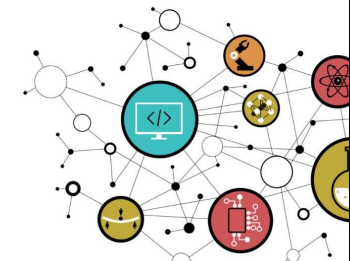
+33(0)2 31 45 27 61



<https://fr.linkedin.com/in/hugo-descoubes-823a4268>



INTRODUCTION



DOMESTICATION DE L' ELECTRICITE

Les domestications par l'homme du feu puis de l'eau remontent maintenant à des temps lointains, de ce que l'on en sait de nos jours, ~400 000 ans pour le feu et ~3000 ans pour l'eau. Le mot électricité n'apparaît qu'en 1600 en occident. L'électron quant à lui n'a été découvert qu'en 1897 par Joseph John Thomson



L' ELECTRON

L'électron, mise en avant de la dualité onde-particule ou onde-corpusculaire



PHYSIQUE APPLIQUEE



Tension ? Courant ?
Energie ?
Puissance ? Résistance ?

OBJECTIF

L'objectif de cet enseignement introductif est de comprendre le cheminement de l'énergie électrique, de la production à l'utilisation. Cet enseignement à une vocation opérationnelle et doit permettre à l'étudiant de comprendre les problématiques de futurs partenaires du domaine dans un cadre professionnel

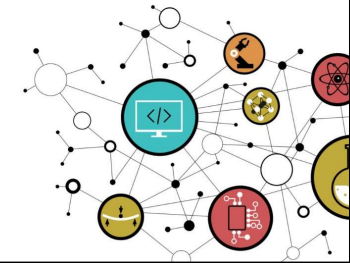
Production ➔ *Transport* ➔ *Protection* ➔ *Conversion* ➔ *Stockage* ➔ *Utilisation*

Nous nous efforcerons d'assimiler au mieux les architectures et rôles des principales infrastructures présentes sur le réseau et souvent visibles de tous. De même, nous nous intéresserons aux rôles des principaux acteurs du domaine, notamment Français

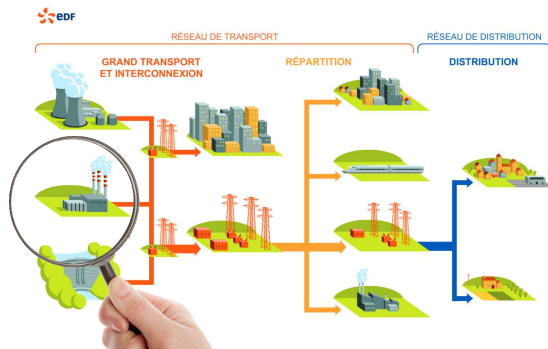
L'Electrotechnique ou génie électrique rassemble les grands domaines traitant l'électricité en tant qu'énergie. A titre indicatif, l'Electronique quant à elle, traite la mise en forme et la gestion des signaux électriques en tant qu'information



PRODUCTION



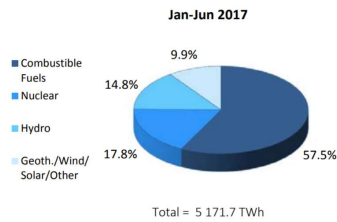
La production électrique est un secteur industriel visant à assurer un service d'approvisionnement d'énergie électrique le plus régulier, stable et sécurisé possible



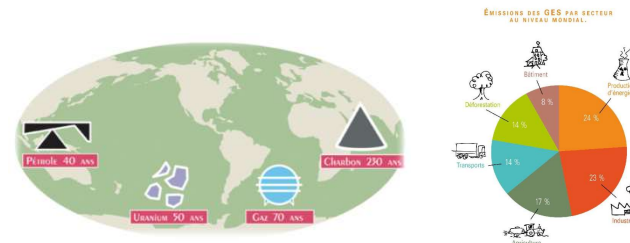
Observons les principaux observatoires de l'énergie électrique en France et à l'international. Les observatoires de l'énergie et des émissions de gaz à effet de serre (GES) sont le plus souvent des observatoires régionaux. Des organismes sont ensuite chargés de collecter, centraliser puis diffuser ces informations (bilans, indicateurs, tendances, etc). Emergence dans les années 80 et élargissement depuis le 3^{ème} sommet de la Terre à Rio en 1992



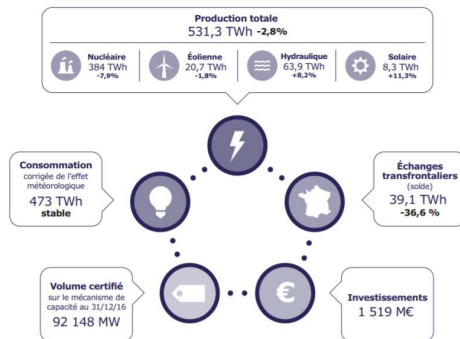
En 2017, la production Electrique mondiale répartie par combustible était la suivante. A titre indicatif, elle représente près de 10000TWh par année. Hormis la France (politique pro-nucléaire), ce découpage représente approximativement les grandes sources primaires utilisées pour la production électrique dans la majorité des pays du monde (source OECD/IEA)



La production d'énergie électrique est basée sur l'exploitation de ressources **non-renouvelables** et **renouvelables** (inépuisables à l'échelle du temps humain), dont certaines sont nommées énergies propres ou vertes (appellation subjective). Actuellement, la plus grande partie de la production mondiale est basée sur l'exploitation de ressources non-renouvelables et donc l'appauvrissement jusqu'à épuisement des ressources primaires de la planète



La France à elle seule produit environ 530TWh en 2016 pour une consommation métropolitaine d'environ 473TWh. Différence essentiellement liée aux échanges commerciaux (source RTE)



Détaillons les précédents chiffres

$$530TWh = 8760h \text{ (par année)} \times 60,5GW \text{ (puissance instantanée)}$$

Pour information, RTE (Réseau de Transport d'Electricité) propose une application mobile et PC permettant d'observer la production et la consommation en temps réel d'énergie électrique en France



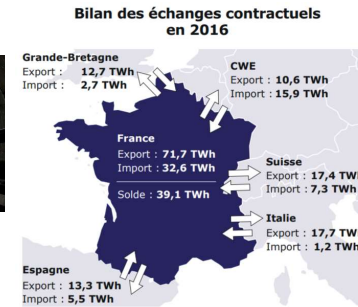
En 2017, EDF (Electricité De France) est le premier électricien en France et dans le monde (Actionnaire principal, Etat Français ~85%). Malgré les très nombreuses polémiques autour du nucléaire (néanmoins justifiées), 95% de la production d'électricité Française ne génère aucune émission de gaz à effet de serre. En France, la fourniture d'énergie électrique relève des services publics, cela implique de garantir continuité, sécurité, adaptabilité et égalité des traitements



En 2016, la France est plus largement exportatrice qu'importatrice d'énergie électrique. Principalement Angleterre, Belgique, Suisse, Italie et Espagne. Ce n'était pas le cas il y a 40 ans. En France, près de 75-80% de l'énergie produite vient du nucléaire (source RTE)



France-Espagne
Nouvelle liaison souterraine
65Km – 2,8GW



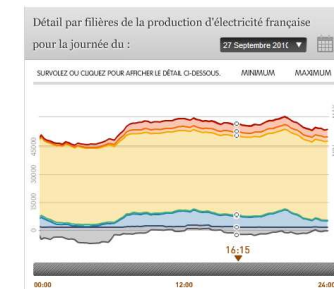
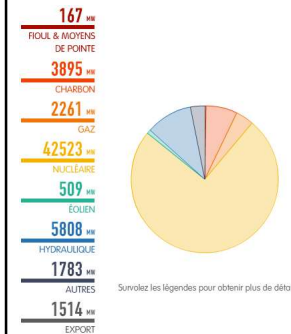
Observons le parc Français d'EDF en 2016

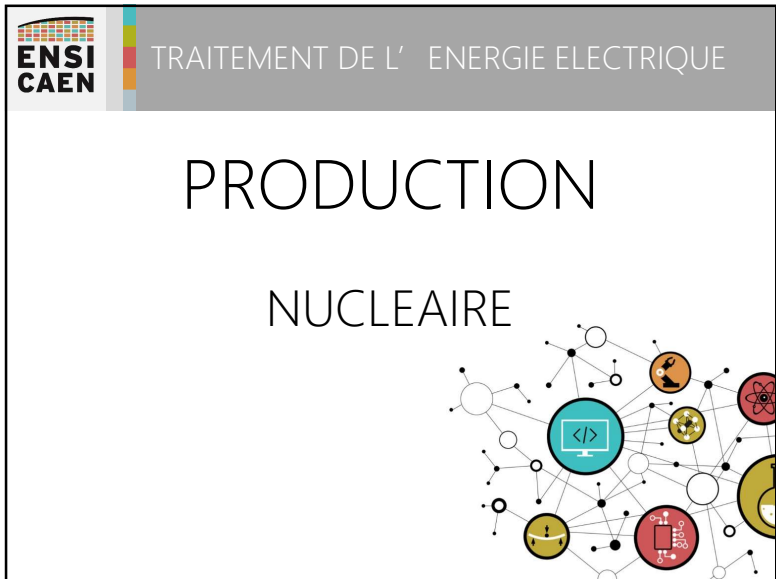
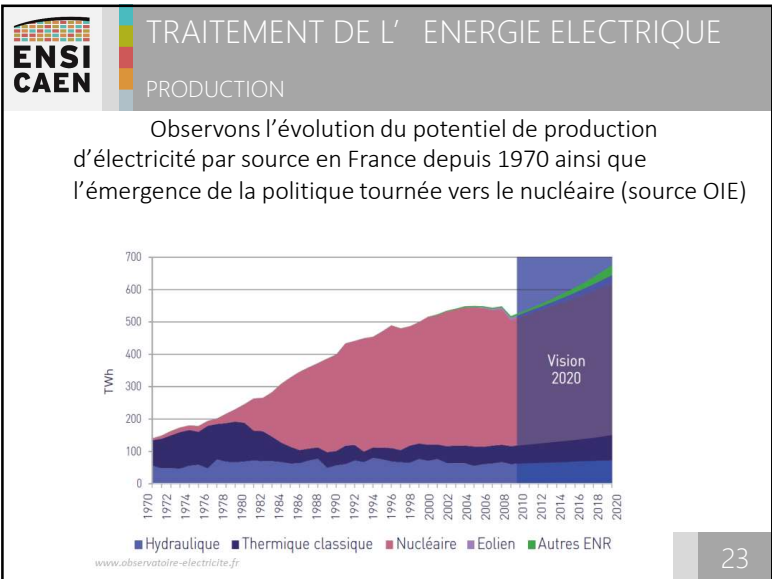
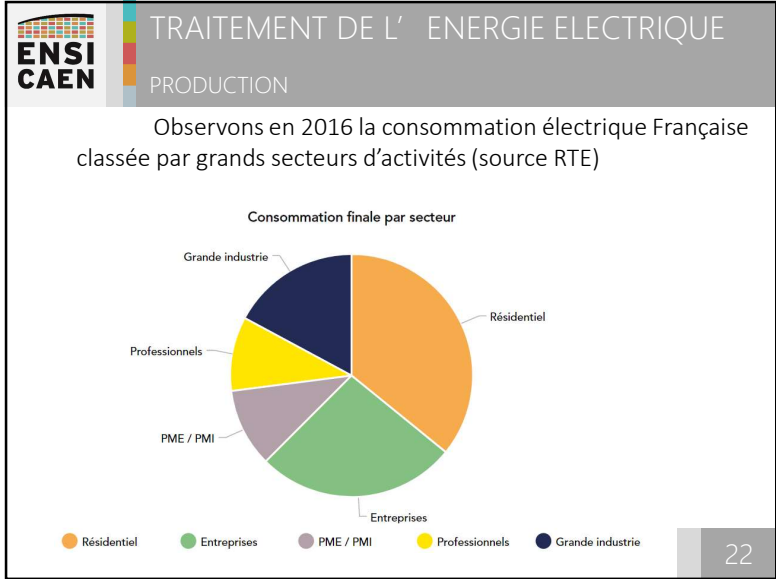
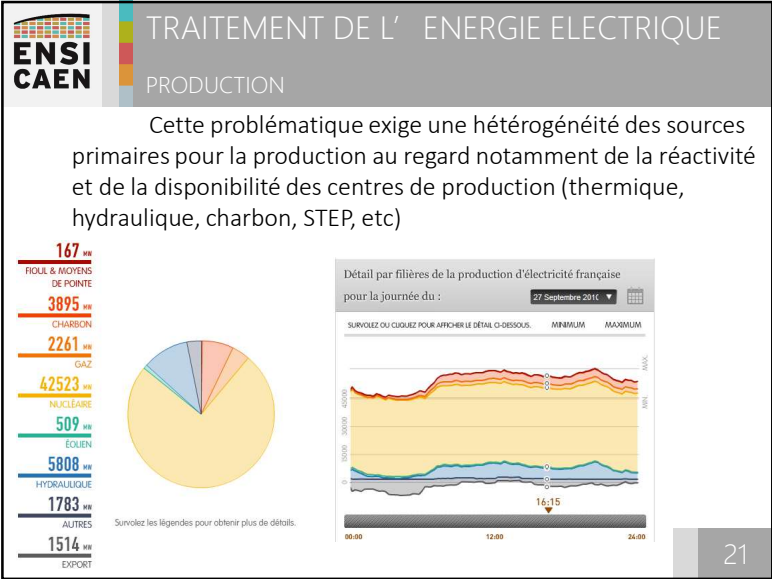
- 19 centrales nucléaires (58 tranches nucléaires)
- 29 centrales thermiques à flamme (pétrole, charbon, fioul)
- 10 centrales au gaz naturel
- 570 centrales hydrauliques

Répartition des capacités certifiées par filière au 31/12/16

| | |
|---------------------|------------------|
| Nucléaire | 54 147 MW |
| Thermique classique | 11 014 MW |
| Hydraulique | 14 333 MW |
| Solaire | 219 MW |
| Eolien | 1 873 MW |
| Autres | 8 687 MW |
| Effacement | 1 875 MW |
| TOTAL | 92 148 MW |

Les chiffres précédemment avancés sont des moyennes et ne reflètent pas forcément la répartition de la production instantanée d'électricité, soirée, saison, etc (source RTE)

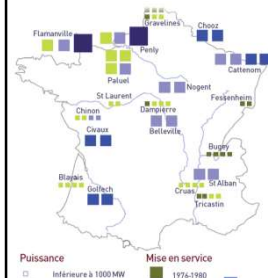




La France est au deuxième rang mondial dans le domaine de la production d'énergie électrique à partir du nucléaire

- **n°1** : USA (798,7 TWh en 2009 soit ~20% de l'énergie totale produite par le pays)
- **n°2** : France (384 TWh en 2016 soit ~72% de l'énergie totale produite par le pays)
- **n°3** : Japon (263,1 TWh en 2009 soit ~29% de l'énergie totale produite par le pays)

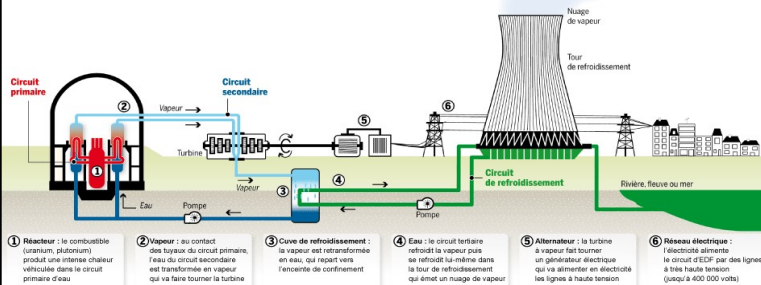
En 2015, la France compte 58 tranches nucléaires contre 436 de part le monde en 2012 (61 en construction). Chacune de ces tranches peut produire en moyenne 1GW (1,65GW pour l'EPR)



Puissance
 □ Inférieure à 1000 MW
 □ De 1000 à 1500 MW
 □ Supérieure à 1500 MW

Mise en service
 □ 1975-1980
 □ 1981-1985
 □ 1986-1990
 □ 1991-2010
 □ Après 2010

La production d'énergie électrique est assurée par un turbo-alternateur (ensemble turbine à vapeur et alternateur). Dans le cadre de cet enseignement nous nous intéresserons plus particulièrement à l'alternateur synchrone, le transport, la répartition puis la distribution de l'énergie électrique



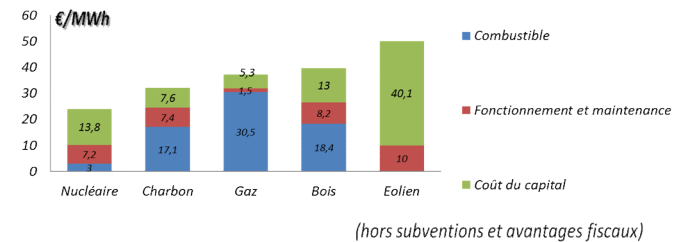
Observons à droite l'une des salles des machines de la centrale de Flamanville (turbo-alternateur). Sur l'image de droite, nous pouvons observer l'EPR (Réacteur Pressurisé Européen) en cours de fabrication. Malgré une forte controverse, la mise en service est prévue pour fin 2018





- *Dépendance et épuisement de la ressource (uranium, plutonium ...)*
- *Risque d'accident et d'exposition aux radiations*
- *Retraitement, stockage des déchets et démantèlement*
- Rendement relativement faible (~33%). EDF garantit un rendement proche de 35% avec son prochain réacteur EPR
- Puissance unitaire de production élevée. Stockage de la source relativement simple
- Peu sensible au prix de la matière première

- Coût de construction et d'exploitation faible mais démantèlement coûteux sur un processus long. Seuls les coût internes sont retenus (CEA) :



- Coûts externes faibles car peu de rejet de CO₂

En 2017, AREVA est l'un des leaders mondiaux du nucléaire, notamment au niveau de l'extraction minière. Le groupe propose aux électriciens une offre qui couvre toutes les étapes du cycle du combustible, de la conception à la construction de réacteurs nucléaires en passant par des services durant l'exploitation

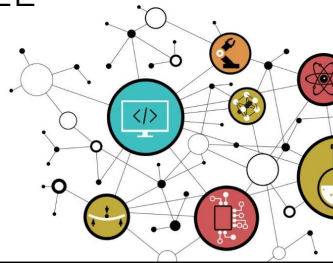


En 2015, la branche **Alstom Power** du groupe **Alstom** (90% du CA à l'étranger) était notamment leader mondial dans les domaines de l'énergie cités ci-dessous. 2015 signe également le rachat d'Alstom par la société Américaine **General Electric Power**. 2016 voit la suppression de 6500 emplois en Europe et prise en main par un groupe Américain de la maintenance d'appareillages de centrales nucléaires Françaises

- **Centrales électriques** clés en mains
- **Turbines et alternateurs** en hydroélectricité. Une partie des générateurs électriques du barrage des trois gorges ont été installés par Alstom

PRODUCTION

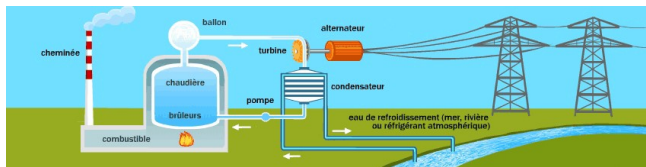
FOSSILE



Avec près de 60% de la production mondiale d'électricité, les combustibles fossiles sont actuellement les plus utilisés pour la production d'électricité de part le monde

- Le **charbon**, de loin la ressource primaire la plus disponible sur terre, mais la plus polluante !
- Le **gaz** naturel
- Le **pétrole**
- Le **Fioul** (dérivé du pétrole)
- la **biomasse** (matières organiques), les déchets municipaux ...

Hors charbon, les centrales les plus répandues sont les centrales thermiques à flammes et à turbine à gaz. Comme pour les centrales nucléaires, ces centrales utilisent des turbo-alternateurs pour la génération d'énergie électrique



En 2015, Engie (anciennement GDF Suez) est le 3^{ème} plus gros groupe mondial en matière d'énergie hors pétrole (actionnaire principale, état Français ~33%)

- 1^{er} Européen dans le transport, la distribution et le stockage du gaz naturel.
- 1^{er} producteur mondial indépendant d'électricité et possédant l'un des parcs les plus diversifiés au monde (nucléaire, charbon, géothermie ...)

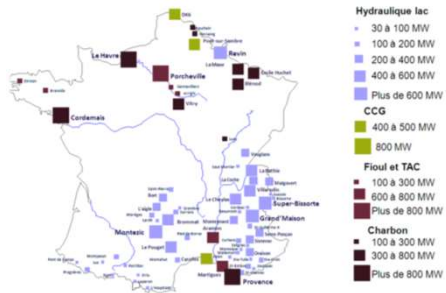
En 2017, Total SA, première entreprise Française au CAC40, fait parti des supermajors (6 plus grandes compagnies pétrolières mondiales). Ses activités couvrent l'ensemble de la chaîne de l'extraction à l'exploitation en passant par le raffinage.



Ces types de centrales ont notamment pour avantage d'être beaucoup plus réactives qu'une centrale nucléaire. Avec ses 4 générateurs de 600MW, la centrale à fioul de Porcheville avait pour rôle de faire face aux pointes de consommation du pays afin d'assurer la sécurité du réseau de la région parisienne. Néanmoins, suite au constat de surcapacité de production en France (coût fonctionnement), la centrale a été mise à l'arrêt en mai 2017.



Observons la répartition des infrastructures pour la production électrique de pointe en France. En effet, les énergies fossiles et hydroélectriques servent le plus souvent d'appoint au nucléaire, d'où la répartition géographique des sites afin d'assurer continuité du service et stabilité du réseau

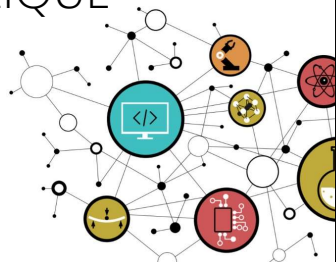


- Pollution à l'exploitation
- Dépendance et épuisement de la ressource (charbon, gaz, pétrole ...)

- Démarrage rapide
- Rendement relativement bon pour les centrales à chaudière récentes (> 45%)
- Puissance unitaire élevée et cogénération possible
- Stockage de la ressource relativement simple et coût de fabrication de la centrale peu élevé

PRODUCTION

HYDRAULIQUE

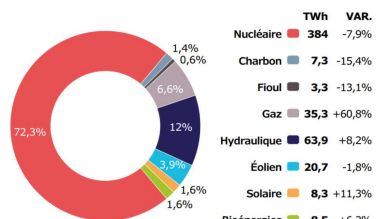


En 2017, l'énergie hydraulique (~15%) est une source de production d'électricité renouvelable qui fait quasiment part égale avec le nucléaire (~18%) à l'échelle mondiale. Observons l'hydroélectricité en France en quelques chiffres

- **EDF** est le premier producteur hydraulicien de l'union Européenne en 2017. Le leader mondial étant chinois.
- **70%** du potentiel hydroélectrique Français est déjà exploité
- **570** centrales hydroélectrique pour le parc Français

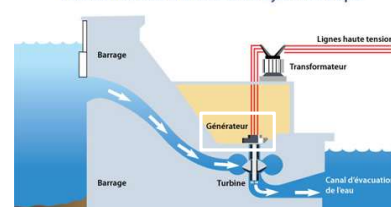
En 2016, observons en France la part de l'hydraulique dans la production d'électricité. Attention, énergie renouvelable ne signifie pas forcément énergie propre ou verte (barrages, canaux artificiels). Néanmoins, des solutions au fil de l'eau sans stockage faiblement impactantes pour l'environnement sont également en service

Énergie produite : 531,3 TWh (-2,8% par rapport à 2015)

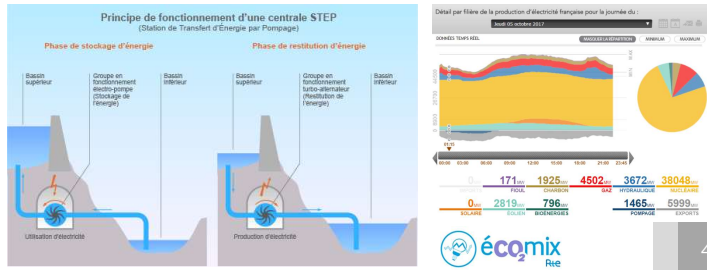


Les centrales hydroélectriques (barrage, lac, chute, canaux, marémotrice, etc) utilisent des turbines à eau et des machines électriques pouvant être réversibles. La plus grande installation Française peut fournir 1,8GW en deux minutes. Il s'agit de la centrale de type STEP de grand maison en Isère (cf. ci-dessous à droite)

Fonctionnement d'une centrale hydroélectrique



Les centrales hydroélectriques de type STEP (Station de Transfert d'Énergie par Pompage) peuvent assurer un stockage indirect d'énergie pouvant servir d'appoint durant les pics de consommation (phase de stockage et phase de production). Le rendement est important, entre 70% et 85% (rapport énergie produite sur énergie consommée) . Exemple de Grand Maison

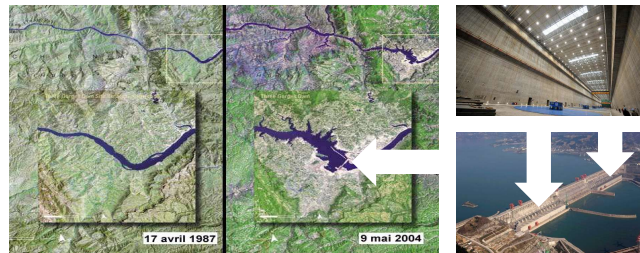


Energie renouvelable ne veut pas forcément signifier énergie propre ou énergie verte. Exemple de la centrale de St Chamas. L'apport considérable d'eau douce et de limons a eu de graves conséquences hydrologiques et écologiques pour l'étang de Berre, la Durance, la Camargue et les nappes phréatiques associées



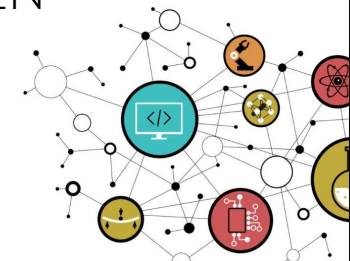
Centrale EDF de St Chamas sur l' étang de Berre en Provence

Le plus grand générateur d'électricité au monde est une centrale hydroélectrique et se situe en Chine. Il s'agit du barrage des trois gorges qui a été mise en production par étapes de 2006 à 2009. Les 26 générateurs assurent une production instantanée de 18,2 GW, soit plus de 12 tranches de centrales nucléaires

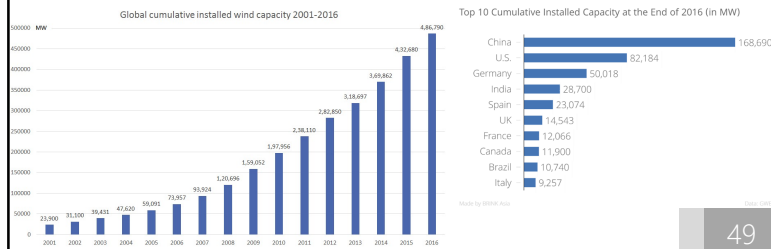


PRODUCTION

EOLIEN

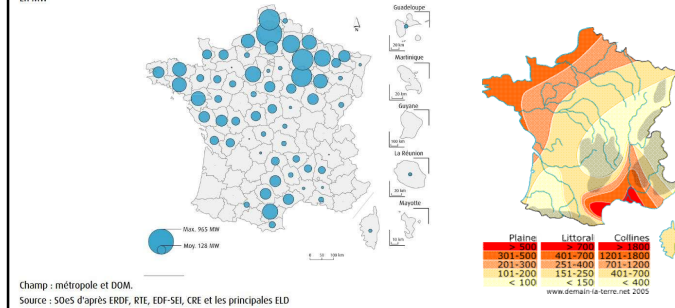


Les éoliennes utilisent la force motrice du vent afin de générer de l'électricité. Il s'agit d'une source de production d'énergie électrique renouvelable dite propre ou verte, hors énergie grise lié à l'ACV (Analyse du Cycle de Vie). Observons le parc mondial en puissance installée (différent du potentiel réel de production)

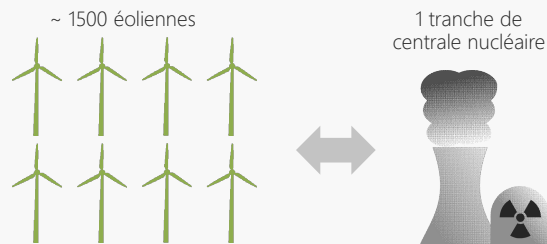


En 2016, la France compte une puissance installée proche de 12GW. Observons la répartition du parc éolien ainsi que le potentiel éolien Français (en W/m² à 50m du sol)

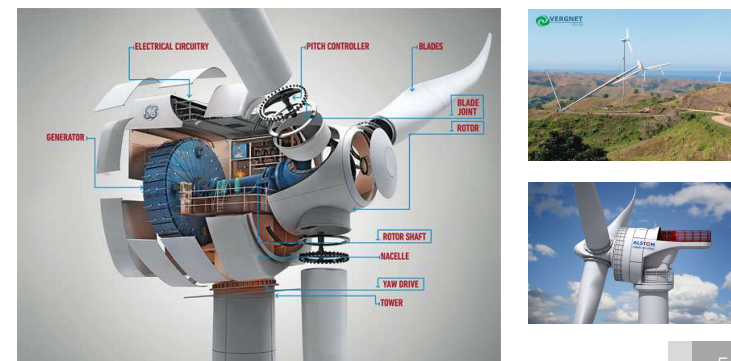
Puissance éolienne totale raccordée par département au 31 mars 2016
En MW



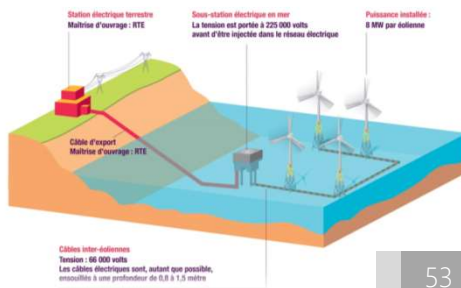
Etre prudent quant aux chiffres avancés. Une éolienne idéalement positionnée en on-shore ne fonctionne en moyenne que 2000h par an, une année comptant 8760 heures. **Une éolienne on-shore de 2MW ne produira environ que 600KW lissé en moyenne sur une année.** De plus, un réseau électrique basé uniquement sur l'éolien serait sujet à une forte instabilité et donc des discontinuités



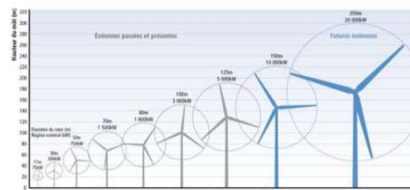
Observons les principaux éléments constitutifs d'une éolienne. Exemples d'éoliennes Vergnet et Alstom wind (GE wind)



Raccordement au réseau électrique d'éoliennes offshore.
Observons les projets en cours pour la France en 2015



En 2016, les plus grandes éoliennes actuellement en services possèdent un diamètre de 164m pour une puissance développée de 8MW (éolienne offshore Vestas, Danemark). La filiale **Areva Wind** du groupe du même nom développe actuellement des éoliennes offshore de 8MW

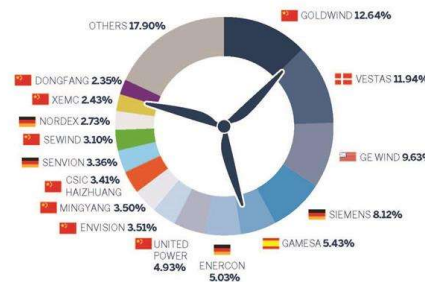


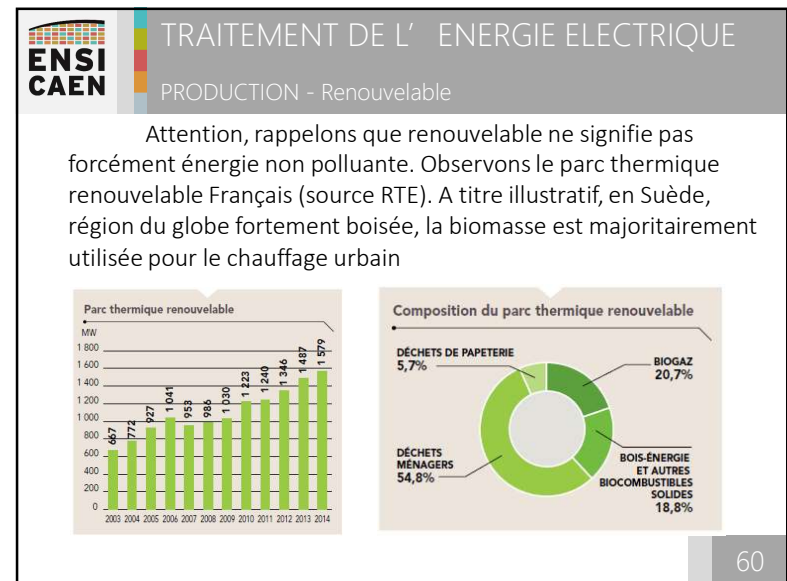
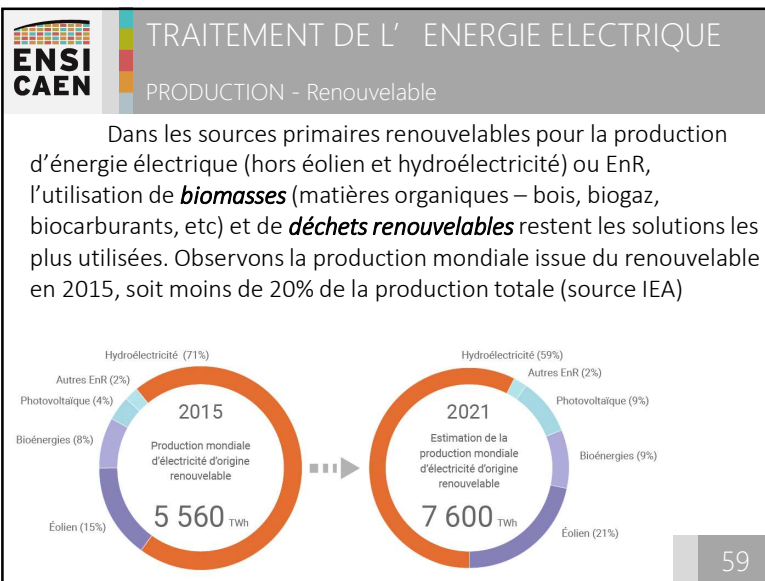
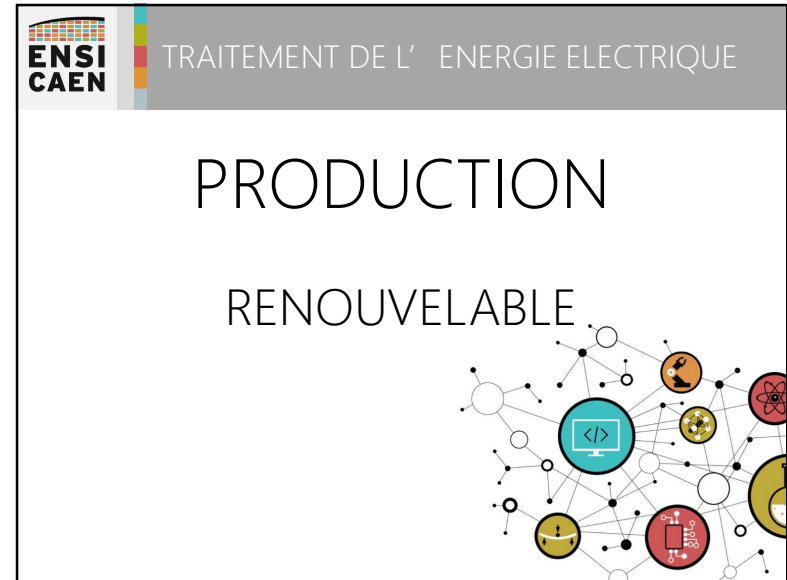
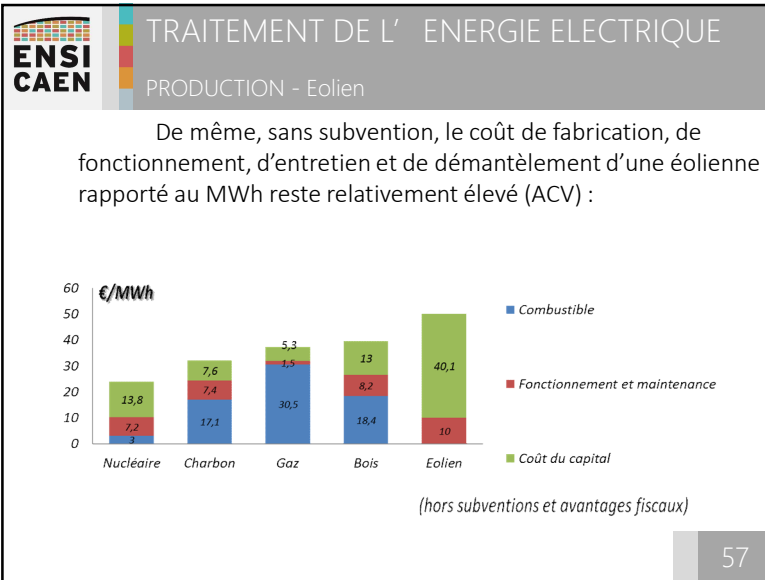
En 2017, observons les principaux acteurs français :

- **Areva Wind** : création en 2007 suite au rachat de la société Allemande Multibrud. 360 employés
- **Vergnet** : éoliennes de petites et moyennes puissances (dépôt de bilan et en cours de redressement judiciaire en fin 2017). 166 employés
- **Francéole** : création en 2013 et spécialisation dans la création de mâts terrestres. (en cours de redressement judiciaire en fin 2017). 160 employés
- **Alstom Wind (GE wind depuis 2015)**

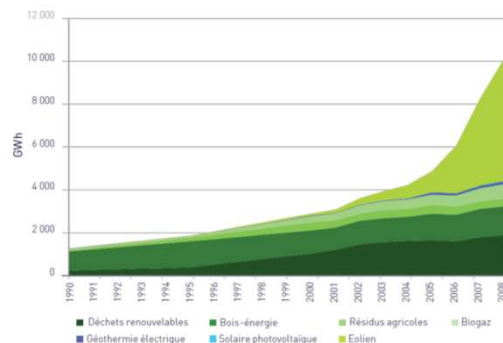
En 2015, observons la répartition du marché mondial des principaux fabricants d'éoliennes

Top 15 wind turbine suppliers in annual global market 2015



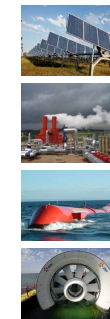


Observons jusqu'en 2008 l'évolution de la production d'électricité en France à partir de sources d'énergies renouvelables (hors hydroélectricité)

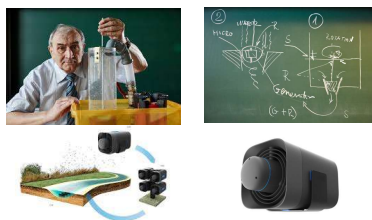


Il existe d'autres solutions de production électrique renouvelables. Ces techniques de production ne représentent qu'une faible part de la production électrique mondiale mais néanmoins des solutions délocalisées intéressantes

- **Solaire** : ~73GW installé pour le solaire de part le monde à la fin 2016, dont le photovoltaïque. En forte croissance
- **Géothermie** : ~13GW de part le monde en 2015
- **Force des vagues**
- **Hydrolienne** : La France possède le deuxième potentiel Européen après le Royaume-Uni



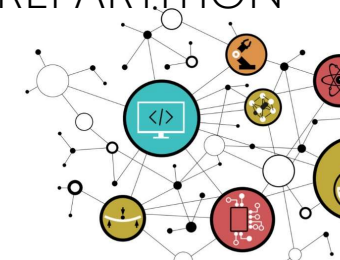
Prenons un exemple de solution innovante, renouvelable et propre pour la production d'énergie électrique (Miroslav Sedlacek, société Vortex Hydrokinetics). Cette solution non invasive (faune et flore) peut travailler sur de très faibles débits d'eau (rivière, ruisseau, etc) sans détériorer le courant et donc le milieu. Il existe deux solutions à la vente, 500W (turbine 320mm) et 5KW (turbine 680mm).



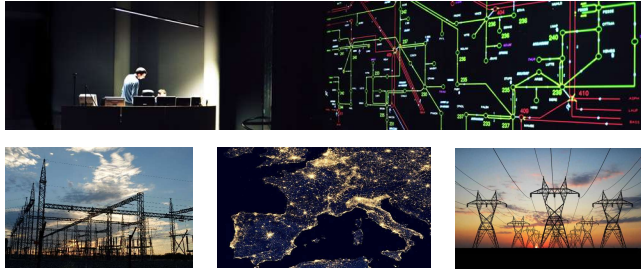
<https://vortexhydro.com/fr/>

TRANSPORT

TRANSPORT ET REPARTITION



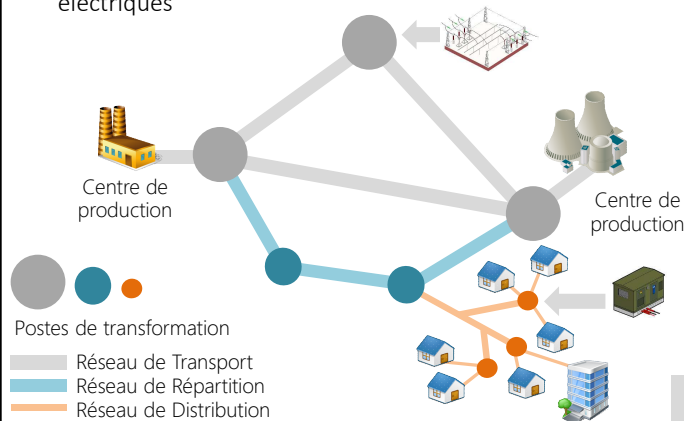
Le réseau électrique représente l'ensemble des infrastructures (transport, distribution, protection, etc) visant à acheminer l'énergie électrique des centres de production vers les consommateurs en assurant stabilité et continuité du service



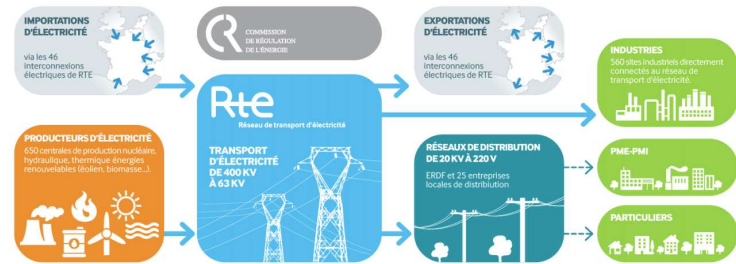
En France, les réseaux électriques peuvent-être divisés en trois sous réseaux

- **Réseaux de transport** : réseaux HTB (topologie maillée) de transport des gros centres de production vers les régions consommatrices (400KV et 225KV en France)
- **Réseaux de répartition** : réseaux HTB (topologie bouclée) assurant la desserte à l'échelle régionale (90KV et 63KV en France).
- **Réseaux de distribution** : réseaux HTA et BT inférieurs à 50KW (topologie en arbre), assurant l'alimentation de la clientèle (hors gros clients)

Prenons un exemple de topologie simplifiée des réseaux électriques



Les réseaux de Transport et de répartition sont gérés par RTE (filiale de EDF et opérateur leader Européen en 2017). Observons où se positionne RTE entre les centres de production et les utilisateurs



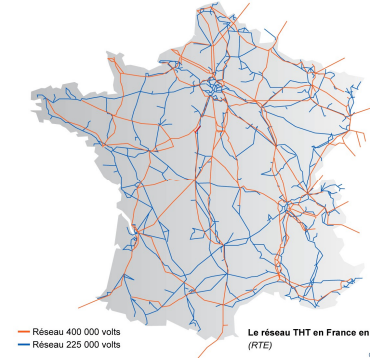
Ces différents réseaux et installations sont repérés par les niveaux de tension normalisés. Observons les standards français

| Niveaux de tension normalisés en vigueur en France (UTE C18-510) | | | | |
|---|-------------------------|-----------------------|-----------------------|----------------|
| HTB | HTA | BTB | BTA | TBT |
| $U_n > 50KV$ | $1KV < U_n \leq 50KV$ | $500V < U_n \leq 1KV$ | $50V < U_n \leq 500V$ | $U_n \leq 50V$ |
| Anciennes appellations encore couramment rencontrées ! | | | | |
| THT | HT | MT | BT | |
| $U_n > 200KV$ | $35KV < U_n \leq 200KV$ | $1KV < U_n \leq 35KV$ | $U_n < 1KV$ | |
| Niveaux les rencontrés en France | | | | |
| 400KV | 225KV | 90KV | 63KV | 20KV |
| | | | | 15KV |
| | | | | 400V |
| | | | | 230V |

Réseaux de transport
et de répartition

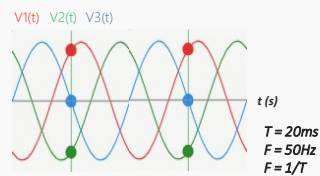
Réseaux de distribution

Observons le réseau de transport d'électricité Français. Le transport d'énergie électrique en très haute tension se fait en triphasé alternatif (HVAC)



— Réseau 400 000 volts
— Réseau 225 000 volts
Le réseau THT en France en 2013 (RTE)

Pour des raisons historiques et technologiques (alternateur synchrone, protection, conversion et transport), le transport de l'énergie électrique se fait le plus souvent en alternatif triphasé (monophasé proche de l'utilisateur). Les tensions imposées sur les réseaux Français sont triphasées sinusoïdales. En France, quel que soit le réseau électrique, toutes les grandeurs travaillent à 50Hz



Ligne moyenne tension

Les tensions de production sont différentes des tensions de transport. Sur des distances supérieures à quelques kilomètres, il y a nécessité d'élever les niveaux de tension avant de transporter l'énergie électrique

- **Limitation des pertes** par effet Joule (échauffement des lignes)
- **Réduction des chutes de tension en ligne**
- **Amélioration de la stabilité** des réseaux (plus faible sensibilité aux perturbations)

Les pertes par effet Joule liées au transport (échauffement des conducteurs) représentent chaque année près de ~2,5% de la consommation globale du pays, soit ~15TWh perdus. De façon générale, 7% de l'énergie produite s'échappe en pertes chaque année en France (source UFE)

A puissance utile transportée (P) correspondant à un besoin à un instant donné, en élevant la tension (U) nous limitons les pertes par effet Joule (Pj). Exemple pour un système triphasé équilibré de courants. R représente la résistance des matériaux utilisés pour le transport

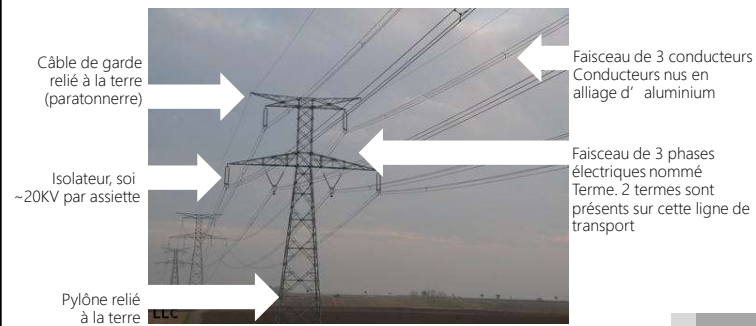
$$P_J = R \cdot I^2 = R \cdot \left(\frac{P^2}{3 \cdot U^2} \right)$$

Un second point de travail pour la diminution des pertes en ligne est de jouer sur les matériaux utilisés. Utilisation d'alliage d'aluminium pour le transport aérien (ratio poids/résistivité) voire de cuivre pour le transport souterrain (proche de l'utilisateur). Utilisation de faisceaux de conducteurs multibrins pour palier à l'effet de peau inhérent à l'utilisation de grandeurs alternatives 50Hz

$$R = \rho \cdot \left(\frac{l}{S} \right)$$



Observons une ligne 400KV sur le réseau RTE. Par exemple celle présente au sud de Caen et arrivant de Flamanville



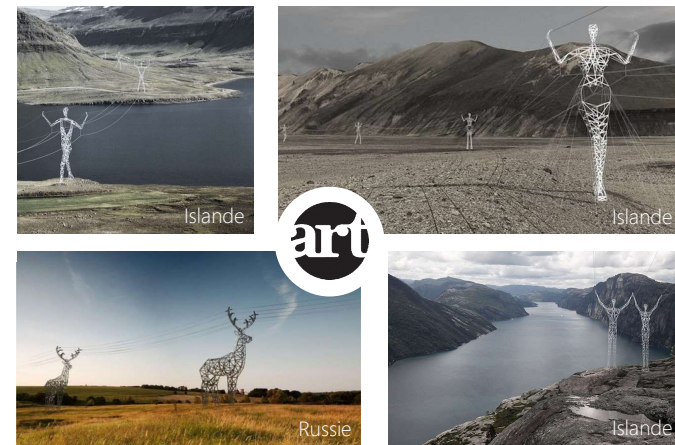
Câble de garde relié à la terre (paratonnerre)

Faisceau de 3 conducteurs Conducteurs nus en alliage d' aluminium

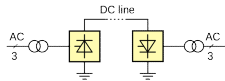
Isolateur, soit ~20KV par assiette

Faisceau de 3 phases électriques nommé Terme. 2 termes sont présents sur cette ligne de transport

Pylône relié à la terre



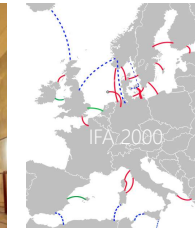
Certaines solutions actuelles de transport se font en courant continu via électronique de puissance (HVDC). En transport sous-marin ou au delà d'une certaine distance en aérien, il devient moins coûteux et plus efficace de transporter l'électricité en continu (~500-1000km en aérien)



- Diminution du nombre de conducteur. 1 faisceau HVDC peut remplacer 3 faisceaux HVAC avec sections de câbles plus faibles
- Interconnexion entre pays LLC (adaptions fréquences et tensions différentes), éolien off-shore (VSC), etc
- Pas de compensation de puissance réactive liée au caractère capacitif des lignes en haute tension

Exemples de transport d'électricité par HVDC

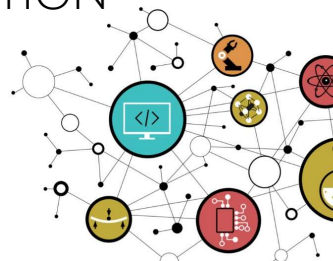
- Liaison France-Angleterre, IFA 2000 (Interconnexion France Angleterre 2000 MW).



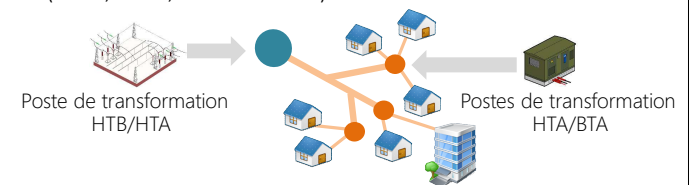
- Barrage des Trois-Gorges, Ligne de 1400km construite par Siemens pour une capacité de 5GW. 2 pylônes DC remplacent 5 pylônes AC

TRANSPORT

DISTRIBUTION

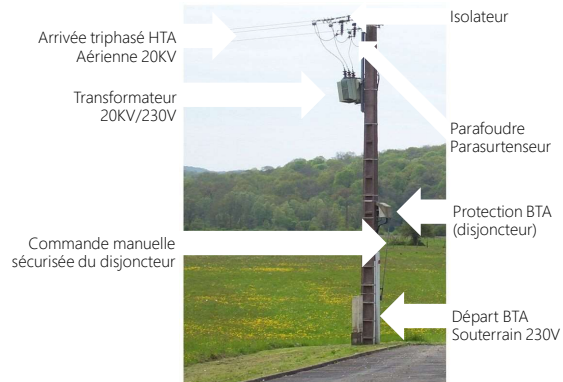


Les réseaux de distribution sont basés sur une topologie en arborescence. Rappelons les 4 niveaux de tension rencontrés en France (20KV, 15KV, 400V et 230V)



- **Topologie moins coûteuse** et adaptée à la distribution du service
- **Topologie moins robuste.** Un défaut sur une ligne moyenne tension, entraînera la coupure du service pour les clients en aval

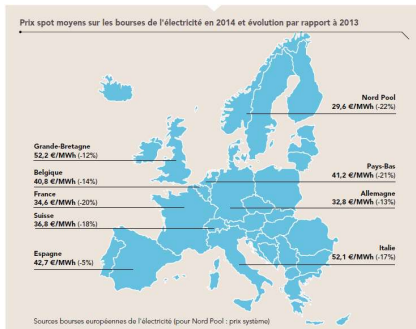
Observons un poste de transformation 20KV/230V sur poteau présent en milieu rural (HTA/BTA)



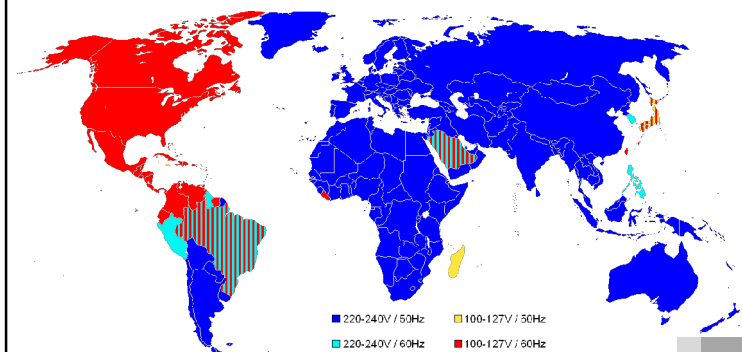
Avec 95% des réseaux publics de distribution, le principal gestionnaire des réseaux de distribution en France est **Enedis**, anciennement **ERDF** (premier distributeur d'électricité en Europe en 2017, filiale de EDF). Ses principaux concurrents Français en 2015 sont **Direct Energie** et **Engie**



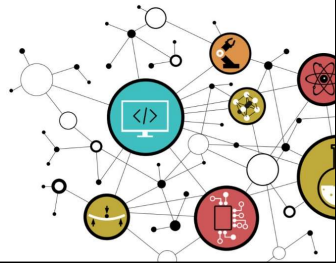
Pour information, la France étant l'un des principal acteur mondial autour de l'énergie, le coût de l'énergie électrique reste notamment relativement faible en France par rapport au reste de l'Europe



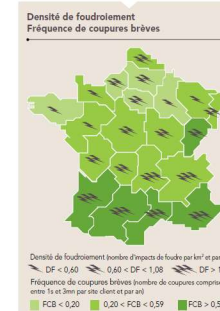
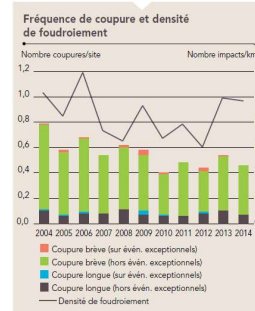
Observons les gammes de fréquences et de tensions en services en basse tension de part le monde



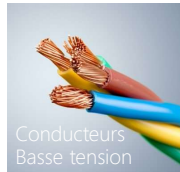
PROTECTION



Intéressons-nous à la protection électrique des **biens** (lignes, transformateurs, appareillages domestiques, etc) et des **personnes**. A titre indicatif, chaque année le réseau 400KV subi en moyenne 2,5 défauts pour 100Km de ligne et près de 150 sous 20KV (source RTE)



La **protection des biens** connectés aux réseaux (appareils domestiques, systèmes électroniques, etc) ou présents sur les réseaux (transformateurs, alternateurs, etc), passe notamment par l'ajout de matériel de protection non-intrusifs. L'objectif étant d'assurer une protection aux appareillages ainsi que la sécurité, la stabilité et la continuité du réseau



La **protection des personnes** s'intéresse à la sécurité des personnes entrant en contact avec le réseau. A notre époque, les installations électriques tuent toujours. En 2015 l'électricité serait responsable d'environ 60 électrocutions (décès), 3000 électrisations (incident sans décès) et d'un quart des 200 000 incendies provenant en moyenne chaque année dans les 35 millions de logements (source ONSE - Observatoire National de la Sécurité Electrique)

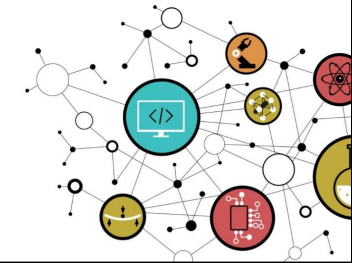


En cas d'erreur humaine, de défaut matériel, d'incident climatique, la protection des biens et des personnes est principalement assurée par les aspects suivants

- **Appareillages de protection** : disjoncteur, disjoncteur différentiel, sectionneur, etc
- **Régimes de neutre** : *TT* chez les particuliers, *IT* milieux critiques (hôpitaux), etc
- **Habilitation électrique** : B0, B0V, B1, B1V, etc. Formation et certification au respect des normes, procédures de sécurité, maîtrise des risques, etc

PROTECTION

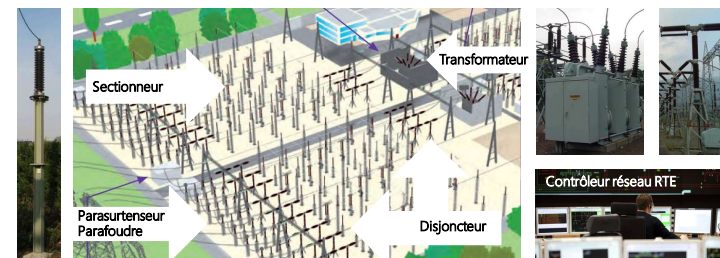
PROTECTION DES BIENS



La protection des biens intervient aussi bien sur les réseaux HTB que les réseaux BTA. Les principaux appareillages de protection ou d'isolement sont les suivants

- **Disjoncteur** (pouvoir de coupure)
- **Sectionneur** (sans pouvoir de coupure)
- **Interrupteur** (pouvoir de coupure)
- **Contacteur** (pouvoir de coupure)
- **Fusible** (pouvoir de coupure)

Observons les appareillages et fonctions d'un poste de transformation électrique haute tension : **transformation, routage, protection, isolement et supervision**



ENSI CAEN TRAITEMENT DE L' ENERGIE ELECTRIQUE
PROTECTION – Protection des biens

- > Rte: Le réseau de transport d'électricité
- > Schneider Electric: Fourniture d'une passerelle d'échanges numériques entre ENEDIS et RTE
- > enedis: L'ÉLECTRICITÉ EN RÉSEAU
 - > Spécifications techniques de la passerelle d'échanges numériques entre ENEDIS et RTE
 - > Spécifications techniques de la nature des données échangées avec RTE
- > neology: Fourniture de capteurs innovants de mesure de courant, développés à partir de nanomatériaux.
- > Alcatel-Lucent:
 - > Fourniture de solutions de communication à haut débit
 - > Fourniture de solutions de cybersécurité
- > GE:
 - > Fourniture de contrôle commande numérique avec fonctions logicielles avancées (monitoring, télémaintenance)
 - > Fourniture de matériels HT natifs numériques
 - > Interfaçage numérique des équipements analogiques existants
 - > Intégration de l'ensemble par le contrôle commande
- > Autres:
 - > Spécifications techniques du projet
 - > Exploitation du nouveau poste au sein du système électrique français
 - > Garant de l'interopérabilité du système
 - > Sélection du projet dans le cadre du Programme Investissement d'Avenir pour sa complémentarité avec les autres projets retenus au titre des réseaux intelligents.
 - > Financement du projet à hauteur de 9,7M€

93

ENSI CAEN TRAITEMENT DE L' ENERGIE ELECTRIQUE
PROTECTION – Protection des personnes

Le **sectionneur** est un appareillage d'aiguillage et de protection essentiel présent dans les postes de transformation haute tension. Architecturés sous forme de matrice d'interconnexion, ils assurent le routage de l'énergie d'un réseau à un autre (pic de consommation, discontinuité, maintenance, etc). Il a un rôle d'isolement mais ne possède aucun pouvoir de coupure.

94

ENSI CAEN TRAITEMENT DE L' ENERGIE ELECTRIQUE
PROTECTION – Protection des biens

Le **disjoncteur** est l'un des principaux éléments de protection d'appareillages électriques. Les disjoncteurs sont réarmables et assurent une protection contre les surcharges en courant voire les court-circuits.

Disjoncteur 63KV

Disjoncteur 400KV

Disjoncteur Legrand 230V 16A

95

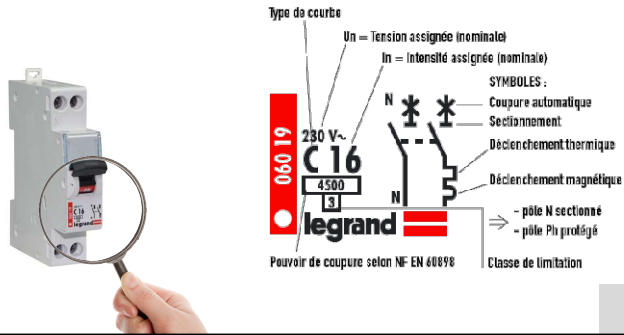
ENSI CAEN TRAITEMENT DE L' ENERGIE ELECTRIQUE
PROTECTION – Protection des biens

En 2010, **Alstom Grid (actuellement GE power)** et **Schneider Electric** ont fait l'acquisition de **Areva T&D** (~30% de Areva en 2008), le leader mondial dans les domaines de la transmission et de la distribution d'électricité (~1800 Salariés)

Usine de Villerbanne, fabrication de disjoncteurs

96

Prenons l'exemple d'un disjoncteur travaillant en basse tension, typiquement installé chez des particuliers. Observons les informations inscrites en face avant

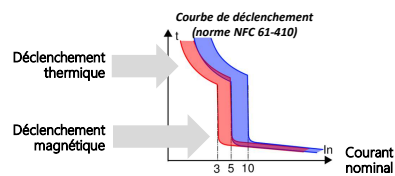


En 2017 **Legrand** est le leader mondial sur les marchés des infrastructures électriques et numériques du bâtiment (interrupteurs, prises, produits de cheminement de câbles, etc)

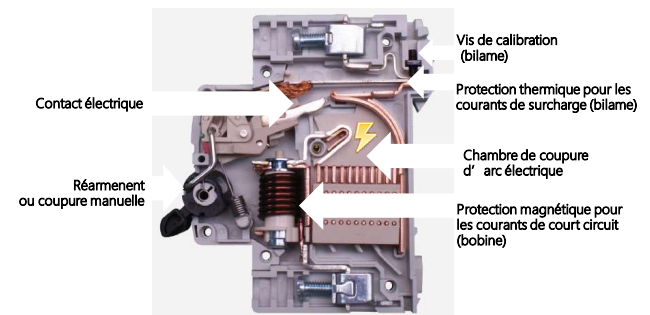


Un disjoncteur est un dispositif électromécanique permettant d'interrompre la circulation du courant électrique en cas d'incident. Contrairement au fusible, il est réarmable. En basse tension, il est capable d'interrompre deux types de défauts :

- Courant de **Surcharge** (déclencheur thermique - bilame)
- Courant de **Court-circuit** (déclencheur magnétique - bobine)



Etudions la structure interne d'un disjoncteur domestique

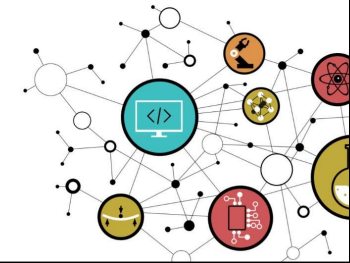


En 2015, la société Française **Schneider Electric** figure parmi les premiers fabricants mondiaux d'équipements de distribution électrique basse et moyenne tension, d'automatismes industriels et d'équipements de protection électrique. Suite au rapprochement du groupe avec le britannique AVEVA, il devient en 2017 le leader mondial des logiciels industriels et d'ingénierie



PROTECTION

PROTECTION DES PERSONNES



Observons les différentes gammes de courants alternatifs pouvant être dangereuses pour un être humain. Les valeurs présentées ci-dessous sont légèrement plus élevées pour des grandeurs continues

| Intensité | Effets | Durée du contact |
|-----------|---|------------------|
| ~0,5–1mA | Seuil de perception | |
| ~8mA | Choc au toucher | |
| ~10mA | Contractions musculaires | ~4m30s |
| ~30mA | Paralysie ventriculaire | ~30s |
| ~40mA | Fibrillation ventriculaire | ~3s |
| ~75mA | Fibrillation ventriculaire | ~1s |
| ~300mA | Paralysie et fibrillation ventriculaire | ~110ms |

Le corps humain étant essentiellement constitué d'eau (~60%). La résistance au passage du courant dans le corps humain dépend essentiellement de notre peau (~95%). Observons les principaux facteurs aggravants

- **Epaisseur** de la peau (dépend des activités de l'individu)
- **Humidité** (salle de bain, cuisine, etc)
- **Surface** et **pression** de contact



Prenons un exemple du quotidien et observons les sécurités déployées dans un milieu domestique afin d'assurer la sécurité des personnes. La norme NF C15-100 réglemente les installations électriques en basse tension en France

Modèle électrique simplifié

105

En cas de contact le réseau, le courant cherchera le chemin le plus court pour se rendre à la terre. Exemples de précaution, utiliser toujours la main droite pour toute manipulation (cœur à gauche), utiliser des chaussures offrant une bonne isolation avec le sol voire des gants, couper le disjoncteur différentiel en amont, etc

Modèle électrique simplifié

106

Il existe un réel danger pour l'homme à travailler sans protection sur les réseaux BTB (230V - 50Hz). Le principal appareillage de protection à votre domicile en cas d'incident est le **disjoncteur différentiel**. En complément d'une protection en cas de surcharge, son rôle est d'assurer une coupure en cas de mesure d'une différence de courant entre phase et neutre supérieure à 30mA

Disjoncteur Legrand 40A (surcharge) et différentiel 30mA

107

Prenons l'exemple d'une installation électrique domestique

Compteur général scellé et installé par Enedis. Exemple de Linky

Disjoncteur 40A et différentiel 30mA (protection des biens et des personnes)

Disjoncteur 16A (protection des biens)

108

Prenons quelques exemples de protection d'opérateurs RTE et Enedis en services sur des lignes en hautes et moyennes tensions. Ces opérateurs ont en possession une habilitation électrique

- Coupure du réseau, mise à la terre, respect de distances de sécurité
- Intervention au potentiel (HTB)



Travail au potentiel. Exemple de robot Linescout de Hydro-québec en service (sous tension)



Coupure du réseau en amont et mise à la terre par sécurité (hors tension)



Distances de sécurité pour isolation durant la maintenance (sous tension)

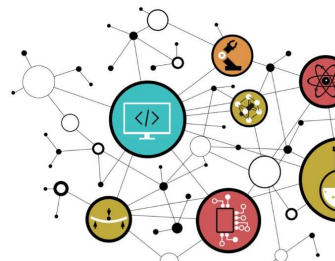
L'habilitation électrique (B0, B0V, B1, BC ...) est la reconnaissance de la capacité d'une personne à opérer en toute sécurité sur différents réseaux électriques (B=TBT-BT, H=HT). Cette habilitation est accompagnée d'une formation aux risques électriques effectuée par une entreprise spécialisée et est délivrée par l'employeur



| Personnel | Symbole d'habilitation | Domaine de tension | Champs d'application | Indications supplémentaires |
|--------------------------------------|------------------------|--------------------|---|--|
| Non-électricien habilité | | | | |
| Exécuteur électricien | | | | |
| Chargé de travaux ou d'interventions | B2 | BTA | Toutes installations industrielles de la Direction régionale Supersmarché de Toulouse Eclairage | Sauf tableaux généraux du supersmarché |
| Chargé de consignation | BC | BTA | Supersmarché de Toulouse Zone machines frigorifiques | |
| Habilités spéciaux | | | | |

Le Titulaire signature: *[Signature]* Pour l'Employeur Nom et prénom: CHARDIH Francis Fonction: Chef de Division Signature: *[Signature]* Date: 1 janvier 2001 Validité: fin décembre 2002

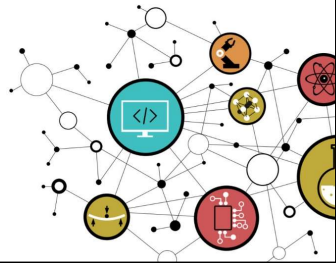
CONVERSION



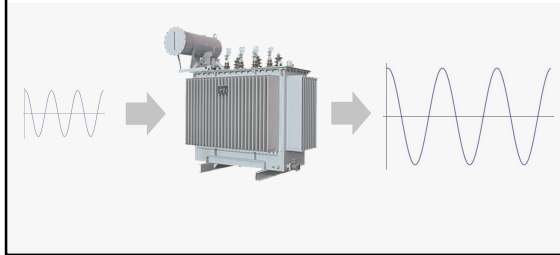
L'étude de la conversion de l'énergie électrique en une autre source électrique de nature différente (alternative ou continue) ou en énergie mécanique peut-être découpée en deux grandes parties

- **Electronique de puissance** et **transformateurs**. Conversions électriques (alternatif/alternatif, alternatif/continu, continu/alternatif, continu/continu)
- **Machines électriques tournantes** en fonctionnement moteur ou alternateur/générateur. Conversions Electromécaniques réversibles. *L'analyse préalable du fonctionnement d'un transformateur est un avantage indéniable pour la compréhension de ces machines !*

CONVERSION TRANSFORMATEUR



Un **transformateur** assure une conversion électrique sans modification de la fréquence des grandeurs, seules les amplitudes des courants et tensions sont impactées (utilisé dans sa plage de linéarité). Un transformateur est réversible. Utilisation sur les différents réseaux électriques, applications aux transports (ferroviaire, aéronautique, etc), etc pour de l'adaptation de niveaux de tension et de l'isolement



| Transformateurs RTE 2016 | | |
|--------------------------|---------------------------|-------------------------|
| Tension (kV) | NOMBRE DE TRANSFORMATEURS | PUISSANCE NOMINALE (MW) |
| 400 kV | 301 | 137 322 |
| 225 kV | 845 | 92 047 |
| 150 kV | 28 | 1 419 |
| 90 kV | 26 | 1 215 |
| 49 kV | 23 | 756 |
| TOTAL | 1 223 | 232 758 |

Observons des transformateurs 400KV Alstom (actuellement GE power) présents sur le réseau de transport RTE. La politique de rénovation, d'évolution du réseau et de diminution des pertes en lignes reste très active chez RTE (technologies des transformateurs, des conducteurs, maillage du réseau, etc)



Transformateur en assemblage (noyau magnétique et enroulements)



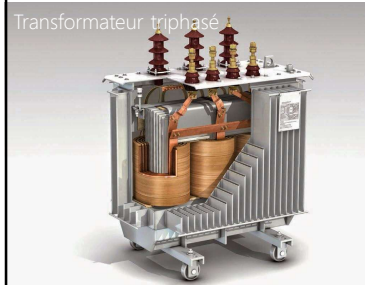
Transformateur en test



Transformateur en service

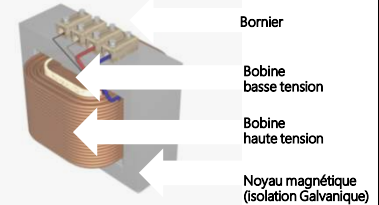


Un transformateur reste essentiellement constitué par un noyau magnétique (alliage de Fer-Silicium) et deux enroulements en cuivre par phase (primaire/entrée et secondaire/sortie). Il assure un transfert direct d'énergie sans stockage. La France compte plusieurs fabricants (Schneider Electric anciennement France Transfo, etc)



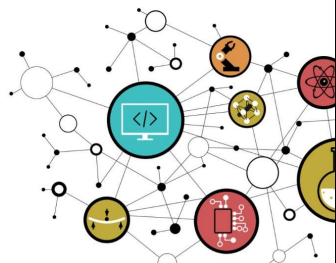
Transformateur triphasé

Transformateur monophasé



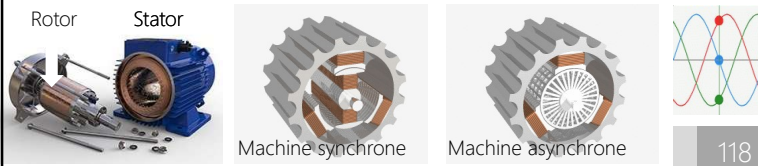
CONVERSION

MACHINES ELECTRIQUES



Le fonctionnement d'une machine électrique tournante est entièrement réversible, moteur ou alternateur/générateur. Dans les applications en puissance, deux technologies triphasées alternatives se détachent. D'autres variantes ou technologies existent, notamment en faible puissance

- **Machines Synchrones ou MS** : production électrique, transport, etc
- **Machines Asynchrones ou MAS** : industrie, moteur vitesse fixe, etc



Pour la production d'électricité, solutions pour le transport où le poids reste critique, les machines synchrones sont les plus répandues. Pour les machines à aimants en transport, meilleur ratio poids-puissance-encombrement. Machine à rotor bobiné en fort couple ou en production électrique (turbo-alternateur, etc)



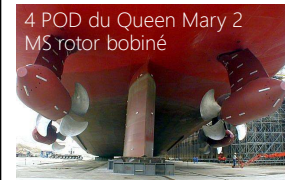
En 2015, la branche **Alstom Transport** du groupe **Alstom** était notamment leader mondial dans les domaines du transport suivants

- **Trains** à grande vitesse (AGV et TGV) et trains pendulaires
- **Trains** de banlieues et régionaux (X 72500/X 73500/X 73900)
- **Tramways** (Citadis) et véhicules légers sur rail

En terme de volumes, les machines électriques tournantes sont utilisées majoritairement en fonctionnement moteur, prenons quelques exemples industriels et à usages domestiques



Prenons un exemple présentant une évolution technique liée au potentiel des machines électriques. Concernant le Queen Mary 2, les machines électriques utilisés pour la propulsion sont déportés dans les POD (Propulsors Outboard Drives). Impossible à réaliser avec des moteurs thermiques

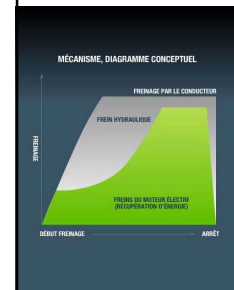


Queen Mary 2, paquebot au plus fort tonnage lors de sa sortie – fabriqué à St Nazaire

Actuellement, dans les applications ferroviaires, les machines utilisées pour la propulsion deviennent également génératrices durant les phases de roues libres et de freinage (frein principal). Néanmoins, le stockage seraient trop impactant (poids-coût), cette énergie récupérée est alors dissipée dans des rhéostats. Le projet Hesop développé par Alstom tend à palier ce problème (Tramway parisien T1 RATP en 2011, métro londonien ligne Victoria en 2014, etc)

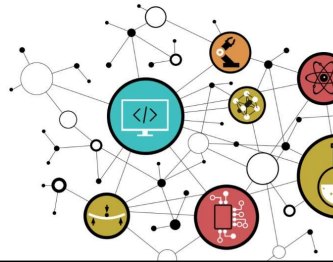


Une machine électrique est réversible et peut devenir génératrice (roue libre, freinage magnétique). Cette source de production étant discontinu, une interface de stockage est alors nécessaire (supercondensateur, etc). La problématique est semblable aux applications de production EnR éolien, photovoltaïque, etc



CONVERSION

ELECTRONIQUE DE PUISSANCE



L'Electronique de Puissance est un domaine récent de l'ingénierie (~1950) au regard de l'âge de l'Electrotechnique (~1850). Ce domaine est basé sur l'utilisation du **transistor**, utilisé sous forme d'interrupteur statique (non mécanique). Les structures de l'électronique de puissance sont souvent historiquement nommées convertisseurs statiques. Observons les composants élémentaires

- **Transistor** : interrupteur électronique commandé à l'ouverture et à la fermeture mais non réversible en courant
- **Diode** : interrupteur électronique non commandé non réversible en courant
- **Thyristor** : interrupteur électronique non réversible en courant commandé à l'ouverture seulement

En fonction des gammes de courants, de tensions et de fréquences rencontrées (limitations technologiques) durant le développement d'une application, différentes solutions d'interrupteurs statiques sont alors accessibles (cellules de commutation). Prenons quelques exemples illustratifs

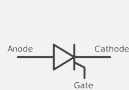
Technologies


 Thyristor GTO
4500V - 3000A - ~1KHz

 Transistor IGBT
600V - 150A - 25KHz

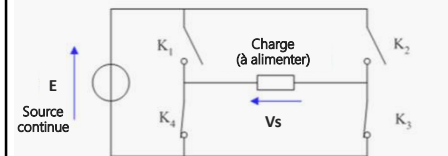
 Transistor MOSFET
100V - 10A - 1MHz

Symboles

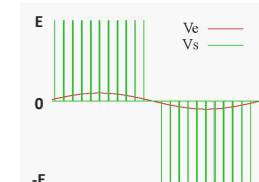


Diode pour réversibilité en courant

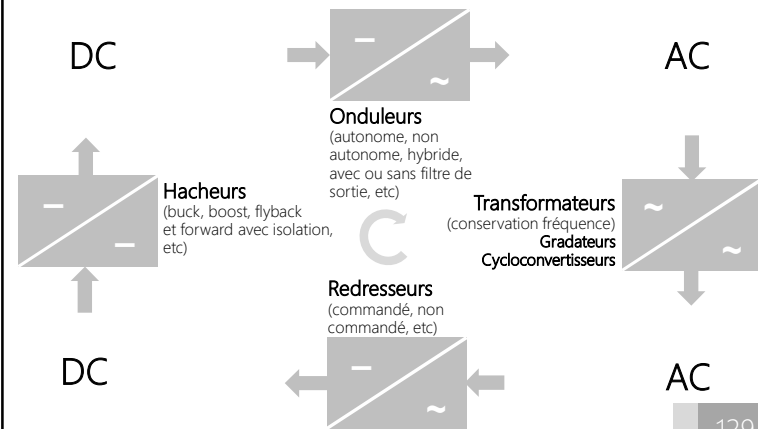
La structure électronique présentée ci-dessous est quasi universelle et se nomme **hacheur quatre quadrants** (ou pont en H). En fonction des applications visées, différentes topologies plus ou moins riches en cellules de commutation voire avec isolation Galvanique existent (buck, boost, flyback, forward, etc)



K1, K2, K3 et K4 sont les interrupteurs statiques ou cellules de commutation (cellule de commutation à transistor voire avec diode en anti-parallèle pour assurer une réversibilité en courant)



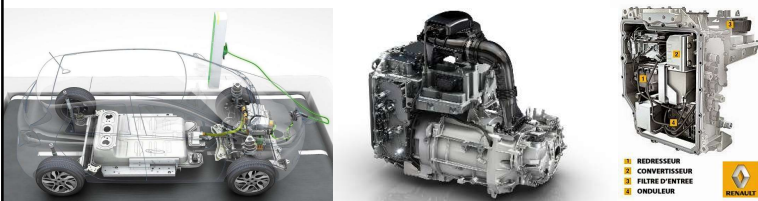
Application onduleur (Ve - après filtrage analogique L/C des harmoniques hautes fréquences)



Prenons quelques exemples d'applications. De façon générale, tout appareillage utilisant de l'électronique (traitement de signaux électriques sous forme d'information) nécessitera au préalable une étape de conversion vers des grandeurs continues (TBT < 50V)

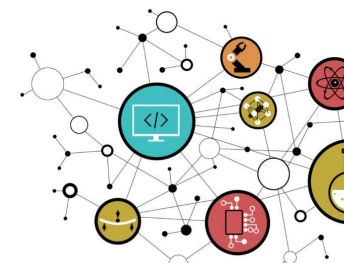


Observons à nouveau la voiture électrique Zoé proposée par Renault (modèle 22KWh). Pour information, le pack batterie Lithium-ion offre une tension totale de 400V (12 modules pour 192 cellules). Quizz autour de l'électronique puissance embarquée



Proposer une architecture pour le système électronique de puissance embarqué !

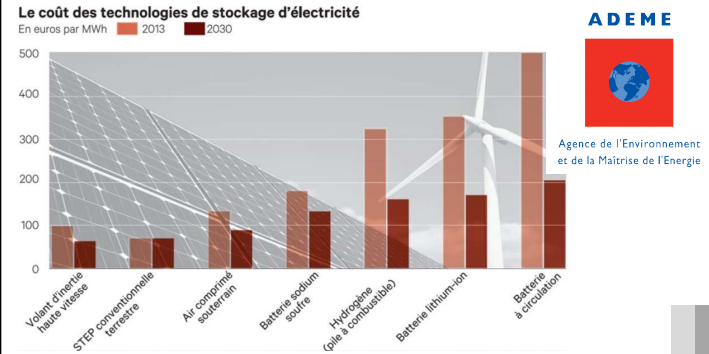
STOCKAGE



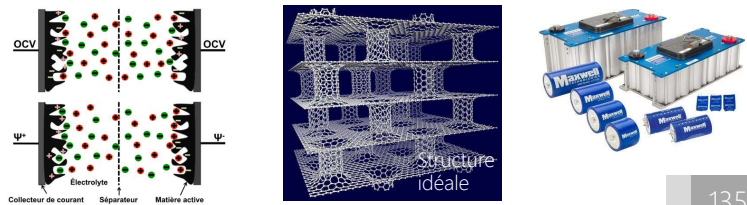
Avec l'émergence grandissante des EnR (éolien, solaire, etc) ainsi que les besoins en stabilité et continuité du service, le stockage d'énergie va devenir un enjeu majeur de demain

- **Energie mécanique** : STEP (Station de Transfert d'Énergie par Pompage), volant inertiel, CAES (Compressed Air Energy Storage)
- **Energie électrochimique et électrostatique** : Batterie, supercondensateur, condensateur électrolytique classique
- **Energie chimique** : pile à combustible, P2G (Power to Gas)
- **Supraconductivité** : SMES (Superconducting Magnetic Energy Storage)

Observons les solutions pour le stockage d'énergie électrique classées par coût (source – ADEME). A notre époque, il reste moins coûteux de produire que de stocker (appoint)



De grands efforts sont fournis dans les différents développements autour des **supercondensateurs** (nanotechnologies, graphène, etc). Il s'agit de condensateurs utilisant des techniques particulières offrant une densité de puissance et d'énergie intermédiaire entre les batteries et les condensateurs électrolytiques classiques (électrodes en charbon actif). Temps de charge rapide et très grande durabilité (transport, solaire, etc)



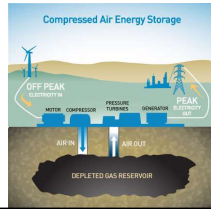
Un **volant inertiel** assure un stockage d'énergie sous forme d'énergie cinétique en rotation. Trois phases sont alors rencontrées, la phase de stockage (un machine tournante en fonctionnement moteur convertit énergie électrique en énergie cinétique), la phase stationnaire (vitesse constante et faible consommation électrique) et la phase de restitution (la machine tournante devient génératrice et est entraînée par la masse en rotation). Exemple de la société française **Energistro** en 2017 pour une application dédiée à des parcs photovoltaïques.



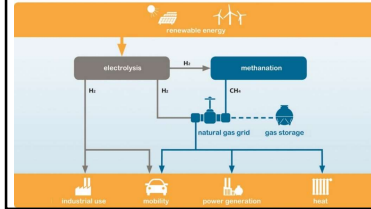
Le stockage **CAES (Compressed Air Energy Storage)** utilise le principe d'élasticité de l'air. L'énergie à emmagasiner est indirectement stockée par compression d'air dans des cavités souterraines pour être récupérée par détente d'air attaquant un turbo-alternateur. Bien qu'existant depuis 1978 (Huntorf, Allemagne), il n'existe en 2017 qu'une dizaine de projets en production ou en construction de part le monde. Néanmoins, de nouveaux projets sont en cours de financement. Des solutions adiabatiques (A-CAES) sont en études et pourraient relancer le CAES

Huntorf

2 cavités de 150 000m3
650-800m profondeur
45-70 bar
290MW (durant 2-3h)
Rendement 40-50%

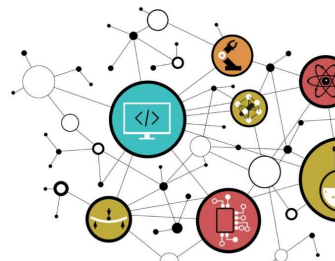


Le **P2G (Power to Gas)** consiste à transformer de l'électricité en hydrogène par électrolyse de l'eau lorsque celle-ci est excédentaire sur le réseau. L'hydrogène peut alors être valorisé de différentes manières (cf. image ci-dessous). Une fois converti en méthane, il offre l'avantage de devenir facilement stockable. En raison de l'accroissement des sources intermittentes de production sur les réseaux, derrière l'Allemagne et le Danemark, il est à noter quelques projets Français (GRHYD Dunkerque, Jupiter 1000 Fos, etc)



Audi, Allemagne
6MW

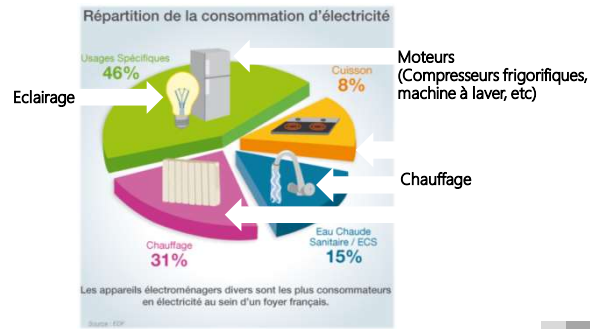
UTILISATION



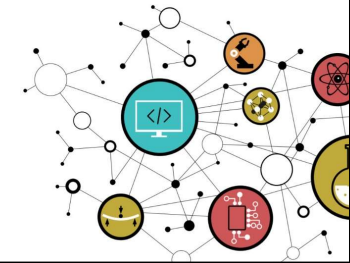
Cette dernière partie traite de domaines étroitement liés à celui du traitement de l'énergie électrique et pointe certains usages clés de cette énergie

- **Eclairage** : domestique, publique, industriel, etc
- **Chauffage** : domestique, publique, industriel, etc
- **Automatisme** : Automatisation du contrôle de procédés (API ou Automate Programmable Industriel), pilotage de machines outils, chaînes de production, etc (très nombreux moteurs)

Observons par exemple à notre époque les principales sources de consommation dans le domicile des usagers



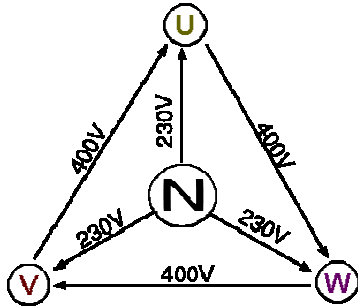
SYNTHESE



Merci

LES CIRCUITS TRIPHASÉS

Ahmed AOUCHAR



L'École des INGÉNIEURS Scientifiques



1 - PRÉSENTATION

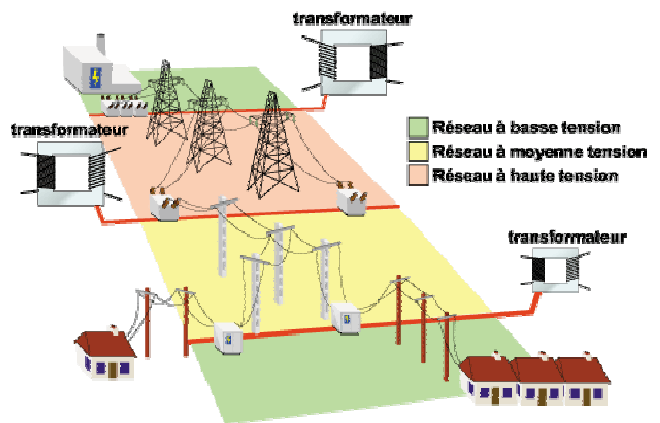
1.1. L'ÉLECTROTECHNIQUE

✗ L'électrotechnique est un domaine qui englobe :

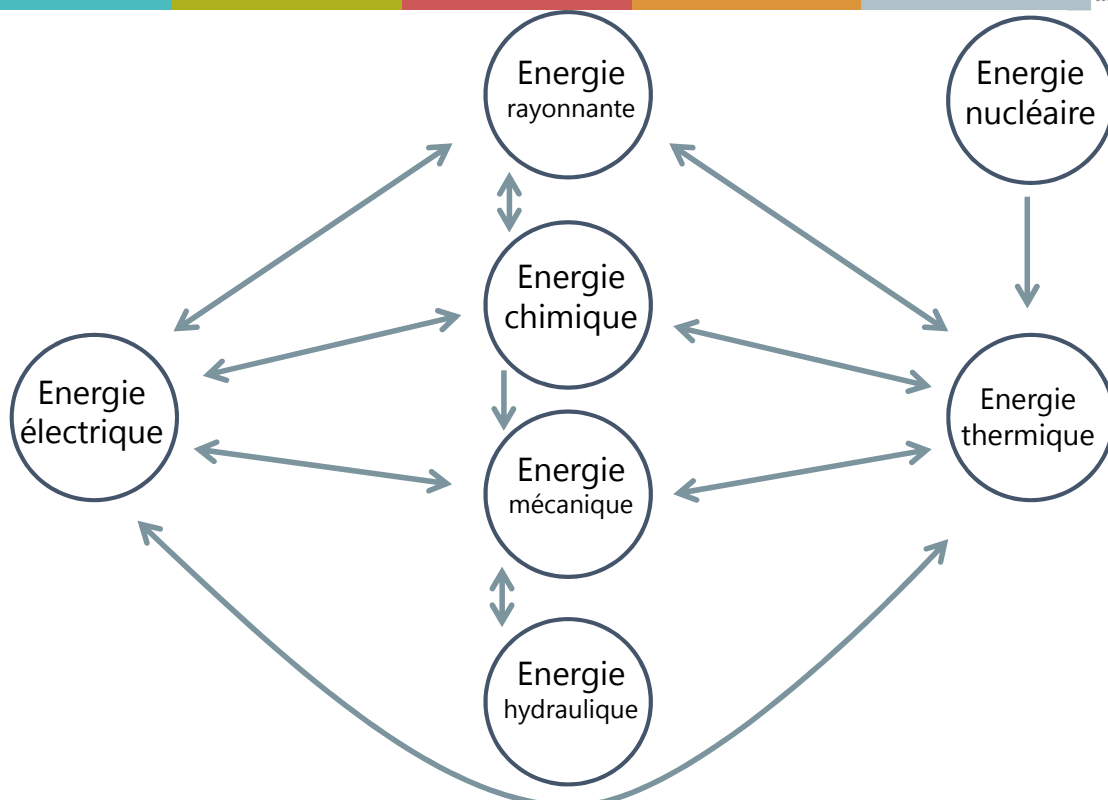
1. La production,
2. Le transport,
3. La distribution,
4. et la consommation

de l'électricité

L'énergie est au cœur des systèmes rencontrés en électrotechnique.



1.2. VECTEUR D'ÉNERGIE



1.3. QUANTIFIER L'ÉNERGIE

- ✗ L'énergie ou le travail mis en jeu par une machine évolue avec le temps.
- ✗ On préfère mesurer la quantité d'énergie induite par unité de temps.
- ✗ C'est ce que l'on appelle la puissance.

$$P = \frac{dW}{dt}$$

Puissance (W) → ← Travail (J)
← Temps (s)

- ✗ La consommation d'une voiture n'est-elle pas donnée en litres/100 km ?
- ✗ L'EDF facture la consommation en kilo Watt-heure

5

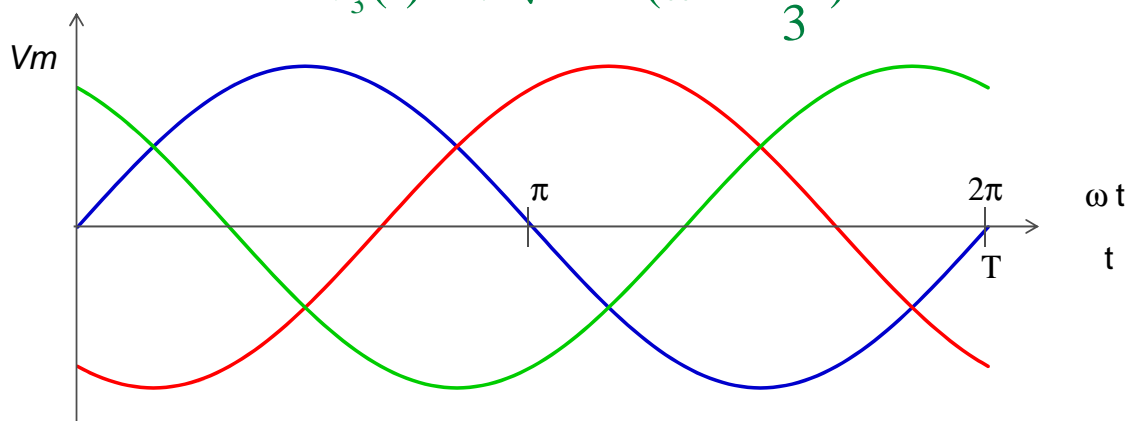
1.4. SYSTÈME TRIPHASÉ ÉQUILIBRÉ

- ✗ Un système triphasé équilibré est constitué de trois signaux tels que :

$$v_1(t) = V\sqrt{2} \sin(\omega t)$$

$$v_2(t) = V\sqrt{2} \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right)$$

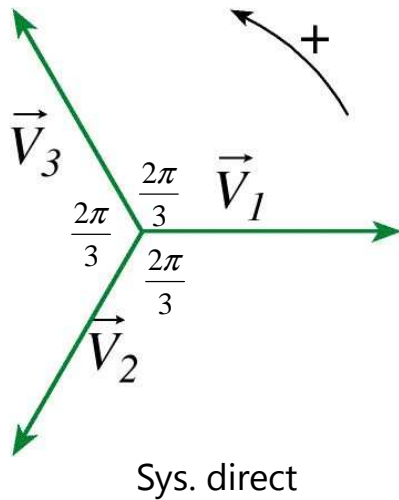
$$v_3(t) = V\sqrt{2} \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right)$$



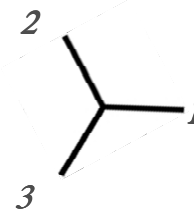
6

1.5. REPRÉSENTATION VECTORIELLE

* La représentation vectorielle est très pratique en triphasé :



$$\bar{V}_1 + \bar{V}_2 + \bar{V}_3 = 0$$

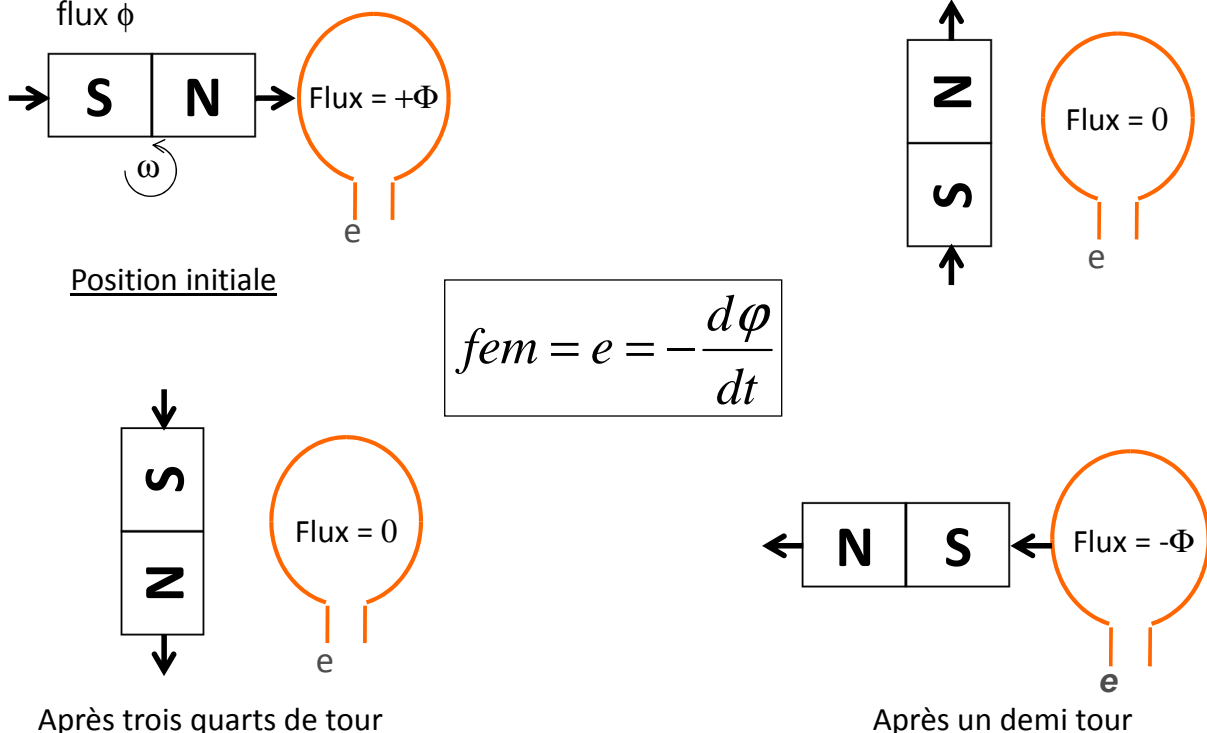


Sys. inverse

- * Le système est direct si les signaux se suivent dans l'ordre 1, 2, 3, 1, ...
- * Le système est inverse autrement.

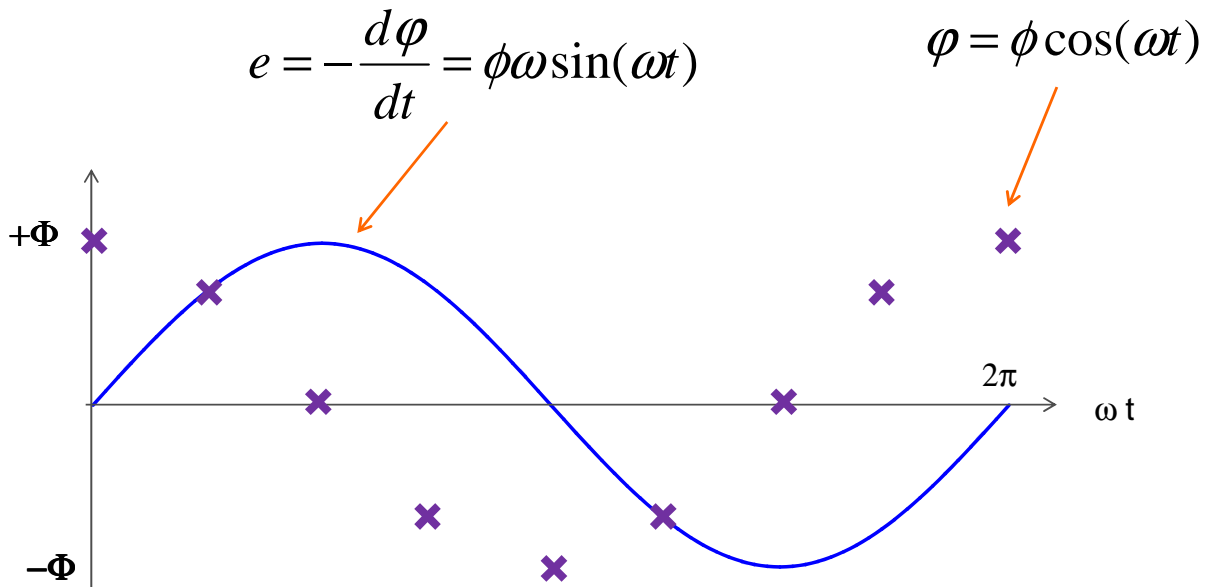
1.6.1. ALTERNATEUR MONOPHASÉ

* Une spire placée devant un aimant tournant à une vitesse ω , est traversée par un flux ϕ



1.6.2. TENSION INDUITE

- ✗ On s'arrange pour que le flux embrassé par la spire soit de forme sinusoïdale

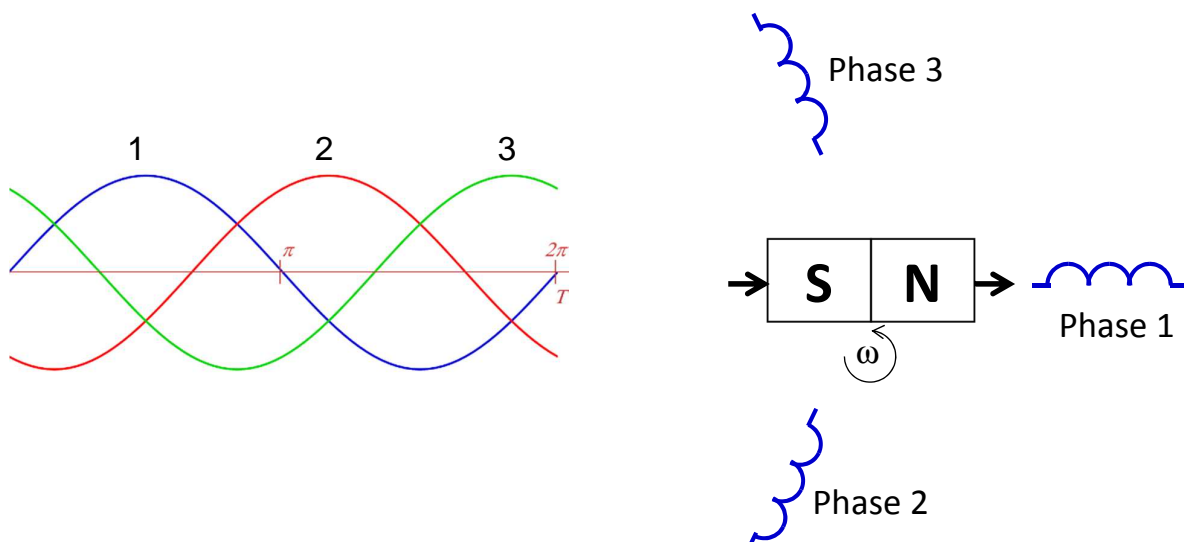


- ✗ avec N spires la tension induite : $e = N\phi\omega \sin(\omega t)$

9

1.7. ALTERNATEUR TRIPHASÉ

- ✗ Les alternateurs des centrales électriques sont triphasés.
- ✗ A puissance égale, l'alternateur triphasé coûte moins cher.
- ✗ La distribution sous forme triphasée occasionne moins de pertes.



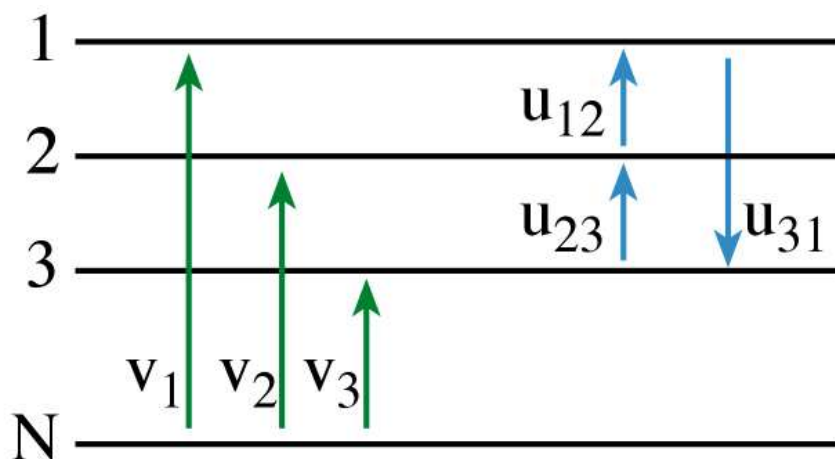
10



2. DISTRIBUTION ÉLECTRIQUE

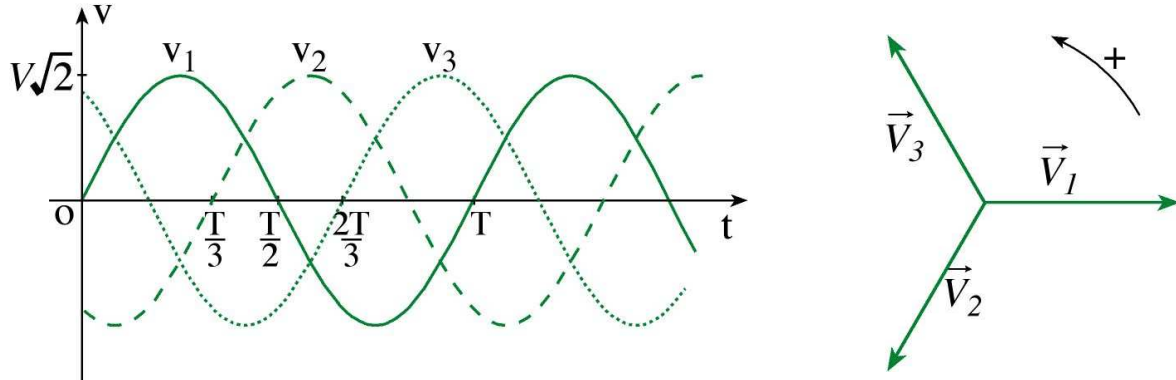
2.1. LIGNE ÉLECTRIQUE

- ✗ L'énergie électrique est transportée dans des câbles qui constituent la ligne.
- ✗ V_1 , V_2 et V_3 représentent les tensions simples.
- ✗ U_{12} , U_{23} et U_{31} s'appellent les tensions composées.



2.2. TENSIONS SIMPLES

- × Les trois tensions simples ont même valeur efficace V , et même fréquence.
- × V_1 , V_2 et V_3 forment un système triphasé équilibré.

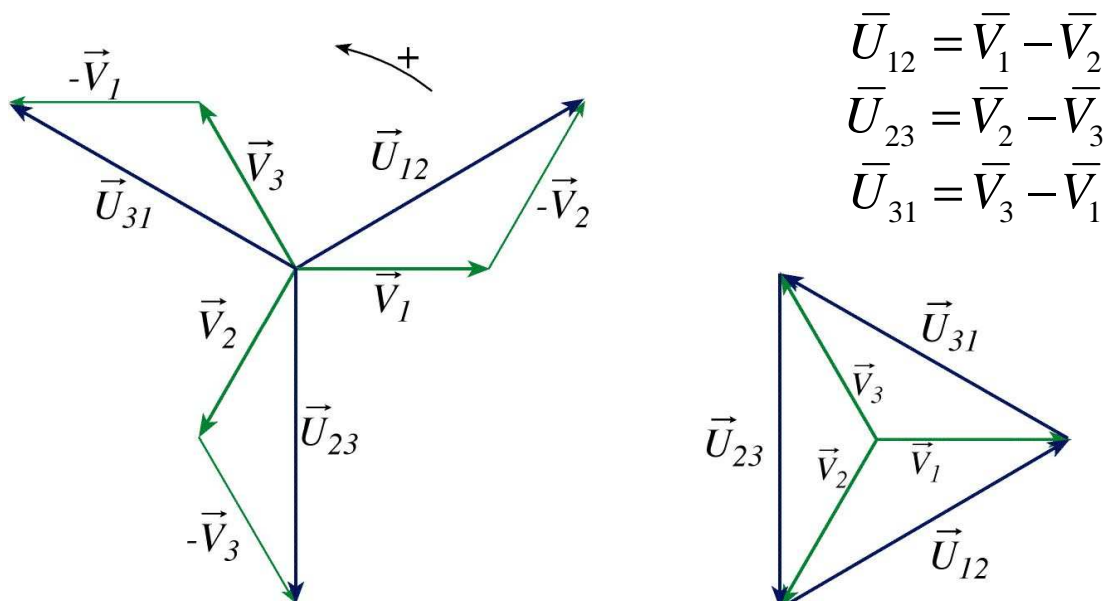


- × La somme vectorielle des tensions est nulle : $\vec{V}_1 + \vec{V}_2 + \vec{V}_3 = 0$

13

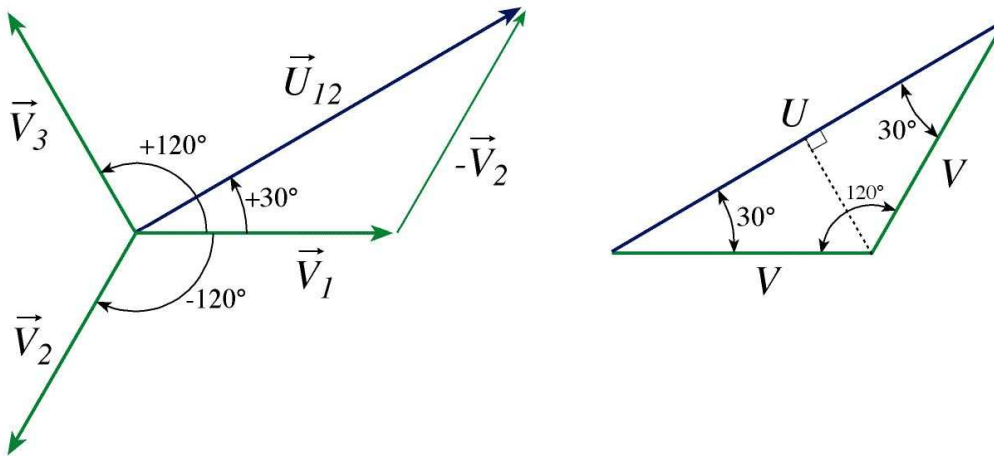
2.3. TENSIONS COMPOSÉES

- × Les trois tensions composées ont même valeur efficace U , et même fréquence.
- × U_{12} , U_{23} et U_{31} forment un système triphasé équilibré.



14

2.4. RELATION ENTRE U ET V

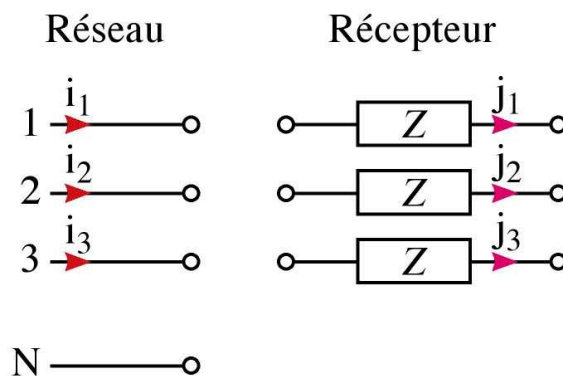


$$U = 2V \cos \frac{\pi}{6} = 2V \frac{\sqrt{3}}{2} \longrightarrow U = V\sqrt{3}$$

15

2.5. RÉCEPTEUR TRIPHASÉ ÉQUILIBRÉ

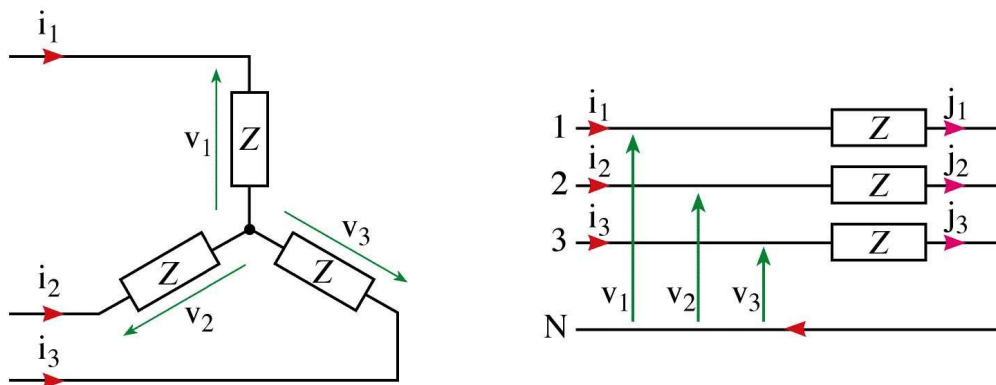
- ✗ Un récepteur triphasé équilibré est constitué de trois impédances identiques.
- ✗ Les impédances peuvent être couplées de plusieurs façons différentes.



- ✗ Les courants de ligne i circulent dans les câbles.
- ✗ Les courants simples j circulent dans les impédances.

16

2.6. COUPLAGE ÉTOILE



- ✗ Le premier schéma justifie le nom « ÉTOILE ».
- ✗ Le fil de neutre n'est pas nécessaire car :

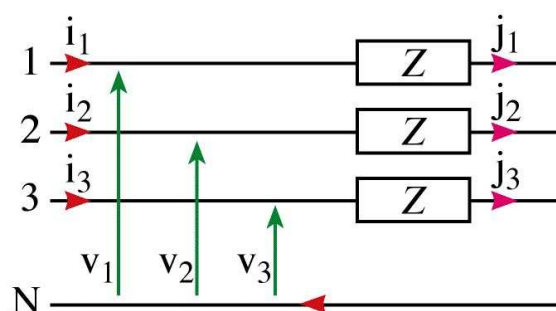
$$\bar{I}_N = \bar{I}_1 + \bar{I}_2 + \bar{I}_3 = \frac{\bar{V}_1 + \bar{V}_2 + \bar{V}_3}{\bar{Z}} = 0$$

- ✗ Chaque impédance est parcourue par un courant de ligne et voit à ses bornes une tension simple.

$$\bar{I} = \bar{J}$$

17

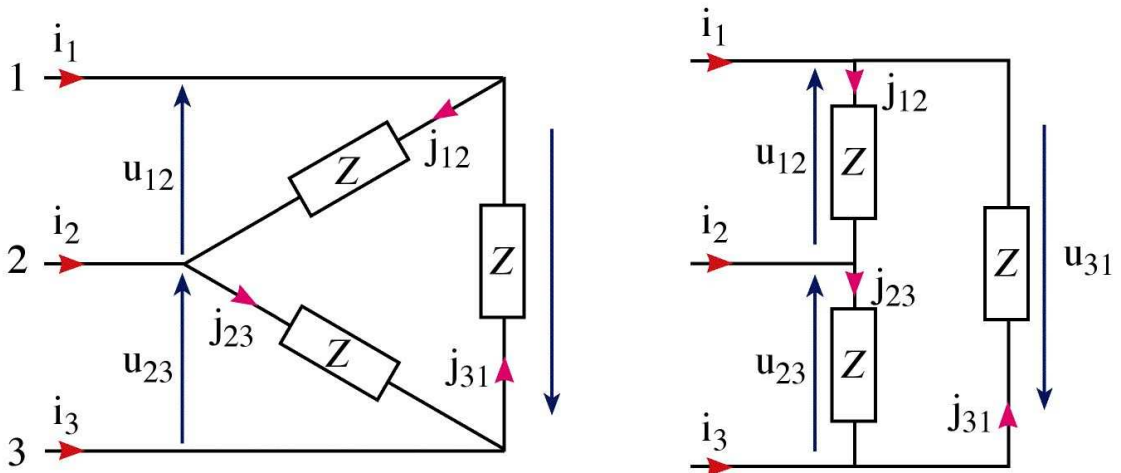
2.7. PUISSANCES EN ÉTOILE



- ✗ La puissance active consommée par une phase : $P = VI \cos \phi$
- ✗ Pour la charge entière : $P = 3VI \cos \phi = \sqrt{3}UI \cos \phi$
- ✗ La puissance réactive vaut : $Q = 3VI \sin \phi = \sqrt{3}UI \sin \phi$
- ✗ On en déduit : $S = 3VI = \sqrt{3}UI$
- ✗ Le facteur de puissance ne change pas : $f_p = \frac{P}{S} = \cos \phi$

18

2.8.1. COUPLAGE TRIANGLE



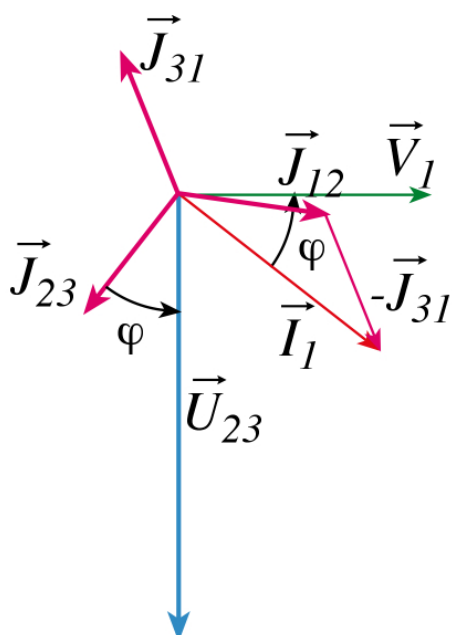
✗ Dans le couplage triangle, il n'y a pas de neutre !

$$\begin{aligned}
 \bar{I}_1 &= \bar{J}_{12} - \bar{J}_{31} \\
 \bar{I}_2 &= \bar{J}_{23} - \bar{J}_{12} \\
 \bar{I}_3 &= \bar{J}_{31} - \bar{J}_{23}
 \end{aligned}$$

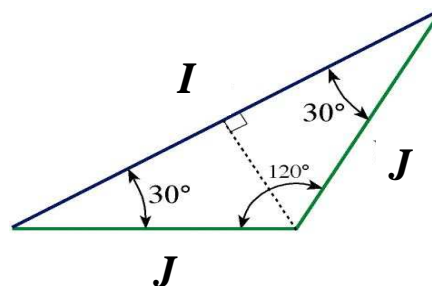
$$\begin{aligned}
 \bar{I}_1 + \bar{I}_2 + \bar{I}_3 &= 0 \\
 \bar{J}_{12} + \bar{J}_{23} + \bar{J}_{31} &= 0
 \end{aligned}$$

19

2.8.2. RELATION ENTRE I ET J



✗ Chaque impédance est parcourue par un courant J et voit à ses bornes une tension U.

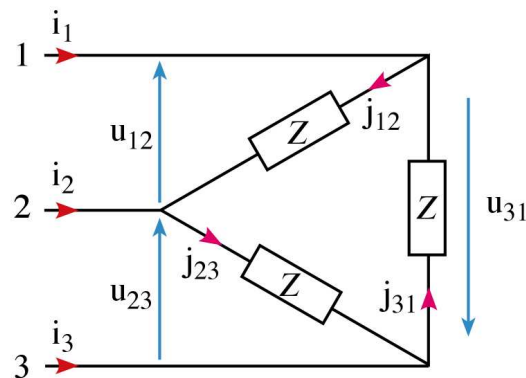


✗ On trouve une relation entre I et J similaire à celle qui lie la tension simple à la tension composée :

$$I = J\sqrt{3}$$

20

2.9. PUISSANCES EN TRIANGLE

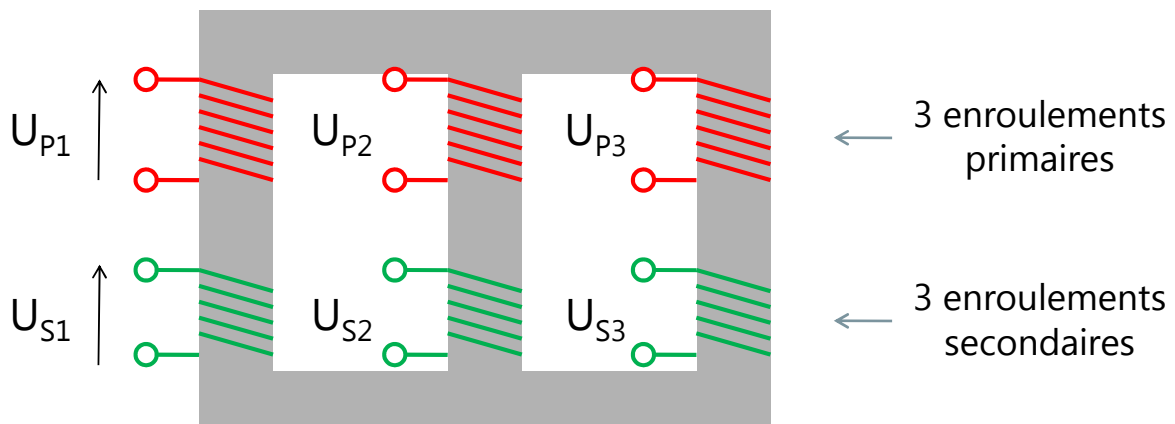


- ✗ La puissance active consommée par une phase : $P = UJ \cos \phi$
- ✗ Pour la charge entière : $P = 3UJ \cos \phi = \sqrt{3}UI \cos \phi$
- ✗ La puissance réactive vaut : $Q = 3UJ \sin \phi = \sqrt{3}UI \sin \phi$
- ✗ On en déduit : $S = 3UJ = \sqrt{3}UI$
- ✗ Le facteur de puissance ne change pas : $f_p = \frac{P}{S} = \cos \phi$

21

2.10.1. LE TRANSFORMATEUR TRIPHASÉ

- ✗ Il est équivalent à trois transformateurs monophasés. Le premier indice indique le côté primaire ou secondaire, le second indice est le numéro de phase.



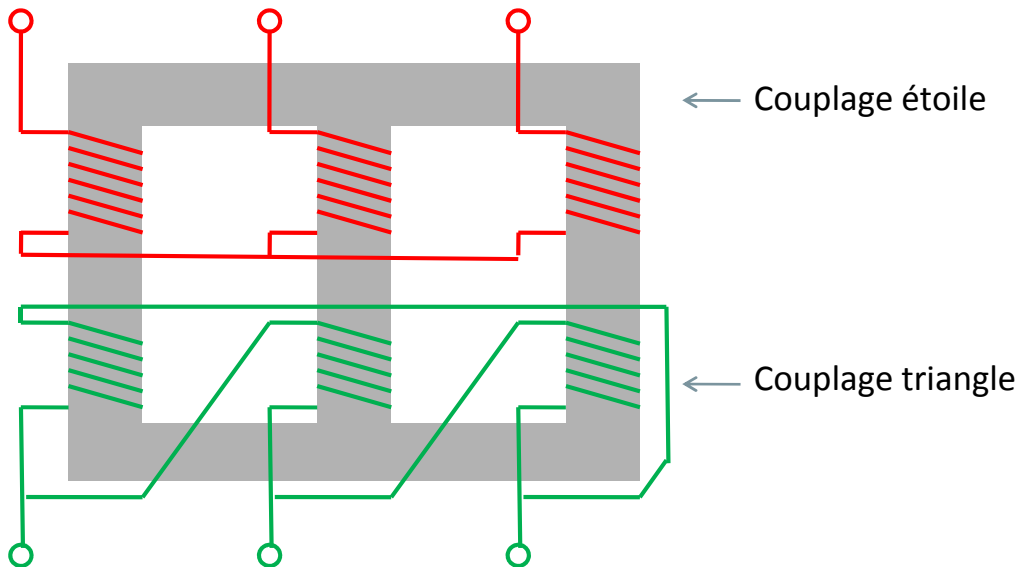
- ✗ Le rapport de transformation pour chaque phase vaut :

$$m = \frac{U_S}{U_P} = \frac{I_P}{I_S} = \frac{N_S}{N_P}$$

22

2.10.2. COUPLAGE DES ENROULEMENTS

- × Les enroulements, tant au primaire qu'au secondaire, peuvent être couplés de trois façons : étoile, triangle et zigzag.

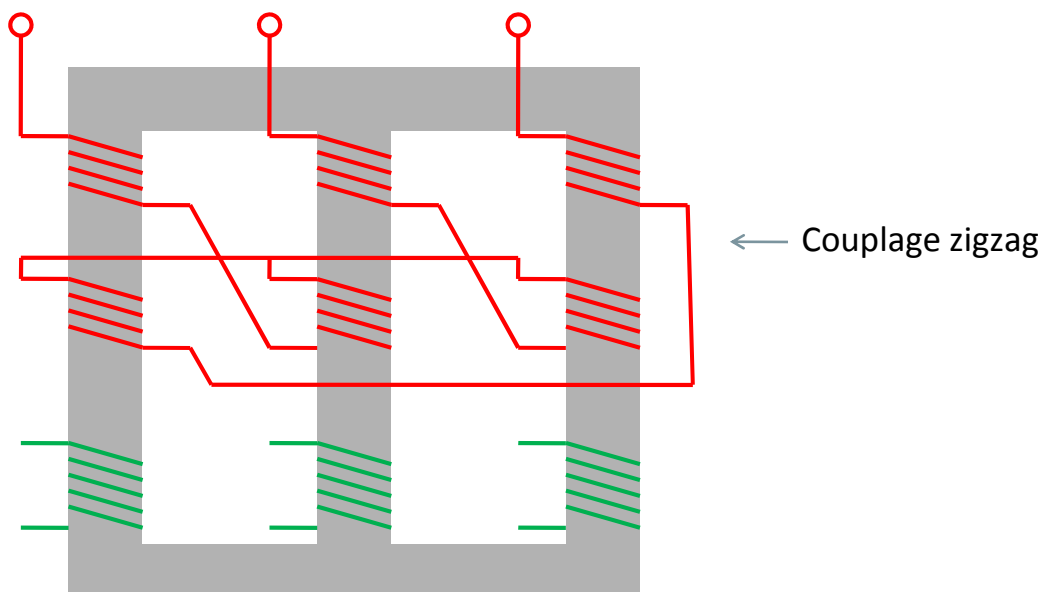


- × Exemple de primaire en étoile et secondaire en triangle

23

2.10.3. COUPLAGE ZIGZAG

- × Le couplage zigzag est obtenu en divisant les 3 bobines en 6. Chaque demi-bobine est mise en série avec une demi-bobine du noyau suivant.

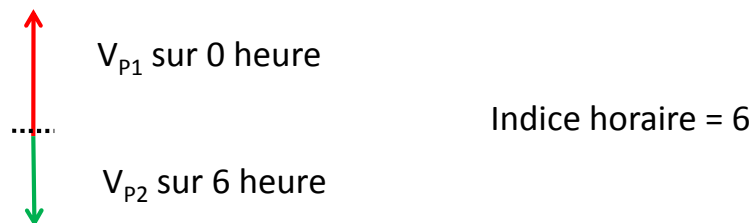


- × Le couplage zigzag permet de répartir le déséquilibre sur les 3 noyaux.

24

2.10.4. CHOIX DES COUPLAGES

- ✗ Il faut éviter d'avoir le même couplage au primaire et secondaire pour ne pas transmettre le déséquilibre d'un côté à l'autre.
- ✗ La présence d'un neutre en basse tension permet de disposer de deux niveaux de tensions.
- ✗ Du côté haute tension, un neutre mis à la terre est intéressant.
- ✗ On voit apparaître l'intérêt des couplage « ZY » et « YZ ».
- ✗ L'indice horaire d'un transformateur indique le déphasage (en multiple de $p/6$) entre une tension simple primaire et une tension simple secondaire.



25

2.11. THÉORÈME DE BOUCHEROT

- ✗ Dans une installation, la puissance active totale consommée est égale à la somme des puissances actives consommées par chaque élément :

$$P = \sum P_i$$

- ✗ Ceci est valable pour les puissances réactives :

$$Q = \sum Q_i$$

- ✗ Attention ! Ce théorème n'est pas applicable aux puissances apparentes.
- ✗ Pour calculer S_{totale} , il faut passer par P et Q .

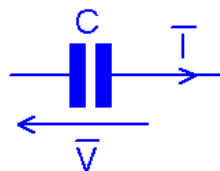
26

2.12.1. RELÈVEMENT DU FACTEUR DE PUISSANCE

✗ En sinusoïdal :
$$f_p = \frac{P}{S} = \frac{VI \cos \phi}{VI} = \cos \phi$$

✗ Les sociétés de production d'énergie électrique imposent aux usagers un facteur de puissance ($\cos \Phi > 0,93$) sous peine de leur facturer l'énergie réactive qui leur est inutile.

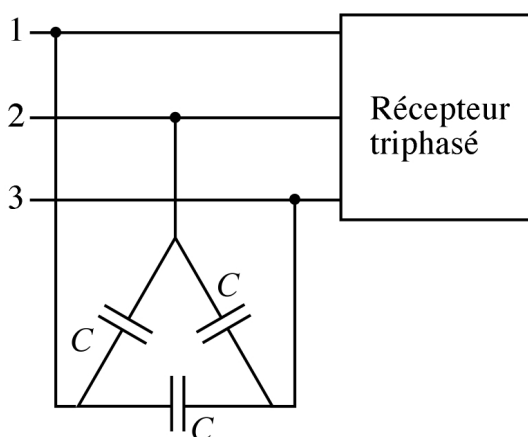
✗ Pour relever le facteur de puissance, on ajoute en parallèle des éléments qui fournissent de la puissance réactive; C'est le cas des condensateurs



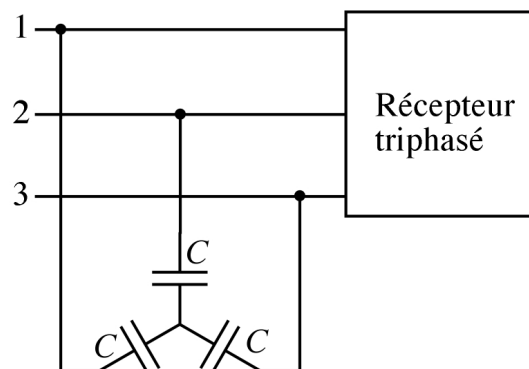
$$Q_C = -V^2 C \omega$$

27

2.12.2. BATTERIE DE CONDENSATEURS



$$Q_C = -3U^2 C \omega$$

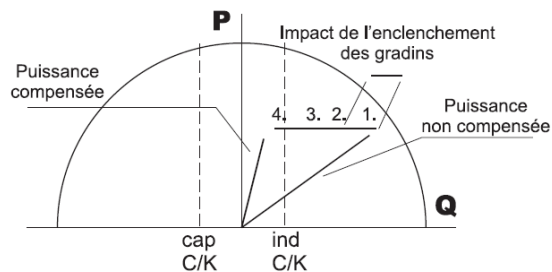


$$Q_C = -3V^2 C \omega$$

✗ Le couplage triangle est préférable car pour une même puissance, il nécessite des capacités trois fois plus faibles que celles du couplage étoile.

28

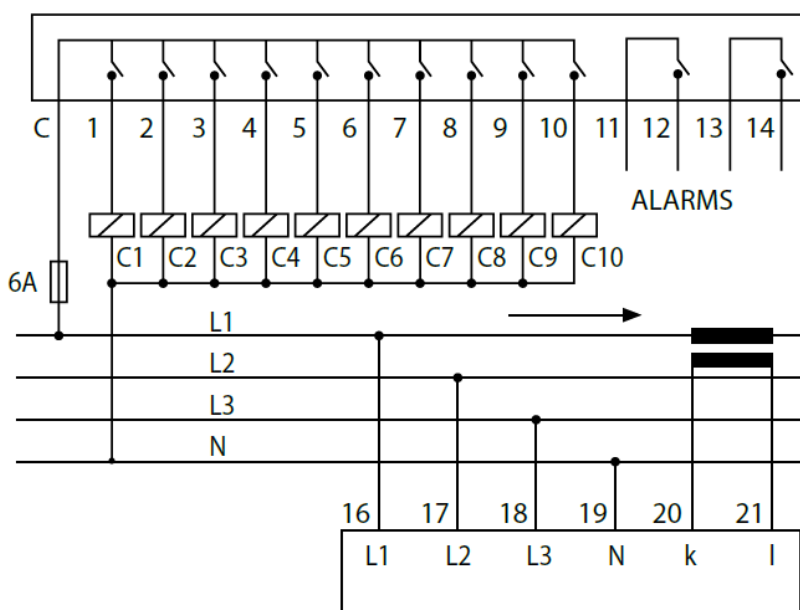
2.13.1. RÉGULATEUR DE PUISSANCE RÉACTIVE



- ✗ Le régulateur de puissance réactive calcule la puissance réactive nécessaire pour atteindre le facteur de puissance demandé.
- ✗ Des gradins de condensateurs sont connectés ou déconnectés en conséquence.

29

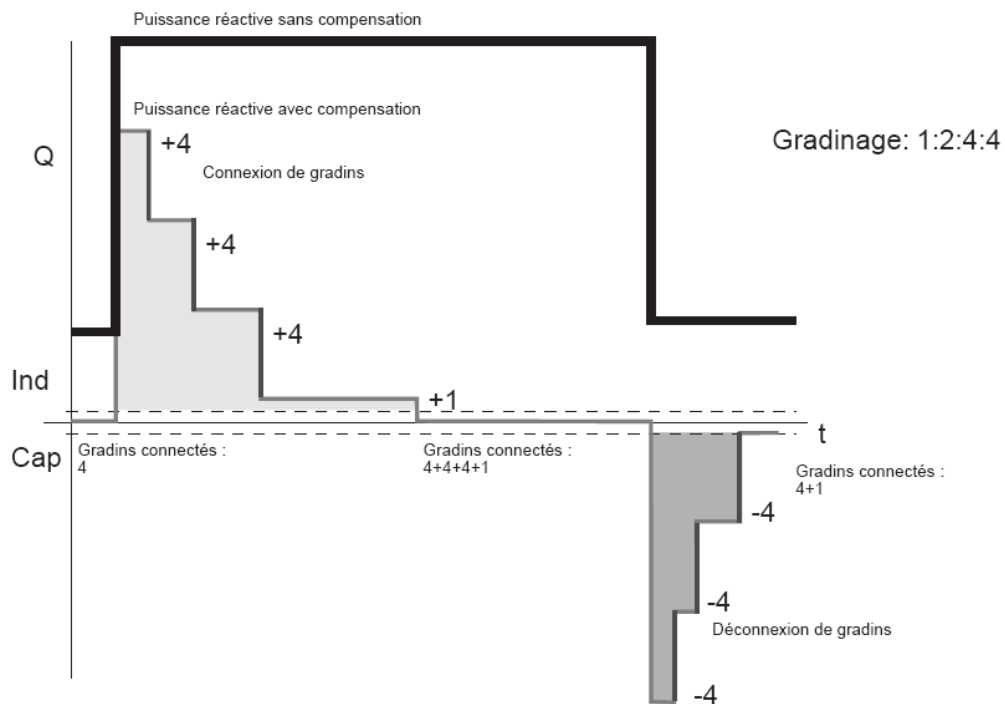
2.13.2. BRANCHEMENT DU RÉGULATEUR



- ✗ Le régulateur enclenche les contacteurs qui à leur tour mettent en circuit les gradins de condensateurs.

30

2.13.3. EXEMPLE DE RÉGULATION DE Q



TRANSPORT DISTRIBUTION

Ahmed AOUCHAR



L'École des INGÉNIEURS Scientifiques



1 - INTRODUCTION

1.1. NIVEAUX DE TENSION

| Tension alternative | Domaine de tension | Autre appellation courante | Valeurs usuelle en France |
|-----------------------|--------------------|--|----------------------------------|
| $\leq 50 V$ | TBT | | 12 – 24 – 48 V |
| $50 V < U \leq 500 V$ | BTA | BT (basse tension) | 230 – 380 – 400 V |
| $500 V < U \leq 1 kV$ | BTB | | |
| $1 < U \leq 50 kV$ | HTA | MT (moyenne tension) | 5,5 – 6,6 – 10 – 15 – 20 – 36 kV |
| $U > 50 kV$ | HTB | HT (haute tension) THT (très haute tension) | 63 – 90 – 150 – 225 – 400 kV |

✗ Les niveaux de tension sont définis par la norme NFC 15-100 et NFC 13-200

3

1.2. TENSION ÉCONOMIQUE DE TRANSPORT

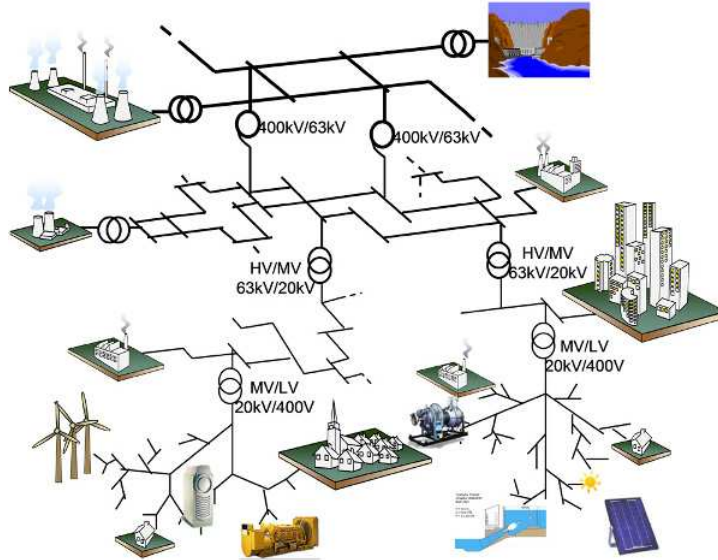
✗ Il existe pour chaque niveau de puissance distribuée une tension économique de transport

| tension d'alimentation | puissance de livraison | | | |
|------------------------|---|---------|-----------|-----------|
| | 0 | 250 kVA | 10000 kVA | 40000 kVA |
| BTA | [Bar chart showing range from 0 to 250 kVA] | | | |
| HTA | [Bar chart showing range from 250 kVA to 10000 kVA] | | | |
| HTB 63 kV ou 90 kV | [Bar chart showing range from 10000 kVA to 40000 kVA] | | | |
| HTB 225 kV | [Bar chart showing range from 40000 kVA to beyond] | | | |

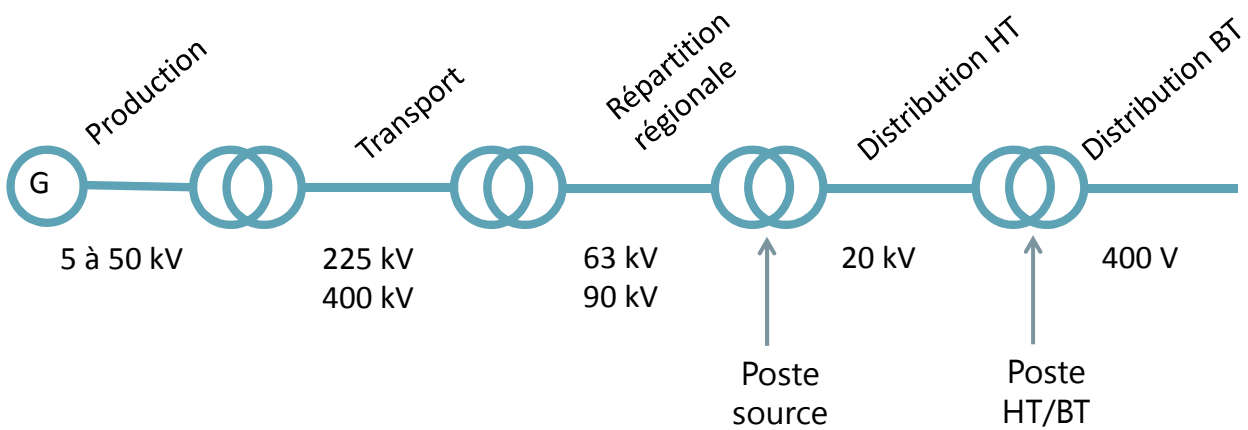
4

1.3. LE RÉSEAU ÉLECTRIQUE

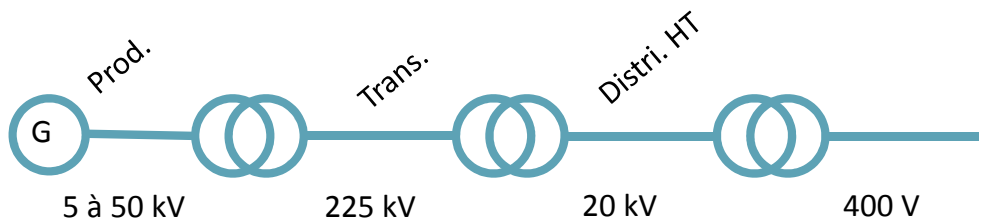
- Le réseau électrique est géré par 2 opérateurs : RTE gère le transport jusqu'aux lieux de consommation (HTB) , ENEDIS gère la distribution aux consommateurs (HTA & BT).



1.4. STRUCTURE DU RÉSEAU ÉLECTRIQUE

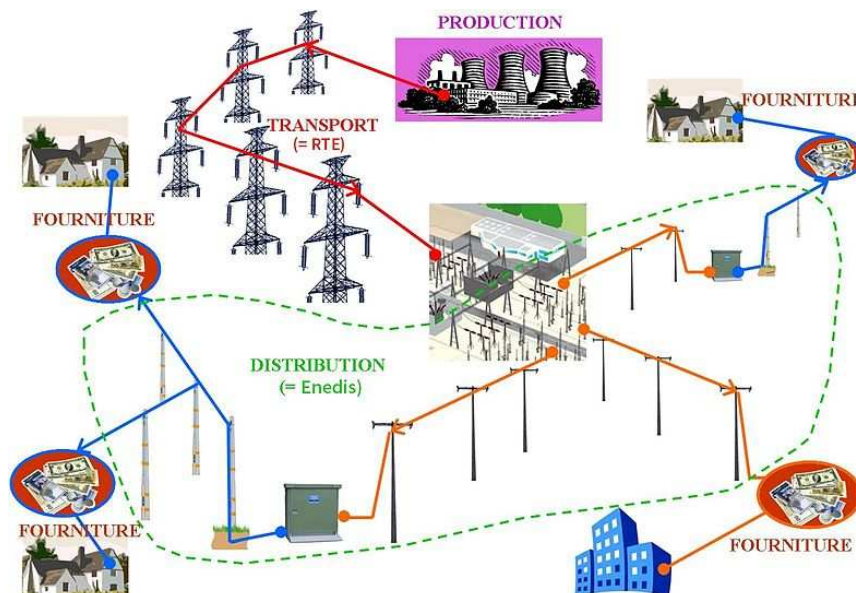


Cas des grandes agglomérations



1.5. TRANSPORT / DISTRIBUTION

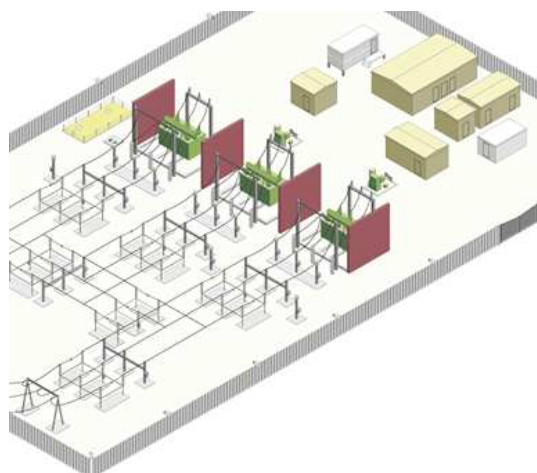
- ✗ Le transport de l'électricité se fait à des tensions supérieures ou égales à 50 kV alors que la distribution se fait à des tensions inférieures à 50 kV.
- ✗ Le réseau de distribution regroupe : les postes sources, le réseau HTA, les postes BT et le réseau BT. Des unités de production sont également raccordées sur le réseau HTA et BT.



7

1.6. LE POSTE SOURCE

- ✗ Les postes-sources sont à l'interface du réseau de transport et du réseau de distribution. Ils convertissent les tensions du réseau de transport (63, 90 ou 225 kV) en tension adaptée à la distribution (20 kV).



Le poste-source contribue :

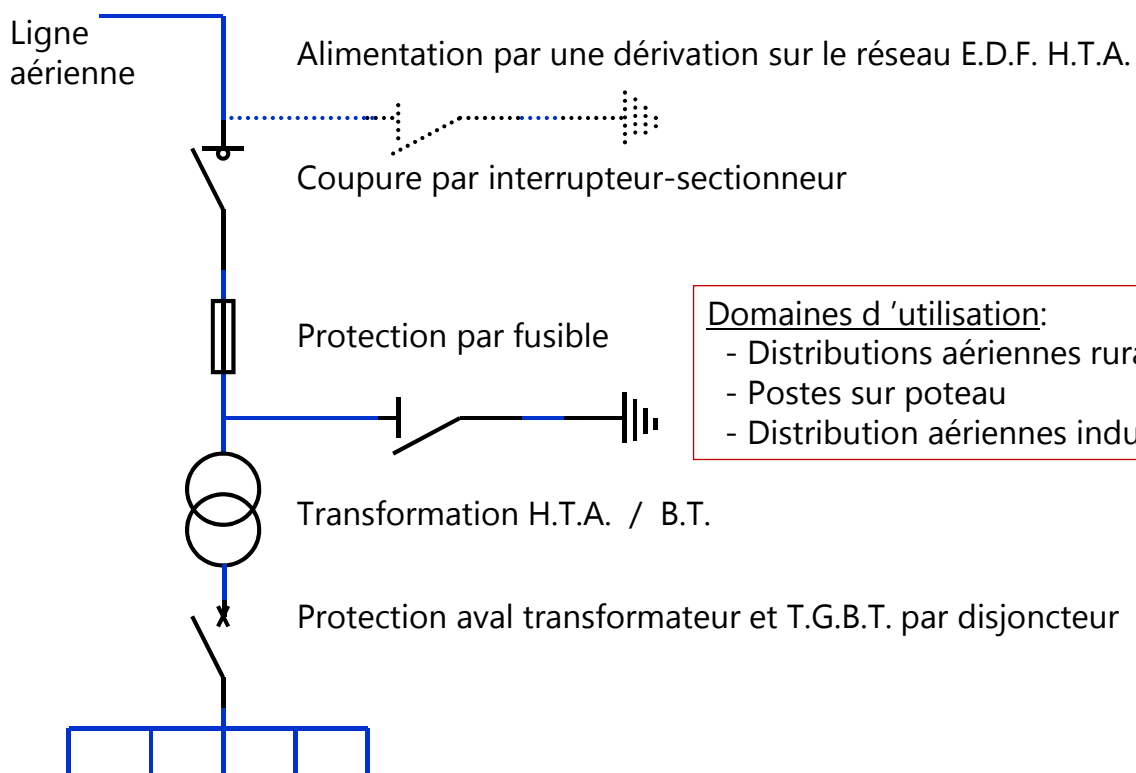
1. à la mesure des flux d'énergie (équipements de comptage d'énergie).
2. au changement tarifaire par la télécommande centralisée (175 Hz).
3. à la sûreté du réseau de transport par le système de délestage.
4. à la qualité et à la continuité de l'alimentation électrique par les systèmes de réenclenchement automatique, de réglage de la tension et de compensation du réactif.

8

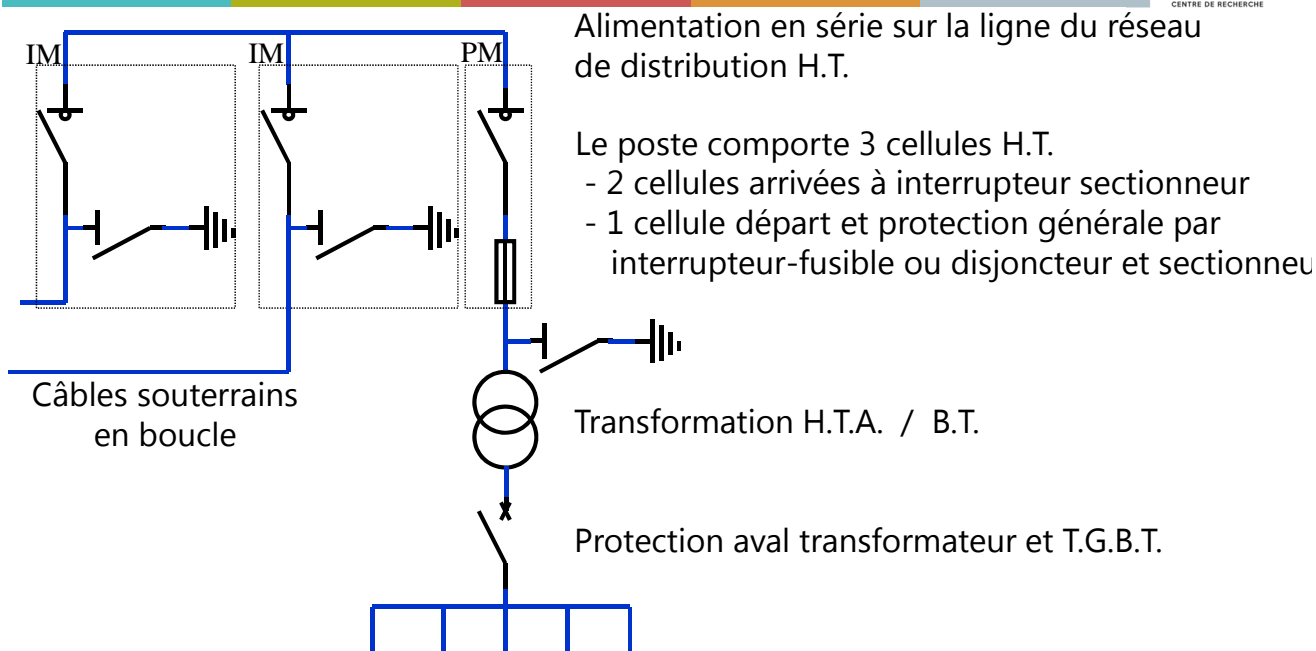


2. STRUCTURES DES RÉSEAUX HTA

2.1. STRUCTURE RADIALE (ANTENNE)



2.2. STRUCTURE À COUPURE D'ARTÈRE

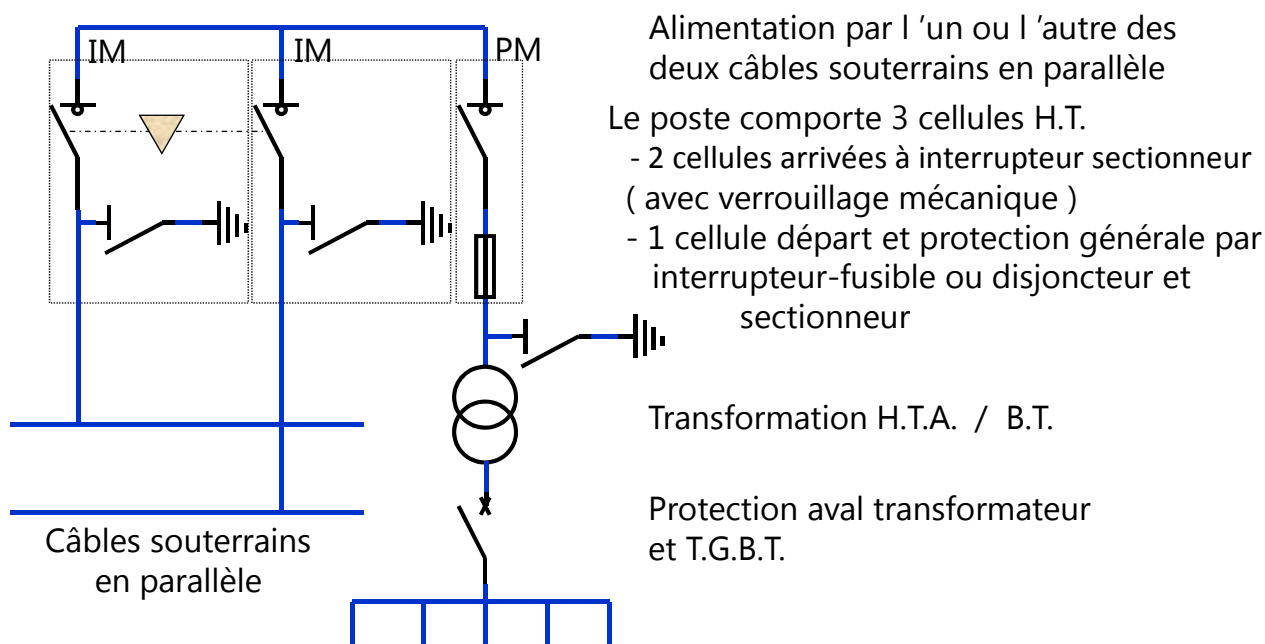


Domaines d'utilisation:

- Distributions souterraines en zone urbaine
- Réseaux H.T. d'activités tertiaires (enseignement, commerce, tourisme...)

11

2.3. STRUCTURE À DOUBLE DÉRIVATION

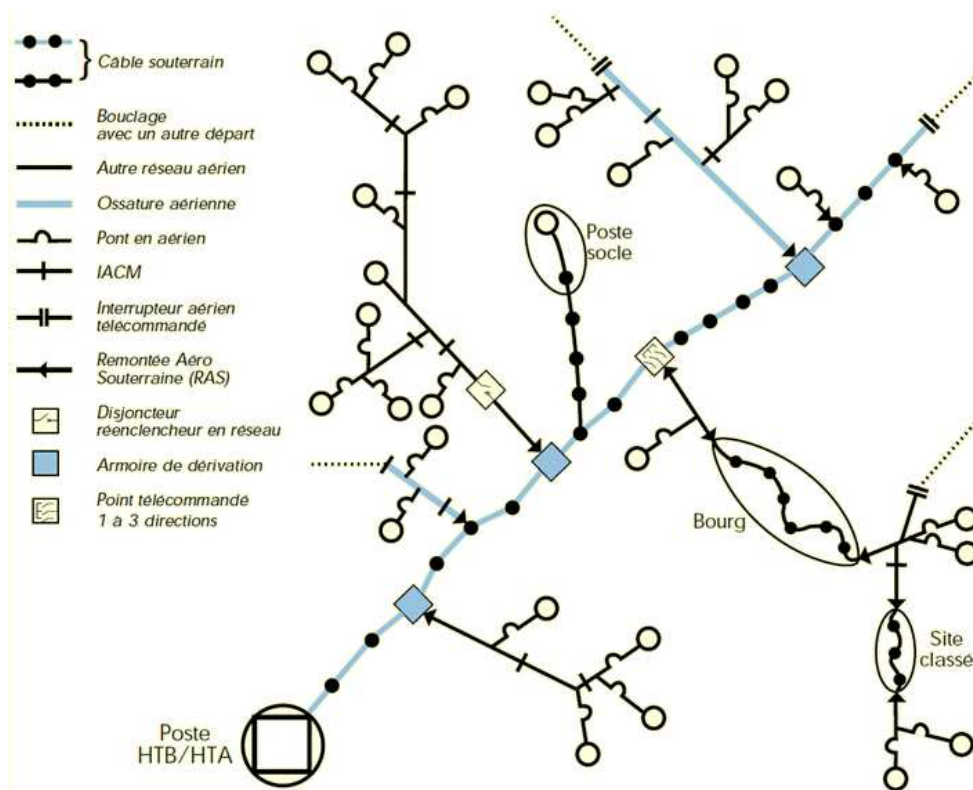


Domaines d'utilisation:

- Distributions souterraines
- Réseaux des villes à forte densité ou en extension

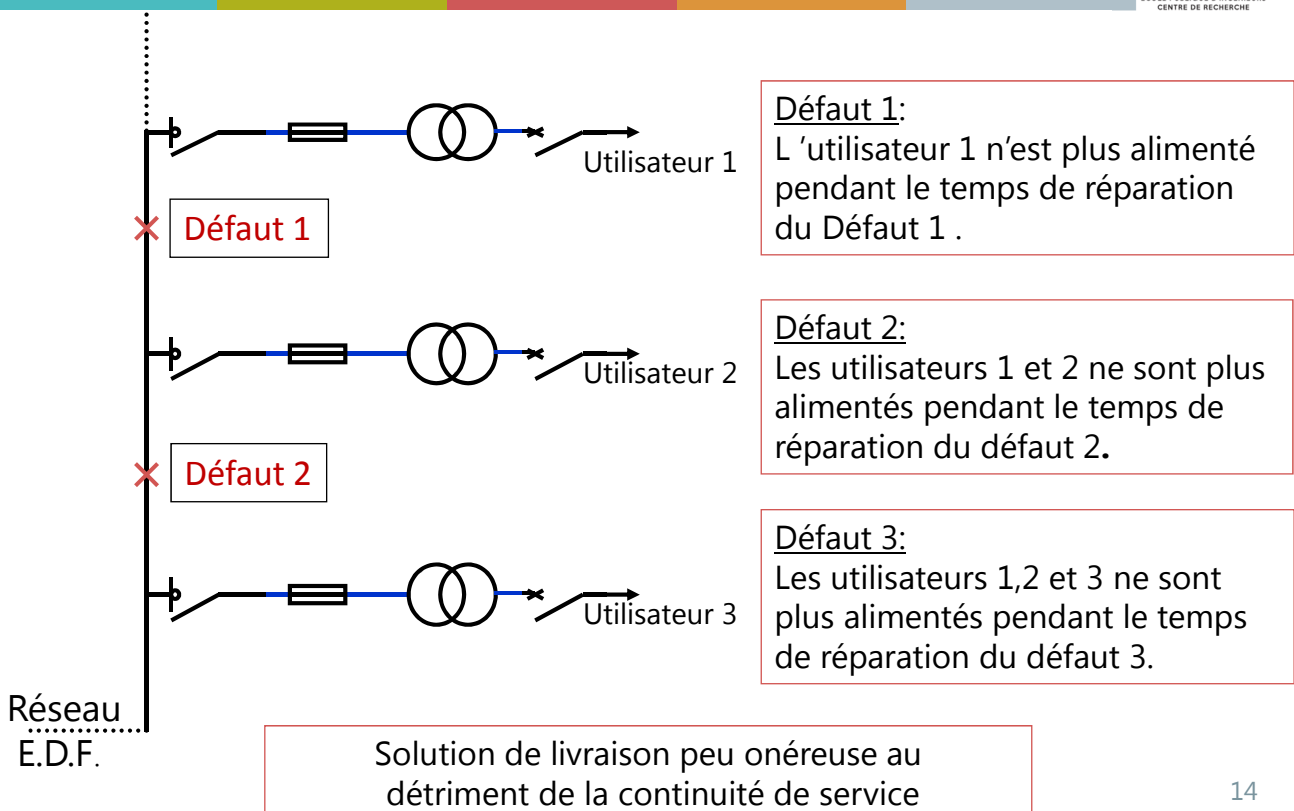
12

2.4. EXEMPLE D'UN RÉSEAU RURAL



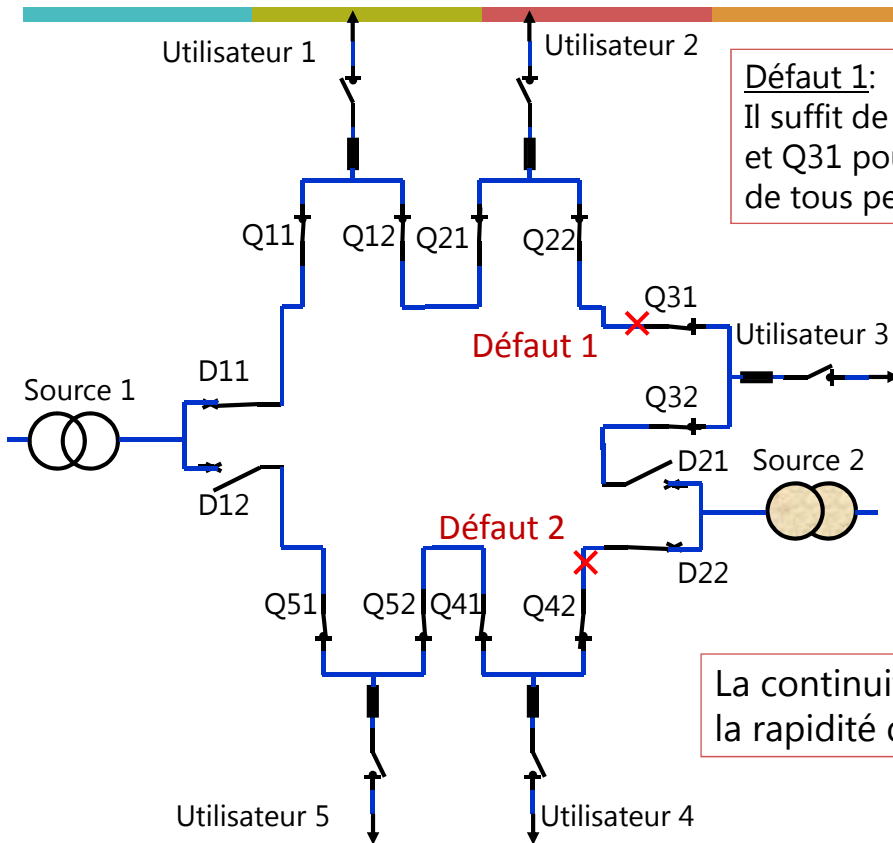
13

2.5. LIMITES DE LA LIVRAISON EN ANTENNE



14

2.6. LIVRAISON EN COUPURE D'ARTÈRE



Défaut 1:

Il suffit de fermer D21 et d'ouvrir Q22 et Q31 pour conserver l'alimentation de tous pendant le dépannage.

Défaut 2:

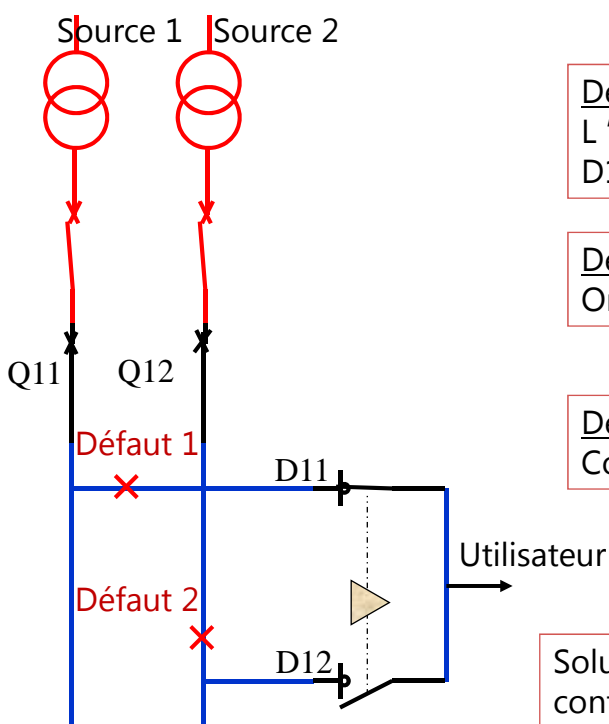
Fermer D12, ouvrir D22 et Q42 pour conserver l'alimentation de tous pendant le dépannage.

3 défauts:
arrêts obligatoire

La continuité de service dépend de la rapidité d'intervention d'E.D.F.

15

2.7. LIVRAISON EN DOUBLE DÉRIVATION



Défaut 1 seul:

L'utilisateur reste alimenté en fermant D12 et en ouvrant D11.

Défaut 2 seul:

On ferme D11 et on ouvre D12 et Q12

Défauts 1 et 2:

Coupe le temps de l'intervention

Solution de livraison permettant une continuité de service avec transfert de source automatique, mais très onéreuse

16



3. SECTION DES CÂBLES

3.1. ÉQUILIBRE THERMIQUE

- ✗ Lorsqu'un conducteur est parcouru par un courant électrique, il s'échauffe selon la loi de Joule

$$W = R \cdot I^2 \cdot t$$

avec : W = énergie en Joule
 R = résistance du câble
 i = intensité du courant
 t = temps

- ✗ Cette énergie électrique transformée intégralement en chaleur se dissipe dans le milieu ambiant par convection et conduction en passant à travers l'isolant jusqu'à ce que l'équilibre thermique soit atteint.
- ✗ Le tableau suivant donne les températures maximales de fonctionnement continu des conducteurs pour un type d'isolant donné. Il y a destruction au-delà.

| Type d'isolant | Température maximale (°C) |
|------------------------------|---------------------------|
| Polychlorure de vinyle (PVC) | 70 |
| Polyéthylène réticulé (PR) | 90 |
| Ethylène-Propylène (EPR) | 90 |

3.2. CONDITIONS INFLUENTES

Pour déterminer la section des conducteurs, plusieurs paramètres sont pris en compte

1. Le mode pose
2. La température ambiante
3. La nature de l'isolant
4. La nature de l'âme
5. L'influence mutuelle des conducteurs côte à côte
6. L'influence du type de conducteur : isolé, câble mono ou multiconducteurs



Câble monoconducteur (ou unipolaire) pour éclairage public



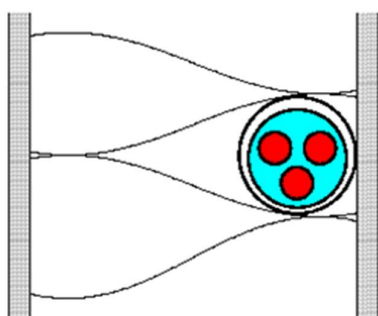
Câble multiconducteurs pour enrouleur



Conducteur isolé H 05 VK

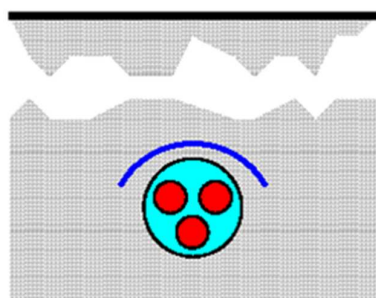
19

3.2.1. LE MODE DE POSE



Câbles multiconducteurs **encastrés dans des parois thermiquement isolantes** :

- Isolant : PR2 (2 conducteurs actifs)
- $T_{amb} = 30\text{ °C}$
- **Section : 2,5 mm²**
- $I = 20\text{ A}$



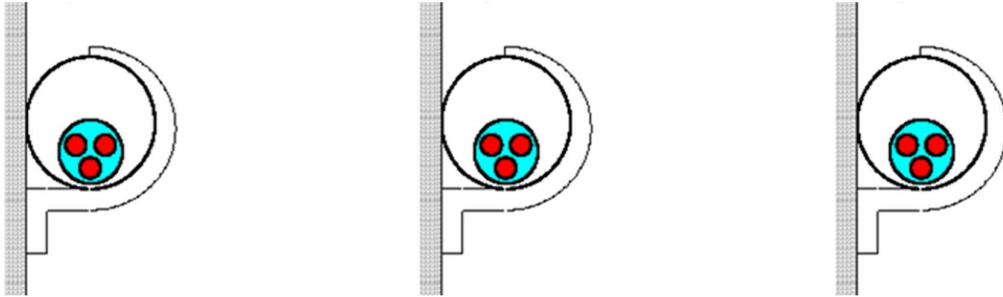
Câbles multiconducteurs **enterrés avec protection mécanique supplémentaire** :

- Isolant : PR2
- $T_{amb} = 30\text{ °C}$
- **Section : 1,5 mm²**
- $I = 20\text{ A}$

20

3.2.2. LA TEMPÉRATURE AMBIANTE

Câbles multiconducteurs dans des conduits en montage apparent :



- Isolant : PR2

• T_{amb} : 30 °C

• Section : 16 mm²

• I = 98 A

- Isolant : PR2

• T_{amb} : 40 °C

• Section : 25 mm²

• I = 98 A

- Isolant : PR2

• T_{amb} : 50 °C

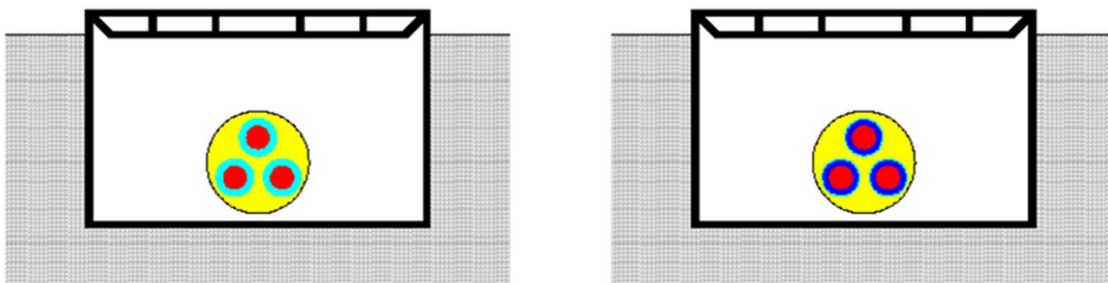
• Section : 35 mm²

• I = 98 A

21

3.2.3. LA NATURE DE L'ISOLANT

Câbles multiconducteurs dans des caniveaux ouverts ou ventilés:



- Isolant : PR3

• T_{amb} : 30 °C

• Section : 50 mm²

• I = 150 A

- Isolant : PVC3

• T_{amb} : 30 °C

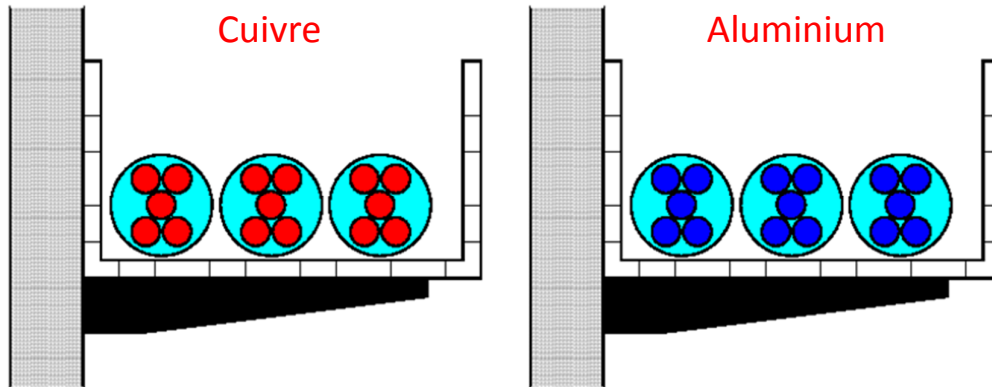
• Section : 70 mm²

• I = 150 A

22

3.2.4. LA NATURE DE L'ÂME

Câbles multiconducteurs sur des tablettes perforées en chemin horizontal ou vertical :



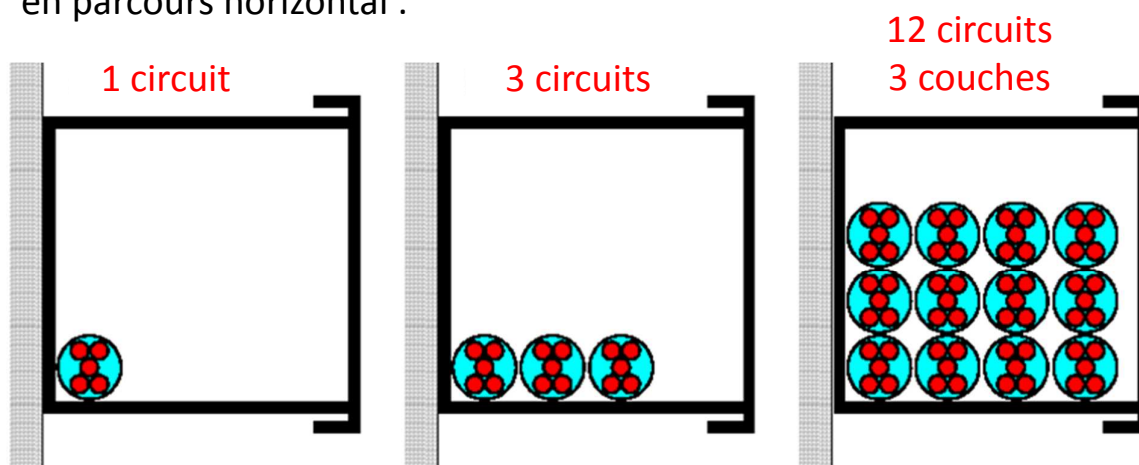
- Isolant : PVC3
- $T_{amb} : 30\text{ °C}$
- Section : 10 mm^2
- $I = 48\text{ A}$

- Isolant : PVC3
- $T_{amb} : 30\text{ °C}$
- Section : 16 mm^2
- $I = 48\text{ A}$

23

3.2.5. L'INFLUENCE MUTUELLE

Câbles multiconducteurs sur dans des goulottes fixées aux parois en parcours horizontal :



- Isolant : PVC3
- $T_{amb} : 30\text{ °C}$
- Section : 16 mm^2
- $I = 68\text{ A}$

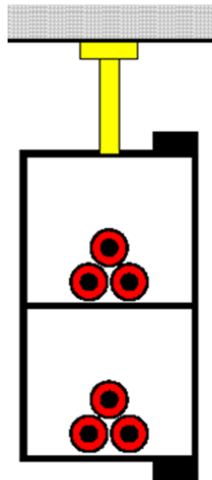
- Isolant : PVC3
- $T_{amb} : 30\text{ °C}$
- Section : 35 mm^2
- $I = 68\text{ A}$

- Isolant : PVC3
- $T_{amb} : 30\text{ °C}$
- Section : 120 mm^2
- $I = 68\text{ A}$

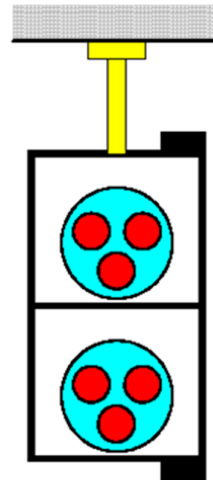
24

3.2.6. LE TYPE DE CONDUCTEUR

Conducteurs ou câbles dans des goulottes suspendues :



- Isolant : PR3
- $T_{amb} : 30\text{ °C}$
- Section : 35 mm^2
- $I = 150\text{ A}$



- Isolant : PR3
- $T_{amb} : 30\text{ °C}$
- Section : 50 mm^2
- $I = 150\text{ A}$

25

3.2.7. CALCUL PRATIQUE DE LA SECTION

- ✗ La section d'un conducteur dépend du courant d'emploi I_N (courant correspondant à la puissance nominale) et d'un coefficient $K = K1 \cdot K2 \cdot K3$
 - $K1$: dépend du mode de pose
 - $K2$: dépend du type de conducteur et de l'influence mutuelle
 - $K3$: dépend de la température et de l'isolant
- ✗ On calcule le courant fictif dans de câble avec cette formule :

$$I_F = \frac{I_N}{K}$$

- ✗ Ensuite, on se sert d'un tableau qui fournit la section minimale à choisir en fonction de l'âme (cuivre ou aluminium), du courant fictif et de la nature de l'isolant (ex : PR2=isolant PR + 2 conducteurs actifs, PR3=3 conducteurs actifs)

26

3.3. ÉCHAUFFEMENT DES CÂBLES

Courant de court-circuit admissible dans les câbles à isolant PE

| Tension assignée | 6/10 (12) kV | | | 8,7/15 (17,5) kV | | | 12/20 (24) kV | | | 18/30 (36) kV | | |
|--|--------------|------|------|------------------|------|------|---------------|------|------|---------------|------|------|
| | 0,5 s | 1 s | 2 s | 0,5 s | 1 s | 2 s | 0,5 s | 1 s | 2 s | 0,5 s | 1 s | 2 s |
| Section du conducteur mm ² | | | | | | | | | | | | |
| 16 | 800 | 650 | 490 | 1000 | 740 | 560 | 1200 | 870 | 660 | | | |
| 25 | 900 | 700 | 510 | 1000 | 750 | 570 | 1200 | 870 | 660 | | | |
| 35 | 1000 | 750 | 540 | 1100 | 800 | 600 | 1200 | 880 | 660 | | | |
| 50 | 1100 | 800 | 580 | 1150 | 840 | 640 | 1250 | 1000 | 770 | 1750 | 1300 | 990 |
| 70 | 1300 | 920 | 700 | 1350 | 990 | 760 | 1450 | 1100 | 820 | 1750 | 1300 | 1000 |
| 95 | 1350 | 1000 | 750 | 1450 | 1050 | 820 | 1550 | 1150 | 880 | 2050 | 1550 | 1200 |
| 120 | 1450 | 1050 | 800 | 1500 | 1150 | 860 | 1650 | 1200 | 930 | 2150 | 1650 | 1230 |
| 150 | 1550 | 1100 | 840 | 1600 | 1200 | 910 | 1700 | 1300 | 1000 | 2250 | 1700 | 1300 |
| 185 | 1650 | 1150 | 900 | 1700 | 1250 | 970 | 2000 | 1500 | 1200 | 2350 | 1800 | 1400 |
| 240 | 1800 | 1450 | 1100 | 2000 | 1550 | 1200 | 2150 | 1650 | 1250 | 2650 | 2050 | 1600 |
| 300 | 2000 | 1550 | 1200 | 2150 | 1650 | 1300 | 2300 | 1750 | 1350 | 2800 | 2150 | 1700 |
| 400 | 2300 | 1750 | 1400 | 2600 | 2000 | 1550 | 2650 | 2050 | 1600 | 3000 | 2300 | 1800 |
| 500 | 2550 | 1900 | 1500 | 2900 | 2200 | 1750 | 3050 | 2350 | 1850 | 3400 | 2600 | 2050 |
| 630 | 2750 | 2050 | 1550 | 3000 | 2300 | 1800 | 3150 | 2400 | 1900 | 3500 | 2650 | 2050 |
| 800 | 3000 | 2250 | 1700 | 3300 | 2500 | 2000 | 3450 | 2600 | 2100 | 3700 | 2800 | 2200 |
| 1000 | 3300 | 2400 | 1800 | 3500 | 2700 | 2100 | 3650 | 2800 | 2200 | 3950 | 3000 | 2400 |
| 1200 | 3550 | 2550 | 1900 | 3700 | 2850 | 2200 | 3850 | 2950 | 2300 | 4200 | 3200 | 2550 |
| 1400 | 3650 | 2750 | 2000 | 3900 | 3000 | 2350 | 4050 | 3100 | 2450 | 4350 | 3350 | 2650 |
| 1600 | 3750 | 2850 | 2100 | 4000 | 3100 | 2400 | 4150 | 3200 | 2500 | 4500 | 3400 | 2700 |

L'élément de coupure, placé en amont, doit réagir avant que la température du câble n'ait atteint une valeur dangereuse

$$\sqrt{t} = \frac{k.S}{I_{CC}}$$

- t = temps en secondes
- S = section en mm²
- I_{CC} = courant de court-circuit

k = 115 pour le cuivre

K = 74 pour l'aluminium

Exercice : déduire du tableau la section pour un réseau U=10kV , I_{cc}=1000A, t=0,5s

27



3. ÉLÉMENTS TYPES DU RÉSEAU

3.1. INTERRUPTEUR MANUEL

- ✘ L'Interrupteur Aérien à Coupure Manuelle (IACM) permet au chargé de consignation d'ouvrir et de consigner des tronçons du réseau HTA.



29

3.2. INTERRUPTEUR À CREUX DE TENSION

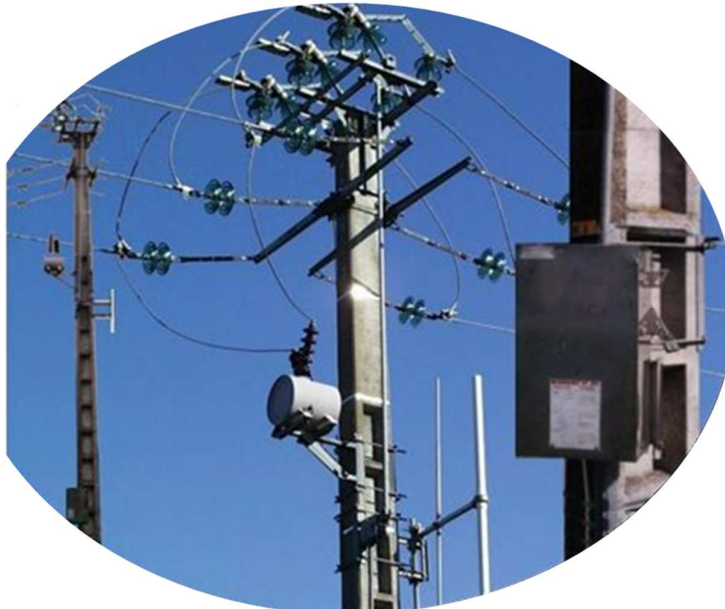
- ✘ L'Interrupteur Aérien à Creux de Tension (IACR) permet également une commande manuelle mais s'ouvre aussi lors d'un défaut sur la ligne HTA.



30

3.3. INTERRUPTEUR TÉLÉCOMMANDÉ

- ✘ L'Interrupteur Aérien Télécommandé (IAT) outre la commande manuelle ce dernier peut être ouvert ou fermé à distance. Il est identifiable par son antenne de réception hertzienne et son petit transformateur alimentant les organes de commande.



31

3.4. INTERRUPTEUR MSS

- ✘ L'appellation MSS fait référence aux trois constructeurs de cet appareil (Merlin Soulé Simplex). Le MSS remplit les mêmes fonctions qu'un IAT mais cette fois l'interrupteur est réalisé dans une cellule située en tête de poteau.



32

3.5. LES ISOLATEURS

- ✘ Les isolateurs assurent la non conductivité entre l'armement et le câble. En première approximation on peut dire qu'une galette permet d'isoler une tension de 20000 V.



33

3.6. L'ÉCLATEUR

- ✘ L'éclateur évite l'amorçage de l'arc entre l'armement et la ligne en cas de surtension. La plaque au milieu empêche les oiseaux de se poser entre les deux parties de l'éclateur. Les éclateurs sont progressivement remplacé par des parafoudres.



34

3.7. LE PARAFOUDRE

- ✘ Les parafoudres sont constitués de sélénium. En cas de surtension, ils jouent le rôle d'une diode ayant pour tension de seuil 30 000V et reliant directement la ligne à la terre. La foudre provoque une tension de 750 000V.



35

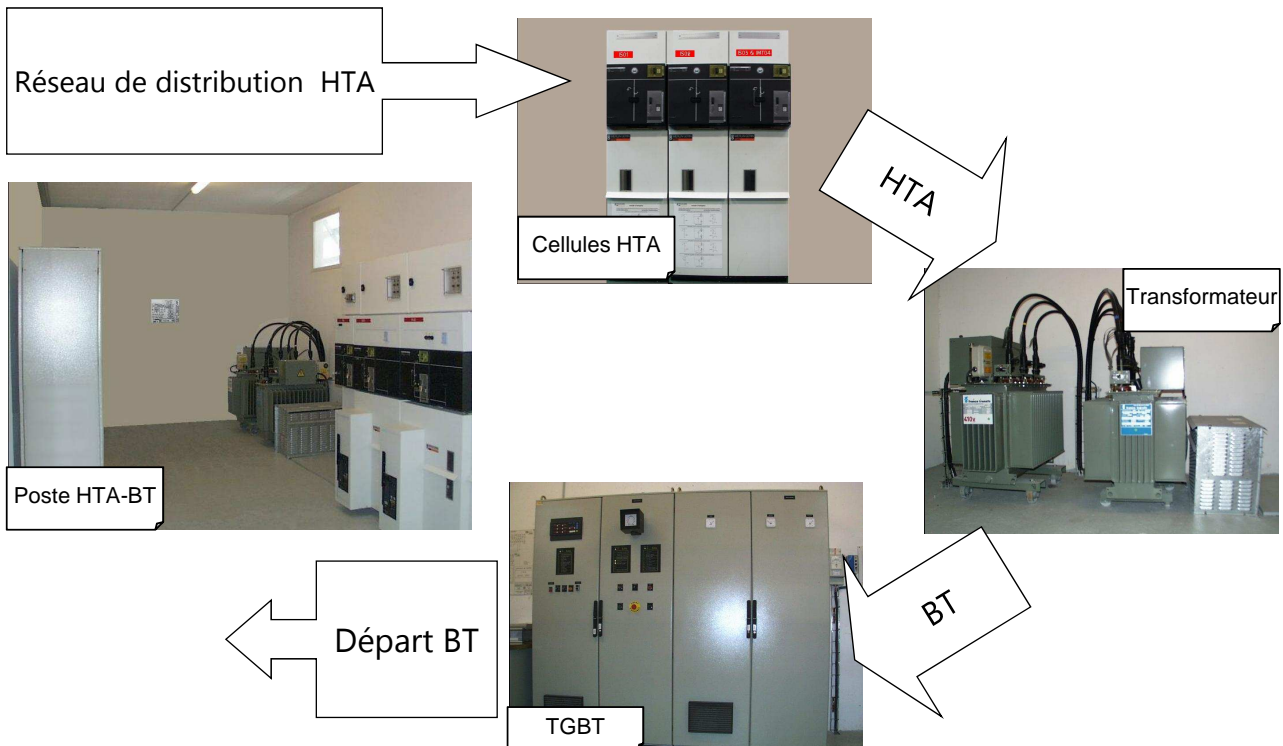
3.8. LE SECTIONNEUR

- ✘ Les sectionneurs orientent l'électricité vers le transformateur désiré. Un moteur télécommandé permet de fermer ou d'ouvrir l'interrupteur.
- ✘ Le sectionneur est capable de couper uniquement à vide et a pour fonction d'isoler les parties amont et aval.



36

3.9. POSTE HTA - BT



37

3.10. LES CELLULES HTA

- ✘ Les cellules sont des composants basiques tel que l'interrupteur, le compteur ou le disjoncteur adapté à la HT. Si leur rôle est identique qu'en BT leur encombrement, leur coût et leur technologie sont différents.



38

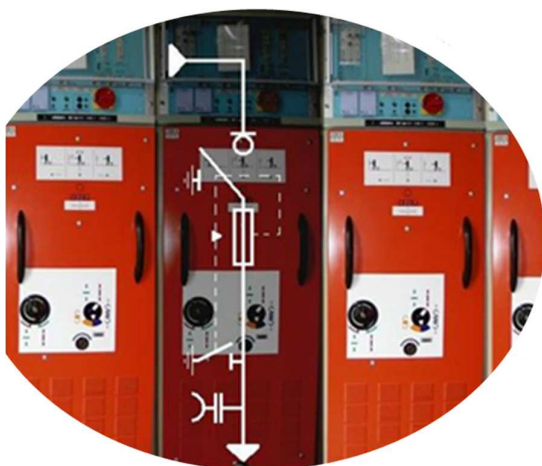
LES CELLULES HTA

- ✗ Le nombre et le type de cellules dans un poste dépendent du type de réseau, de la réalisation (ou non) d'un comptage et du nombre de protections nécessaires à l'installation. Chaque cellule réalise une partie du schéma. Il existe une grande variété de cellules.

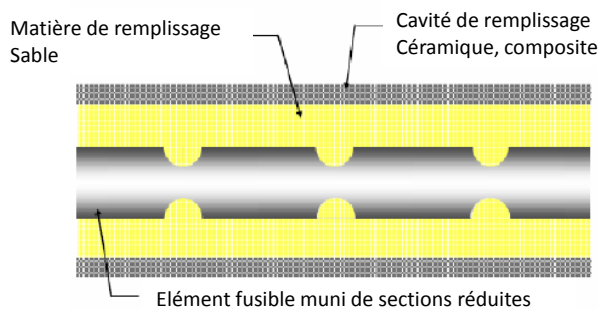


LES CELLULES HTA

On trouve également des cellules combinant interrupteur, sectionneur et fusible.



Fusible pour cellule
 $U_n=24\text{kV}$ et $I_n=16\text{A}$
 (Protège le transformateur)



3.11. L'ARMOIRE TGBT

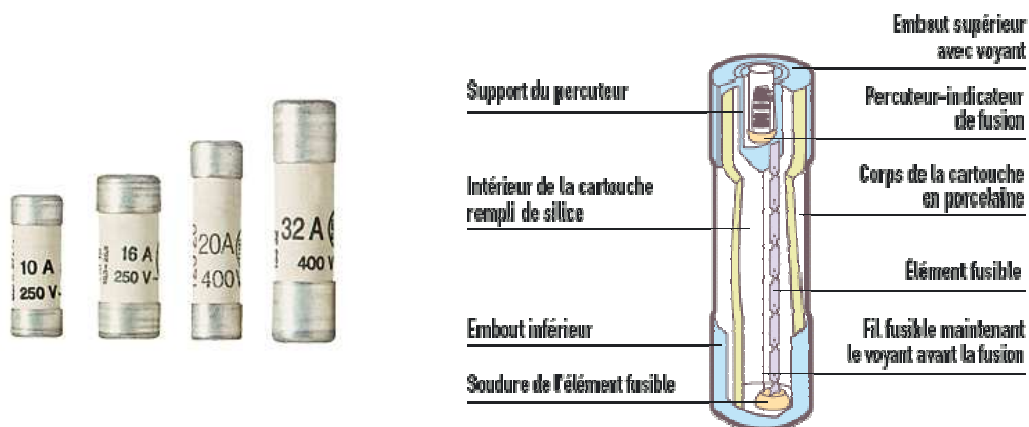
- ✗ L'armoire de distribution de type TGBT (Tableau Général Basse Tension) assure la fonction de distribution et de gestion d'énergie. Le TGBT est représenté par un système de coffrets et d'armoires. Ces coffrets et armoires sont entièrement composables.
- ✗ On y trouve les organes de protection, les appareils de mesure et de supervision ainsi que des modules de commande, de communication, etc.



41

3.12.1. LE FUSIBLE

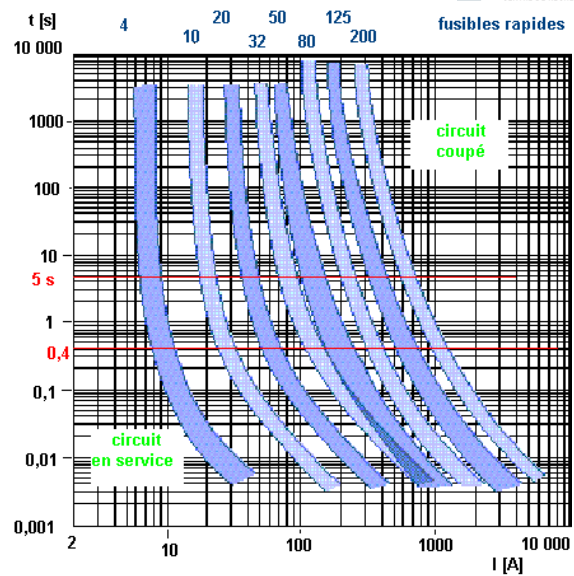
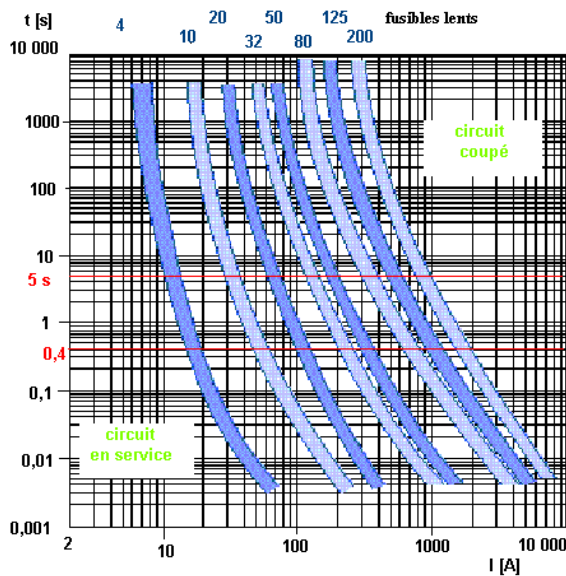
- ✗ Le fusible protège contre le court-circuit, il protège les biens et dans certains cas les personnes.



- ✗ Le fusible est de plus en plus remplacé par le disjoncteur qui est plus efficace.

42

3.12.2. FUSIBLES RAPIDES OU LENTS

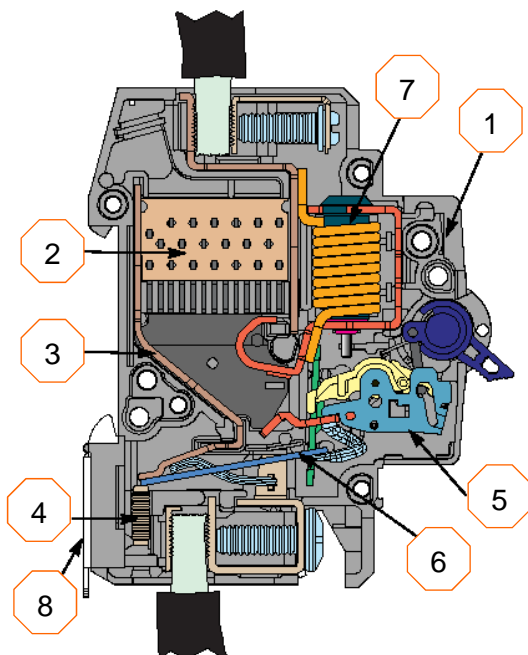


- ✗ Les fusibles lents sont utilisés pour des charges inductives, cas des moteurs et des transformateurs
- ✗ Les rapides sont utilisés pour les équipements qui ne supportent pas les surcharges passagères (matériel informatique)

43

3.13. LE DISJONCTEUR MAGNÉTO-THERMIQUE

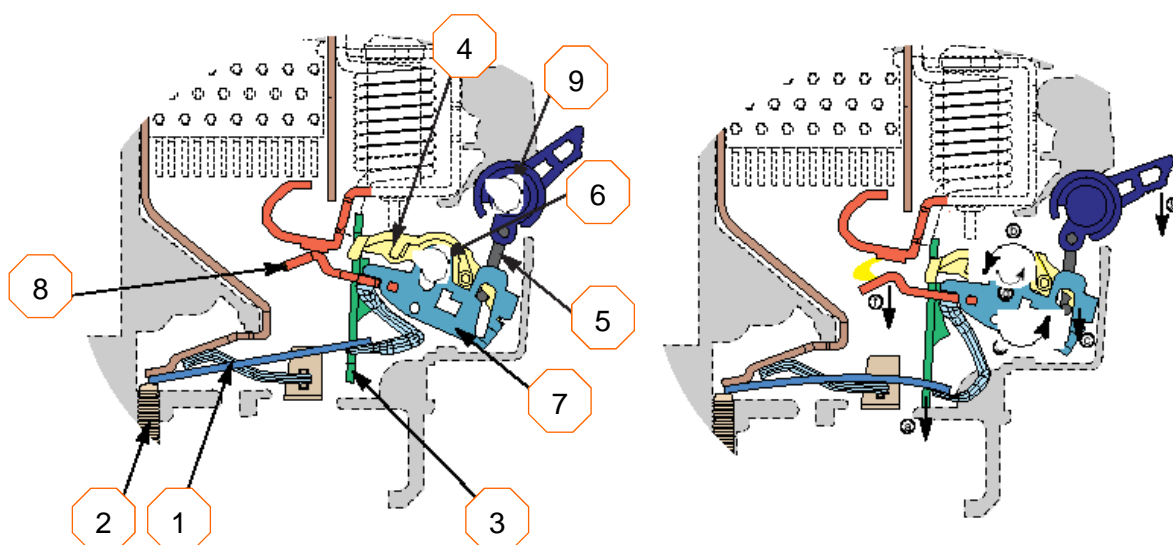
- ✗ Comme le fusible, le disjoncteur protège contre le court-circuit, il protège les biens et dans certains cas les personnes. Le disjoncteur est toutefois plus rapide.



1. Coquille
2. Chambre de coupure
3. Tôle d'arc
4. Vis de réglage
5. Sous-ensemble serrure
6. Sous-ensemble thermique
7. Sous-ensemble magnétique
8. Ressort et loquet

44

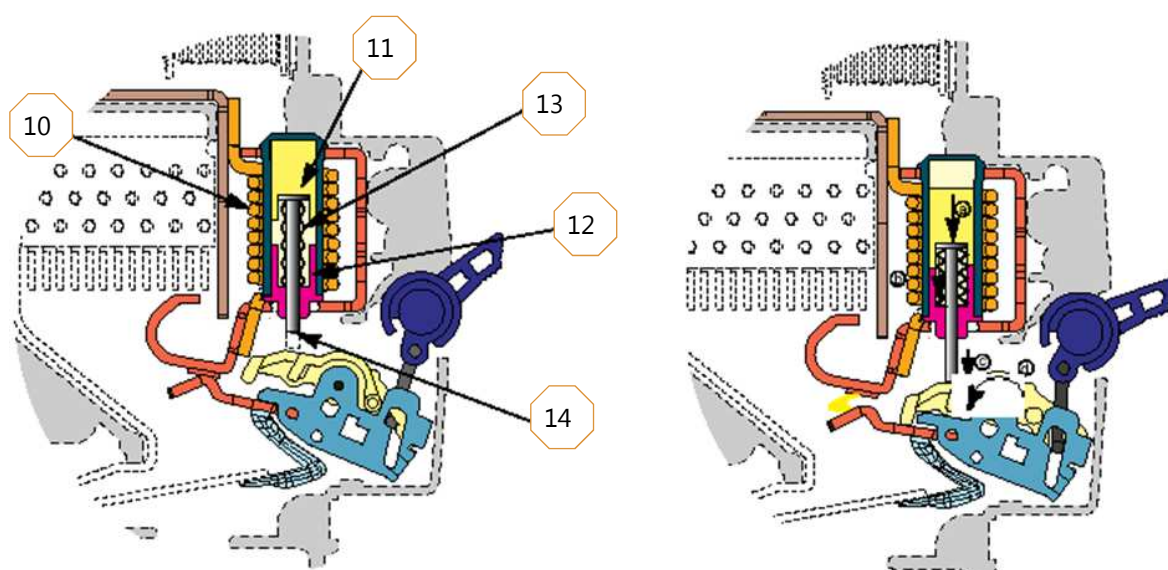
3.13.2. DÉCLENCHEMENT THERMIQUE



- | | | |
|---------------|----------------|----------------------|
| 1. Bilame | 4. Déclencheur | 7. Serrure |
| 2. Vis | 5. Bielle | 8. Contact mobile |
| 3. Entraîneur | 6. Ressort | 9. Ressort de rappel |

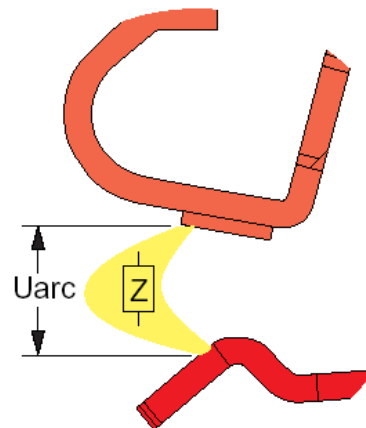
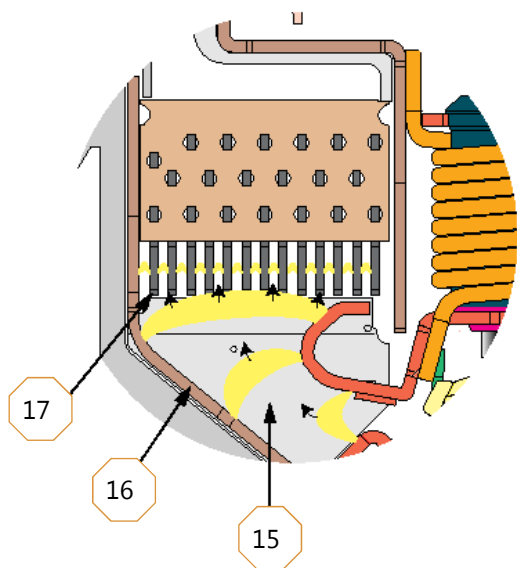
45

3.13.3. DÉCLENCHEMENT MAGNÉTIQUE



- | | | |
|------------------|---------------------|---------------|
| 10. Bobine | 12. Noyau fixe | 14. Percuteur |
| 11. Noyau mobile | 13. Ressort calibré | |

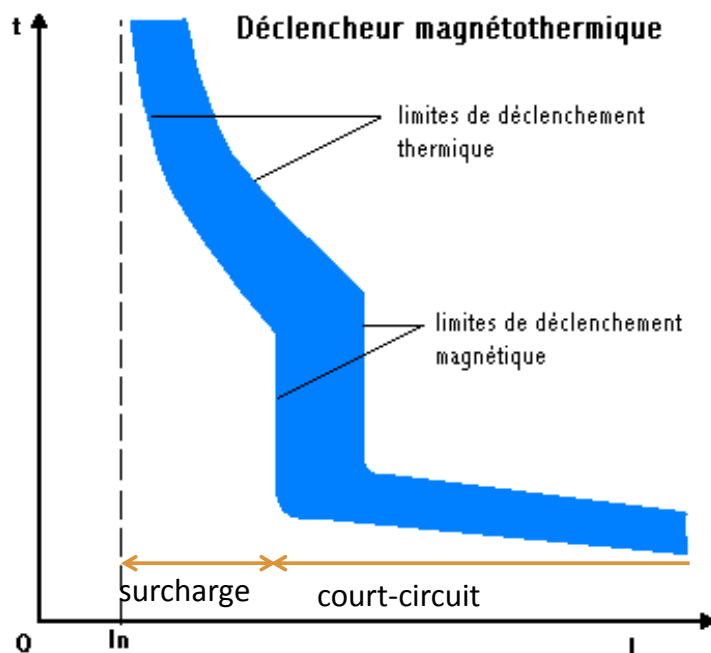
3.13.4. COUPURE DE L'ARC



En soufflant l'arc, on rallonge son chemin, donc la résistance électrique. Ceci a pour effet de diminuer le courant jusqu'à extinction.

- 15. Jous latérales
- 16. Tôle d'arc
- 17. Tôles de dé-ionisation

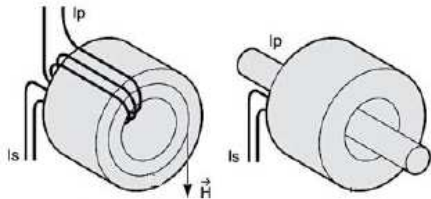
3.13.5. COURBE DE DÉCLENCHEMENT



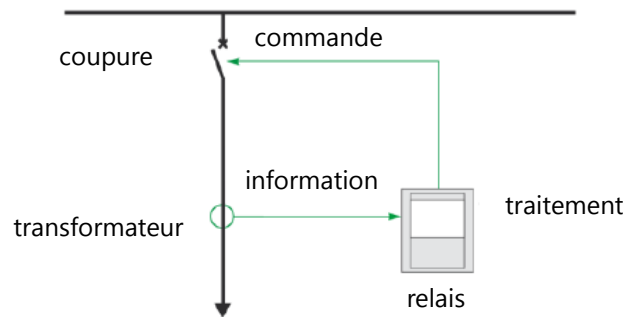
- ✗ Le dispositif thermique protège contre les surcharges, l'élément magnétique contre le court-circuit
- ✗ Le pouvoir de coupure du disjoncteur doit être supérieur au courant de court-circuit pouvant arriver

3.13.6. LE DISJONCTEUR INDUSTRIEL

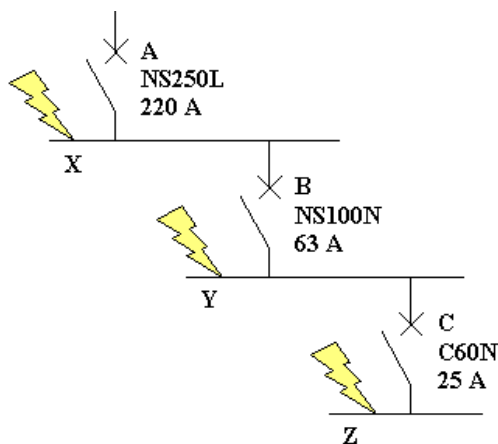
- ✗ Les disjoncteurs industriels sont de plus en plus commandés numériquement et la courbe de déclenchement est réglable.
- ✗ Un transformateur de courant surveille l'intensité (œil), un relais donne les ordres (cerveau) et un organe de coupure ouvre le circuit (bras).



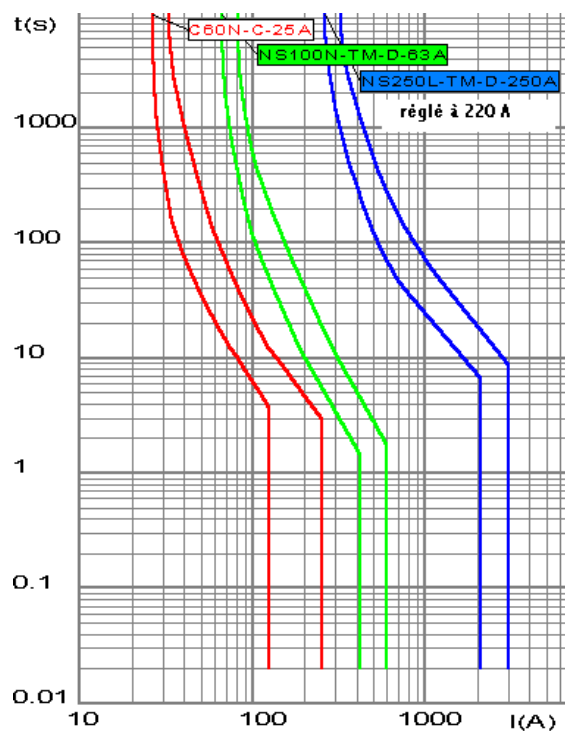
Transformateur de courant



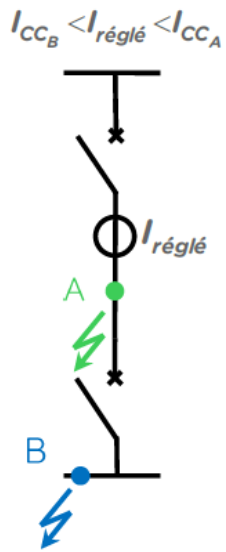
3.14.1. LA SÉLECTIVITÉ



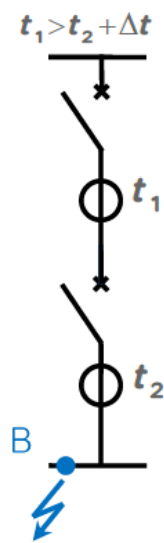
- ✗ La sélectivité doit être respectée pour couper le défaut au plus près et éviter ainsi des coupures générales



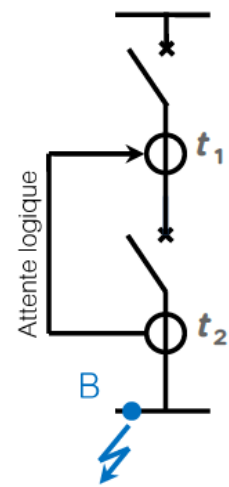
3.14.1. PRINCIPES DE SÉLECTIVITÉ



Sélectivité ampèremétrique



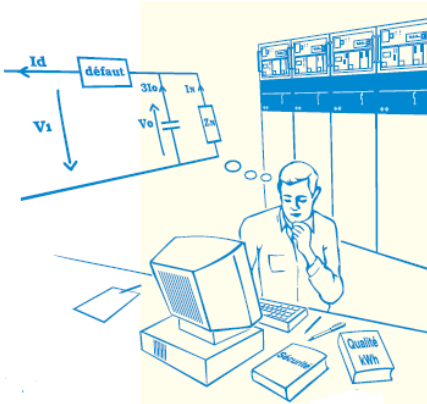
Sélectivité chronométrique



Sélectivité logique

PROTECTION CONTRE LES COURT-CIRCUITS

Ahmed AOUCHAR



L'École des INGÉNIEURS Scientifiques



1. LE COURT-CIRCUIT

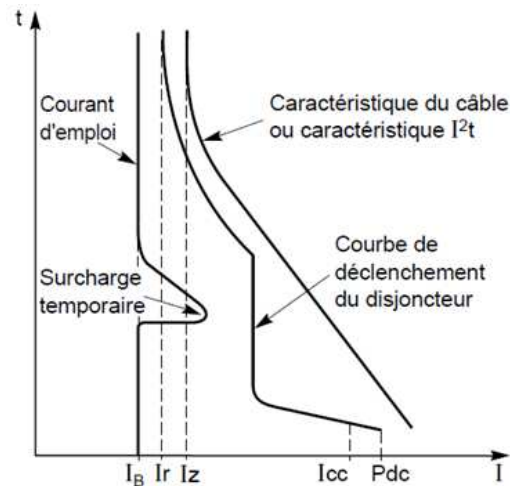


- ✗ Un court-circuit correspond à une liaison accidentelle entre au moins deux points de potentiels différents.
- ✗ La cause d'un court-circuit peut être d'origine mécanique (coup de pelle, branche ...) ou électrique (dégradation d'isolant, surtension ...) ou humaine (erreur de l'exploitant ...).
- ✗ Les conséquences des court-circuits sont souvent graves : en général, un arc électrique de forte énergie apparaît avec ses effets destructeurs.
- ✗ Toute installation électrique doit être protégée contre le court-circuit.
- ✗ L'intensité du courant de court-circuit est à calculer aux différents étages de l'installation (changement de section des câbles); ceci pour pouvoir déterminer les caractéristiques du matériel qui doit supporter ou couper ce courant de défaut.
- ✗ La protection doit éliminer le court-circuit dans un temps (t_c) compatible avec la contrainte thermique que peut supporter le câble protégé :

2. LA PROTECTION

- ✗ La protection se fait par un fusible ou plus souvent par un disjoncteur qui possède une caractéristique temps-courant.
- ✗ L'appareil de protection doit empêcher l'installation de passer dans la zone critique qui est signalée par une courbe hyperbolique temps-courant.

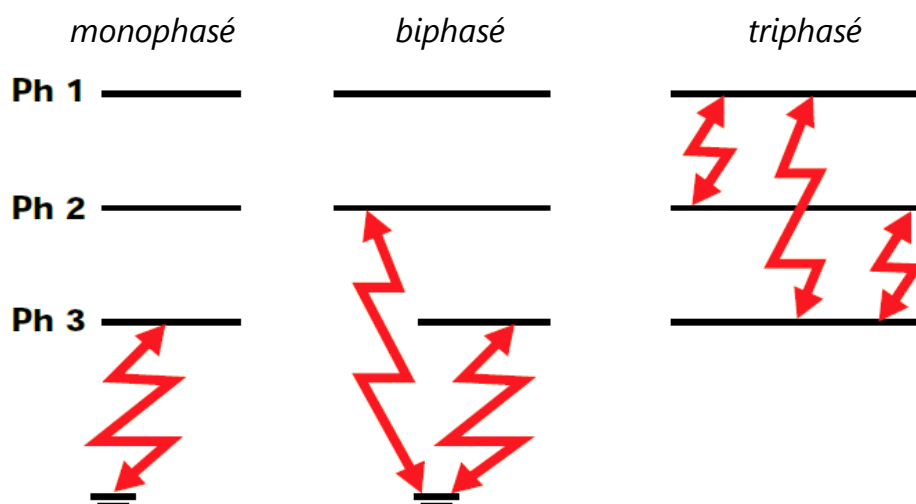
- ✗ Le courant de court-circuit permet de déterminer le pouvoir de coupure PDC des appareils de protection .
- ✗ PDC : la valeur maximale du courant que ses contacts peuvent couper en cas de court-circuit.



3

3. LES TYPES DE COURT-CIRCUIT

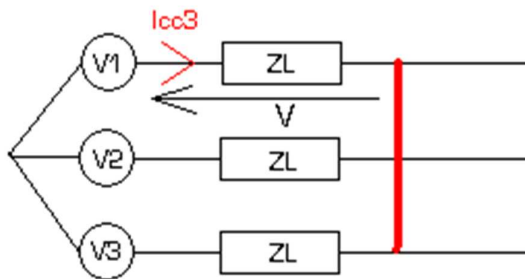
- ✗ Un court-circuit peut être monophasé (80% des cas), biphasé (15%) ou triphasé (5%).
- ✗ Certains défauts peuvent évoluer : monophasé vers biphasé et biphasé vers triphasé.
- ✗ Le type de court-circuit est imprévisible et les conséquences différentes.



4

3.1. LE COURT-CIRCUIT TRIPHASÉ

- ✗ Dans un court-circuit triphasé, les trois phases sont reliées entre elles.
- ✗ Le potentiel de court-circuit est un neutre artificiel.



Court-circuit triphasé

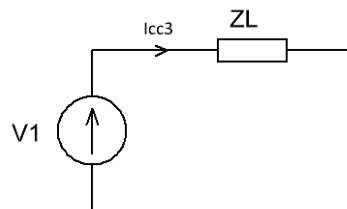
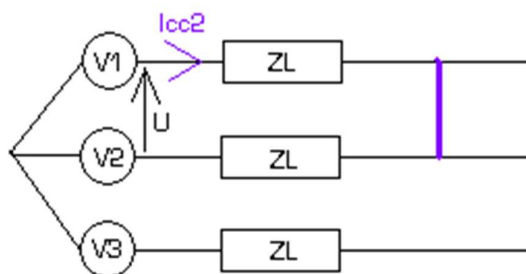


Schéma équivalent

$$I_{cc3} = \frac{V}{Z_L} = \frac{U}{\sqrt{3} \cdot Z_L}$$

3.2. COURT-CIRCUIT BIPHASÉ

- ✗ Le court-circuit biphasé correspond à la liaison de deux phases quelconques entre elles.
- ✗ Il y a une seule boucle du circuit qui est court-circuitée.



Court-circuit biphasé

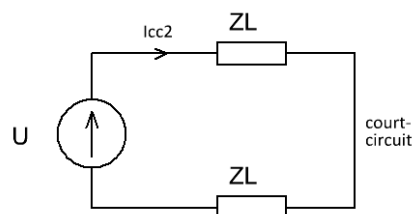
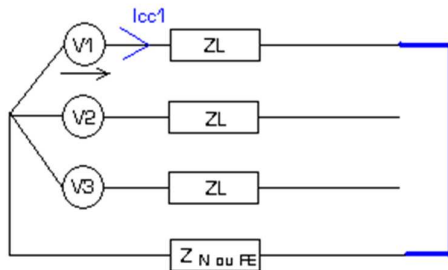


Schéma équivalent

$$I_{cc2} = \frac{U}{2 \cdot Z_L} < I_{cc3}$$

3.3. COURT-CIRCUIT MONOPHASÉ

- ✗ Le court-circuit monophasé correspond à une des trois phases qui touche la terre.
- ✗ La terre et le neutre du réseau sont souvent au même potentiel.



Court-circuit monophasé

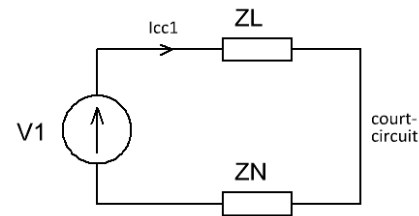


Schéma équivalent

$$I_{cc1} = \frac{V}{(Z_L + Z_N)} = \frac{U}{\sqrt{3} \cdot (Z_L + Z_N)}$$
$$I_{cc1} < I_{cc3}$$

7

3.4. CHOIX DE LA PROTECTION

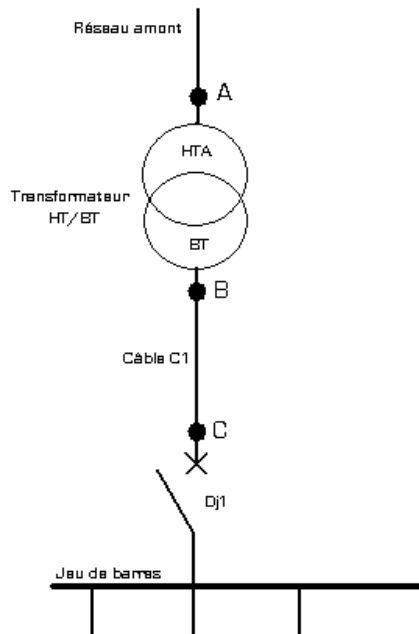
- ✗ Le calcul des courants de court-circuit en un point du réseau donne I_{cc1} , I_{cc2} et I_{cc3} .
- ✗ Le courant I_{cc3} est :
 1. Le plus intense.
 2. Le plus néfaste pour l'installation.
 3. Celui qui est utilisé pour dimensionner les éléments de protection.

Attention :

- ✗ Un calcul complet doit vérifier le déclenchement des protections pour I_{cc2} et I_{cc1} qui restent des courants de court-circuit dangereux tout de même.

8

3.5.1. EXEMPLE



Si un court-circuit se produit côté BT:

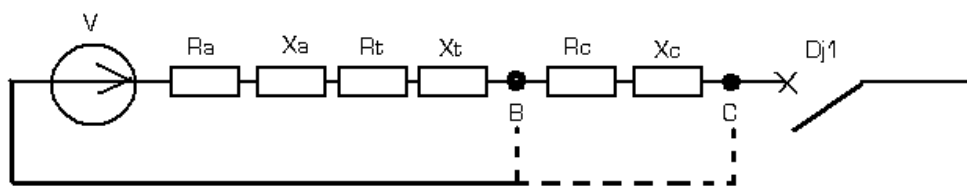
- ✗ Au point B, le courant I_{ccB} est limité par l'impédance interne du transformateur et celle du réseau ramenées amont au secondaire du transformateur.
- ✗ Au point C, Le courant I_{ccC} est limité par l'impédance interne du transformateur et celle du réseau amont ramenées au secondaire du transformateur et celle du câble C1.

CONCLUSION : $I_{ccB} > I_{ccC}$

9

3.5.2. SCHÉMA ÉQUIVALENT

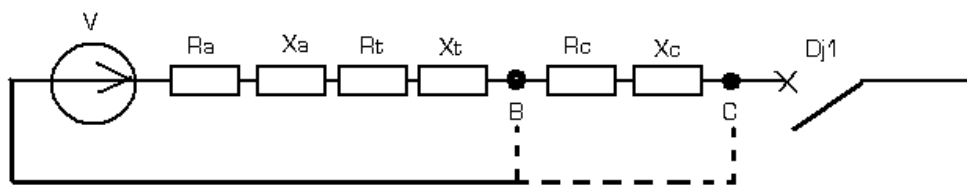
Schéma équivalent pour une phase



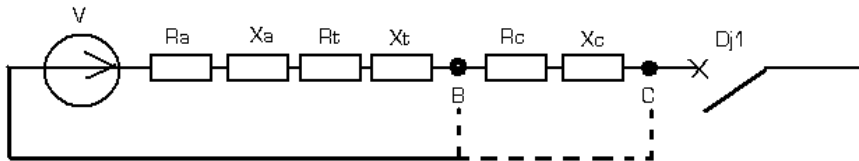
- ✗ R_a : résistance du réseau amont ramenée au secondaire (du transformateur)
- ✗ X_a : réactance du réseau amont ramenée au secondaire.
- ✗ R_t : résistance totale du transformateur ramenée au secondaire.
- ✗ X_t : réactance totale du transformateur ramenée au secondaire.
- ✗ R_c : résistance d'une phase du câble C1.
- ✗ X_c : réactance d'une phase du câble C1.
- ✗ V : tension simple au secondaire.

10

3.5.3. CALCUL DES COURANTS I_{CC}



$$I_{ccB} = \frac{V}{Z_B} \quad Z_B = \sqrt{(R_a + R_t)^2 + (X_a + X_t)^2}$$



$$I_{ccC} = \frac{V}{Z_C} \quad Z_C = \sqrt{(R_a + R_t + R_c)^2 + (X_a + X_t + X_c)^2}$$

- ✗ Le pouvoir de coupure de Dj1 doit être supérieur à I_{ccC} .
- ✗ I_{ccB} sera éliminé par les protections en amont du transformateur.

11

3.5.4. CALCUL DES IMPÉDANCES AMONT

- ✗ Le réseau amont est caractérisé par sa puissance de court-circuit S_{cc} .
- ✗ L'impédance du réseau (HT) vu du côté BT peut être obtenue auprès du fournisseur d'énergie ou par calcul à partir de S_{cc} .
- ✗ La résistance et la réactance amont se déduisent à partir de R_a / Z_a en HT par :
 1. $R_a / Z_a \approx 0,3$ en 6 kV,
 2. $R_a / Z_a \approx 0,2$ en 20 kV,
 3. $R_a / Z_a \approx 0,1$ en 150 kV.

$$Z_a = \frac{U_{sec}^2}{S_{CC}} \quad R_a = 0,20 \cdot Z_a \quad X_a = \sqrt{Z_a^2 - R_a^2}$$

12

3.5.5. IMPÉDANCES DU TRANSFORMATEUR

Le transformateur est caractérisé par :

1. Son mode de couplage
2. Ses tensions (primaire et secondaire (U))
3. Sa puissance apparente nominale (Sn),
4. Sa tension de court-circuit (Ucc%)
5. Ses pertes cuivre (Pcu)

| | | | | | | |
|--|-------|-----|------|------|------|------|
| Puissance du transformateur HTA/BT(en kVA) | ≤ 630 | 800 | 1000 | 1250 | 1600 | 2000 |
| Tension de court-circuit u_{cc} (en %) | 4 | 4,5 | 5 | 5,5 | 6 | 7 |

$\frac{U_{cc} \cdot U}{100}$ = tension qu'il faut appliquer au primaire du transformateur pour que le secondaire soit parcouru par l'intensité nominale I_n , les bornes secondaires BT étant court-circuitées.

$$Z_t \cdot I = \frac{U_{cc} \cdot U}{100} \quad \rightarrow \quad Z_t = \frac{U_{cc}}{100} \cdot \frac{U^2}{S_n}$$

$$R_t = \frac{P_{cu}}{I^2} = \frac{P_{cu} \cdot U^2}{S_n^2} \quad X_t = \sqrt{Z_t^2 - R_t^2}$$

13

3.5.6. IMPÉDANCES DU CÂBLE

Le câble est caractérisé par :

1. La nature du conducteur (Cu ou Al)
2. Sa résistivité
3. Ses dimensions géométriques
4. Son mode de pose

$$R_c = \rho \cdot \frac{L}{S} \quad \rho_{cu} = 23 \cdot 10^{-9} \Omega \cdot m \quad \rho_{al} = 36 \cdot 10^{-9} \Omega \cdot m$$

- ✗ la résistivité adoptée pour les calculs est supérieure à ρ_0 ($18 \cdot 10^{-9}$ et $26 \cdot 10^{-9}$) et dépend du courant de court-circuit calculé, maximum ou minimum.
- ✗ On utilise les puissances maximale et minimale que peut fournir le réseau.

La réactance dépend du mode de pose:

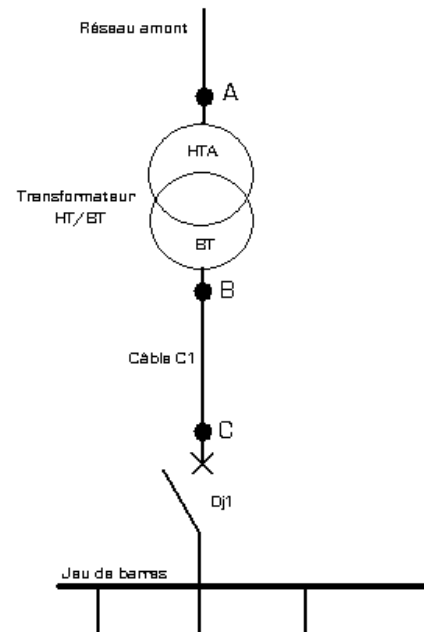
| Mode de pose | Jeux de barres | Câble triphasé | Câbles unipolaires espacés | Câbles unipolaires serrés en triangle | Câble en nappe serrée |
|----------------------------|----------------|----------------|----------------------------|---------------------------------------|-----------------------|
| Réactance linéique en mΩ/m | 0,15 | 0,08 | 0,15 | 0,085 | 0,095 |

14

3.5.7. APPLICATION NUMÉRIQUE

Caractéristiques de l'installation :

1. Réseau amont : $S_{cc}=500\text{MVA}$
2. Transformateur : 20kV, 410V, $S_n=400\text{kVA}$, $P_{cu}=5\text{kW}$.
3. Câble C1: 3 x 150mm² par phase en cuivre longueur 30m.



1. Calculer le courant de court-circuit I_{ccB} au point B
2. Calculer le courant de court-circuit I_{ccC} au point C

15

3.6. CLASSIFICATION DES DÉFAUTS

| Type | Causes | Élimination | Fréquence |
|-------------------------|---------------------|---|-----------|
| <i>Auto extincteurs</i> | | Automatique (qlq ms : trop court pour déclencher la protection) | 5% |
| <i>Fugitifs</i> | Amorçage d'un arc | Disparaît après une coupure de l'ordre de 300 ms | 70 à 80% |
| <i>Semi permanents</i> | Branche, surtension | Disparaît après une coupure de quelques secondes | 5 à 15% |
| <i>Permanents</i> | Accident | Nécessite une intervention sur site après coupure | 5 à 15 % |

- ✗ Remarque : les lignes aériennes HTA sont essentiellement touchées par les défauts non permanents, ce qui améliore la continuité de service.

16

3.7. PROTECTION DES LIGNES HTA

Défaut auto extincteur :

- ✗ Si le défaut dure plus de 100 ms, la protection doit réagir.

Défaut auto extincteur :

- ✗ La durée de mise hors tension est d'environ 300 ms pour permettre l'extinction de l'arc qui a pu se former.

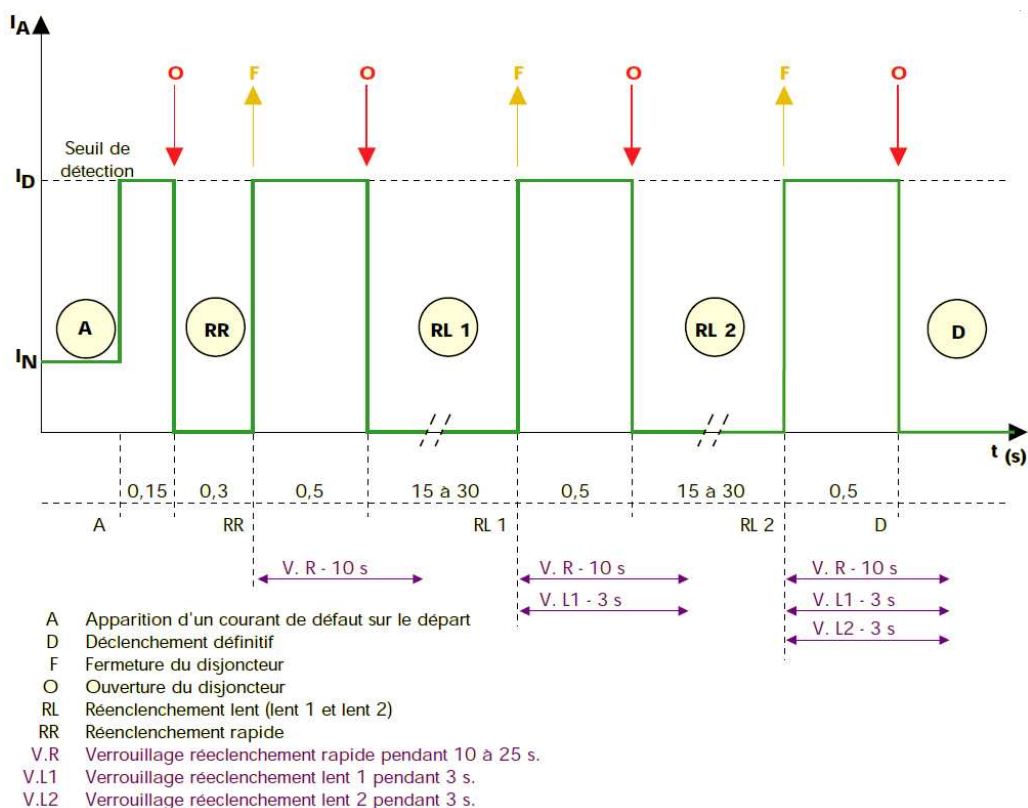
Défaut semi-permanent :

- ✗ Si le défaut réapparaît à la remise sous tension, l'automatisme réagit de la manière suivante :
 1. un deuxième déclenchement a lieu 0,5 s environ après la réapparition
 2. la coupure a alors une durée de 15 à 30 s, ce cycle peut être répété

Défaut permanent :

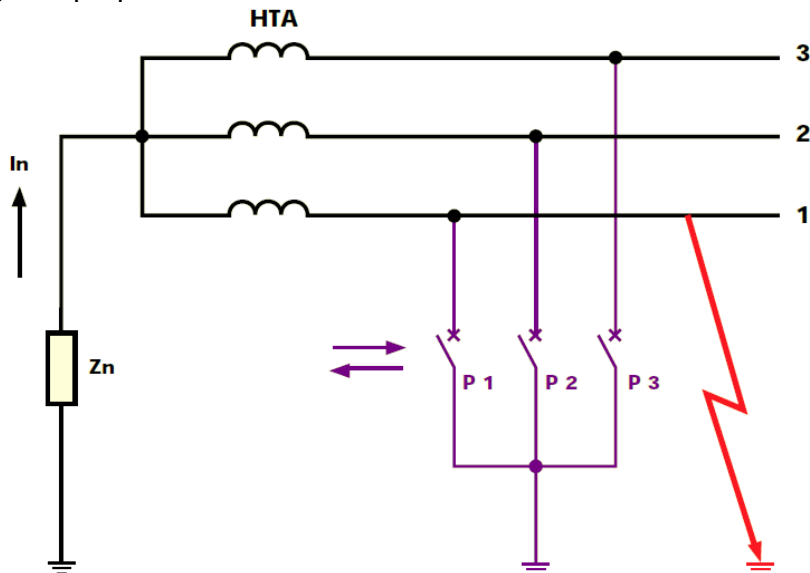
- ✗ Si le défaut persiste encore, le disjoncteur déclenche définitivement. La ligne reste alors hors tension jusqu'à la fin de l'intervention nécessaire (recherche de défaut, visite de ligne, dépannage).

3.8. CYCLE DE RÉ-ENCLANCHEMENT

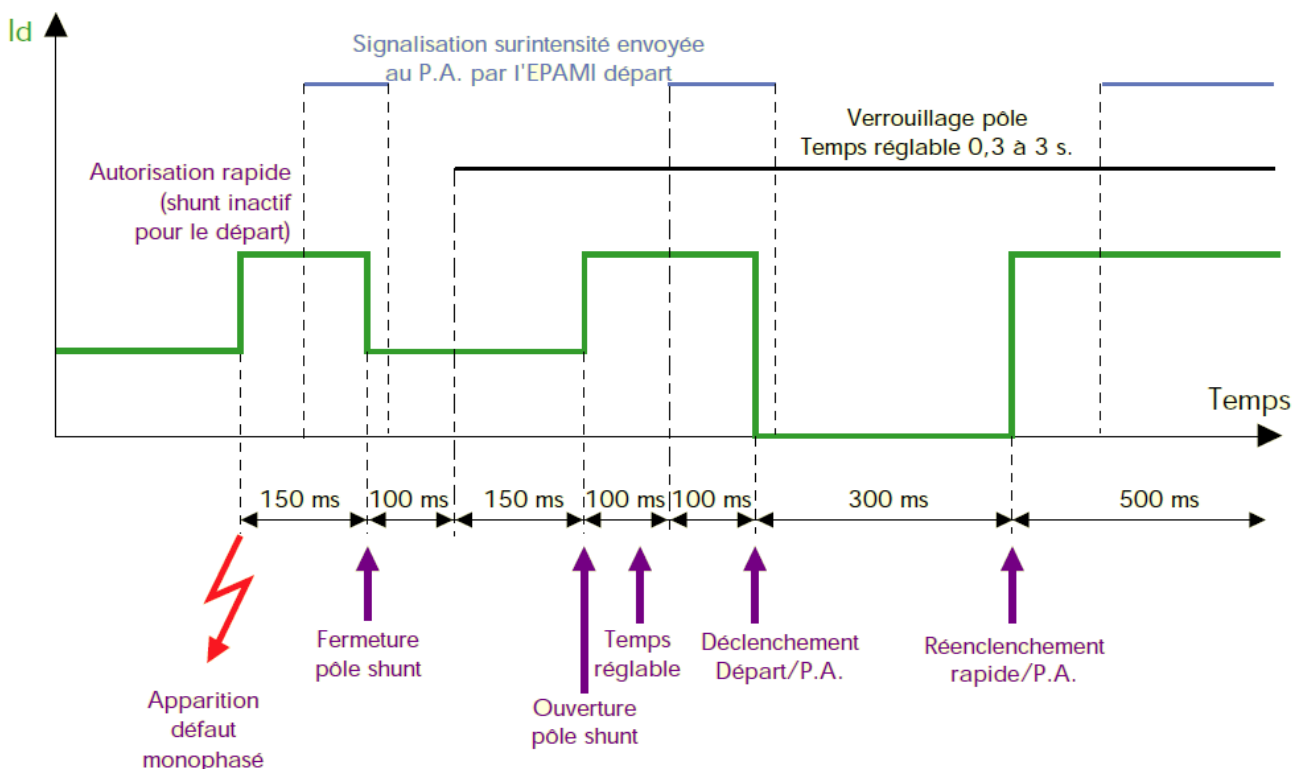


3.9. LE DISJONCTEUR SHUNT

- ✗ Le fonctionnement de l'automatisme ré-enclencheur lent présente l'inconvénient de provoquer des coupures sur le réseau. Le disjoncteur shunt permet d'éviter ces coupures, pour environ 80 % des défauts monophasés fugitifs.
- ✗ Chaque phase peut être mise à la terre par un disjoncteur fonctionnant à pôles séparés, Ce qui permet d'éteindre l'arc en le court-circuitant.

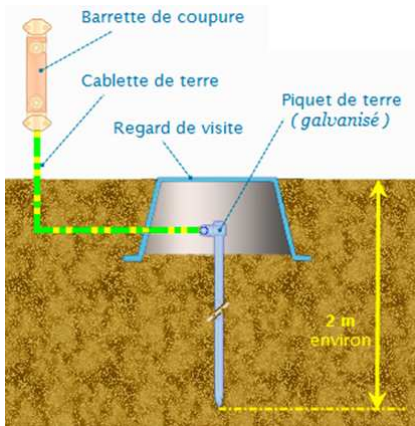


3.10. CYCLE D'UN DISJONCTEUR SHUNT



LES SYSTÈMES DE LIAISON À LA TERRE

Ahmed AOUCHAR



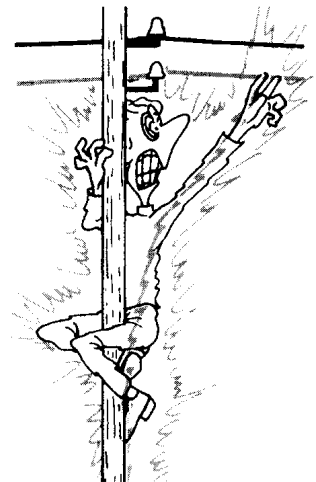
L'École des INGÉNIEURS Scientifiques



1. NORMES DE SÉCURITÉ ÉLECTRIQUE



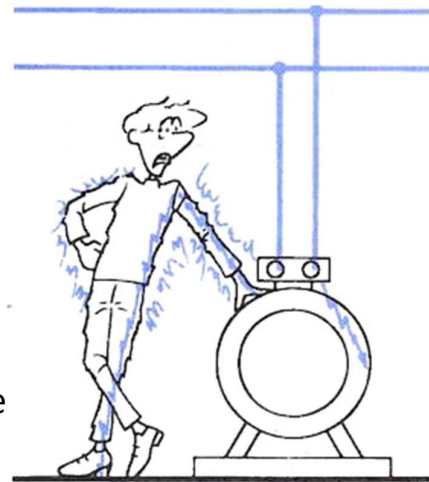
- × Principales normes :
 1. Internationale : CEI 364
 2. Française : NF C 15-100
- × Recommandations pour le contact direct :
 1. Éloignement ou isolation
 2. TBT (classe III)



| Classe | Symbole | Description |
|--------|---------|--|
| 0 | | Isolation simple Interdit en Europe |
| 1 | | Liaison à la terre pour les parties métalliques |
| 2 | | Double isolation sans terre |
| 3 | | Isolation Classe 2 + alimentation par transformateur TBT |

- ✗ Principales normes :
 1. Internationale : CEI 364
 2. Française : NF C 15-100

- ✗ Recommandations pour le contact indirect :
 1. S.L.T. -> TT, TN ou IT
 2. Masses équipotentielles (mises à la terre ou au neutre)
 3. isolation (classe II)
 4. « Disjoncteur différentiel (30 mA) » si risque d'abs de liaison à la terre



3

2. SYSTÈMES DE LIAISON À LA TERRE



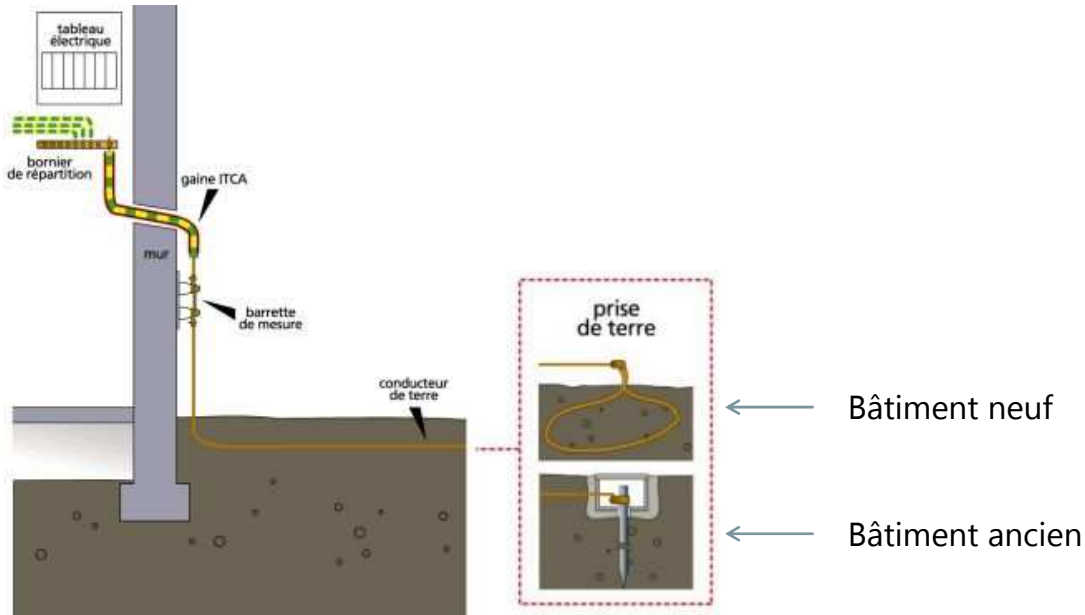
- ✗ La mise à la terre concerne :
 1. Le NEUTRE du générateur qui est conducteur actif
 2. La MASSE du récepteur qui est conducteur passif

- ✗ Symboles représentatifs (2 lettres) :
 1. La 1^{ère} lettre indique la liaison du neutre par rapport à la terre
 2. La 2^{ème} lettre indique la liaison de la masse par rapport à la terre

4

3.1. PRISE DE TERRE

- ✗ La qualité de la prise de terre joue un rôle essentiel dans la protection des personnes contre le risque électrique
- ✗ La résistance de la prise de terre ne devra pas dépasser quelques dizaines d'Ohm



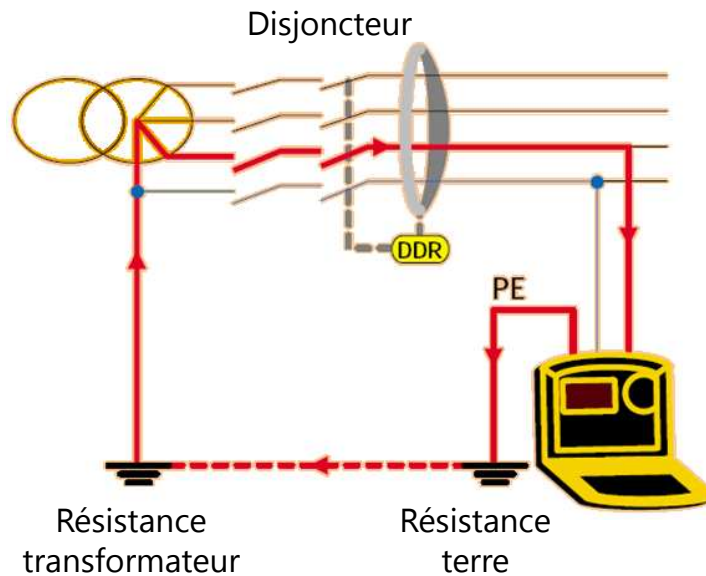
3.2. RÉSISTANCE DE TERRE

- ✗ La résistance de la prise de terre dépendra de sa forme, de son implantation dans le terrain et de la résistivité de celui-ci
- ✗ La résistivité est très variable selon la nature des sols

| CONSTITUTION DE LA PRISE DE TERRE | NATURE DU TERRAIN | | |
|--|----------------------------------|---------------------------------------|----------------------------|
| | ARABLES GRAS REMBLAIS HUMIDES | ARABLES MAIGRES REMBLAIS GROSSIERS | PIERREUX SECS SABLE SEC |
| MAISON INDIVIDUELLE 8 x 7m | | | |
| • boucle à fond de fouille | 3 à 10 | 30 à 60 | 100 à 200 |
| • 1 piquet vertical de 2 m | 6 à 75 | 220 à 300 | 750 à 1500 |
| • 4 piquets verticaux (un à chaque angle) | 2 à 18 | 60 à 120 | 220 à 450 |
| • 1 tranchée de 10 m | 8 à 30 | 90 à 120 | 300 à 600 |
| IMMEUBLE COLLECTIF 10 x 40 m | | | |
| • boucle à fond de fouille | 1 à 3 | 10 à 20 | 50 à 100 |
| • 10 piquets verticaux de 2 m régulièrement répartis à la périphérie | 3 à 8 | 23 à 45 | 120 à 220 |
| | Ω | Ω | Ω |

3.3. MESURE DE LA RÉSISTANCE DE TERRE

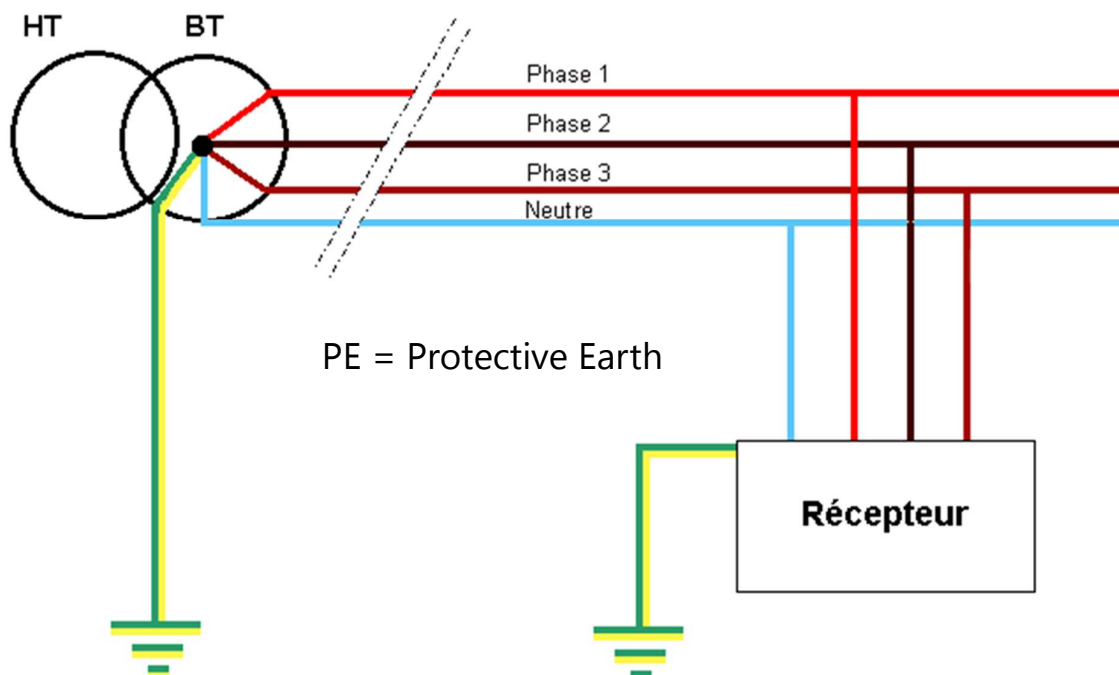
- ✗ La mesure de boucle permet une mesure de terre en milieu urbain sans planter de piquet et en se raccordant tout simplement au réseau d'alimentation
- ✗ L'appareil mesure le courant et en déduit la résistance



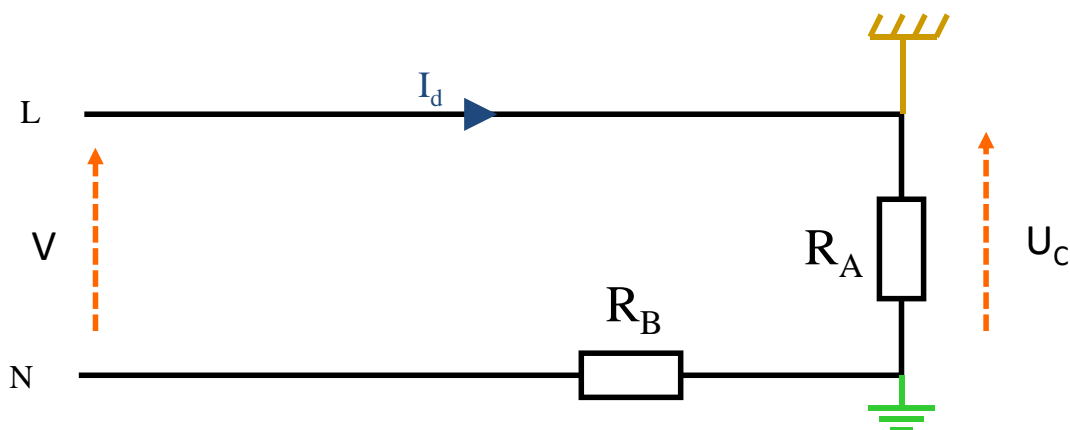
7

4.1. LE SCHÉMA T T

Neutre à la terre ↑ ↑ Masses à la terre



4.2. TENSION DE CONTACT



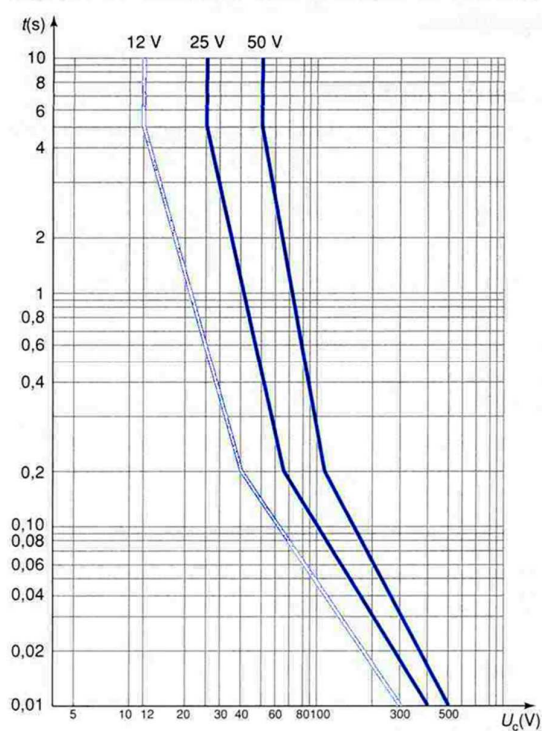
$$U_C = V \times \frac{R_A}{R_A + R_B}$$

- ✗ Si $R_A = R_B$ alors $U_c = V/2$ soit une tension généralement dangereuse !
- ✗ Il faut donc veiller à couper l'alimentation du circuit de défaut.

9

4.3. COURBES DE SÉCURITÉ

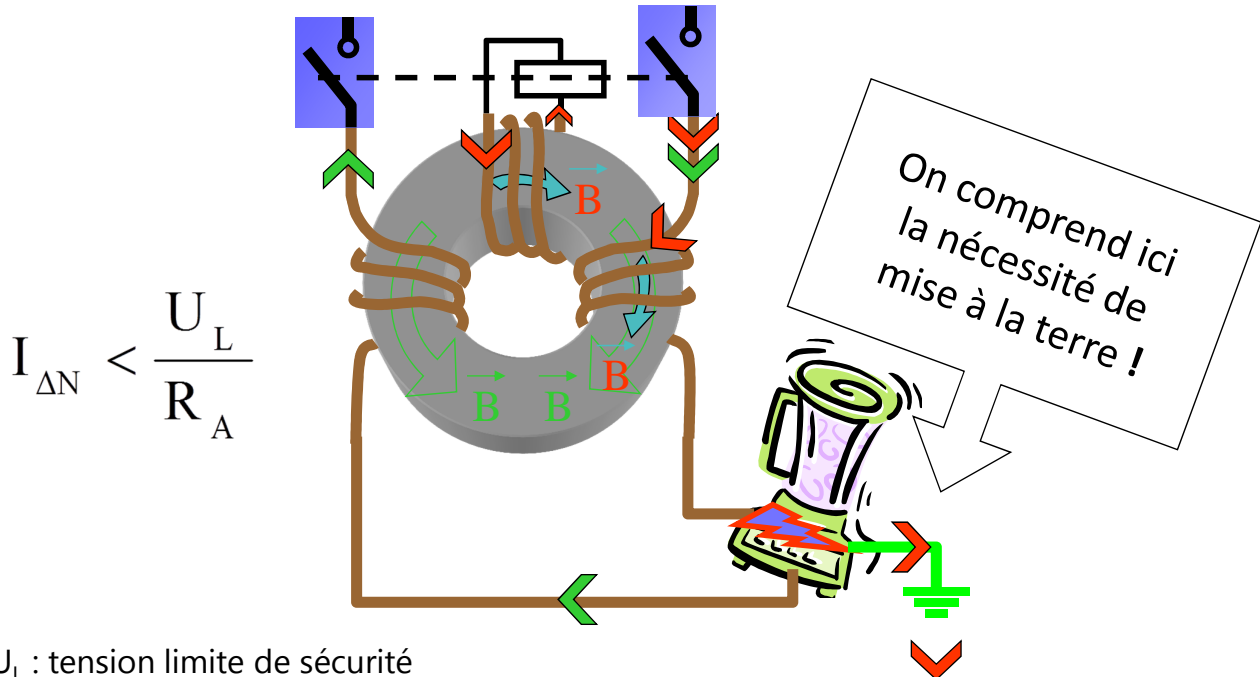
- ✗ L'apparition d'un défaut doit déclencher l'ouverture du circuit électrique dans un temps court qui dépend de l'endroit
- ✗ Si le défaut est coupé rapidement le danger est supprimé
- ✗ Les tensions de sécurité normalisées sont :
 - 12 V : salle d'eau
 - 25 V : pièce humide
 - 50 V : pièce sèche



10

4.4. DISJONCTEUR DIFFÉRENTIEL « DDR »

- ✗ Pour que le défaut soit détecté, il faut que le DDR soit suffisamment sensible :



U_L : tension limite de sécurité

$I_{\Delta N}$: sensibilité DDR (déclenche à partir de $I_{\Delta N} / 2$)

11

4.5. VALEUR LIMITE DE R_{TERRE}

- ✗ Dans une installation aux normes et pour garantir la sécurité des individus, il faut que les dispositifs de protection se déclenchent dès qu'une « tension de défaut » circulant dans l'installation dépasse la tension limite acceptée par le corps humain. Dans le but de minimiser les risques, nous considérerons :

$$U \text{ limite} = 25V \text{ AC}$$

- ✗ De plus, de façon générale, dans les installations domestiques, le dispositif de coupure différentiel (DDR) associé à la prise de terre accepte une élévation de courant de 500 mA.

$$U = RI$$

$$R = 25 \text{ V} / 0,5 \text{ A} = 50 \Omega$$

- ✗ Pour garantir la sécurité des individus, il faut :

$$R \leq 50 \Omega$$

12

5.1. LE SCHÉMA T N

Neutre à la terre

Masse au neutre

- ✗ La liaison de la masse au neutre EDF peut se faire avec un conducteur séparé et dédié spécifiquement à cette liaison :
- ✗ Ce régime est obligatoire pour les sections $< 10 \text{ mm}^2$ (Cu) et $< 16 \text{ mm}^2$ (Al)

T N - S

- ✗ La liaison peut se faire aussi en utilisant le fil de neutre déjà existant (neutre commun) :

T N - C

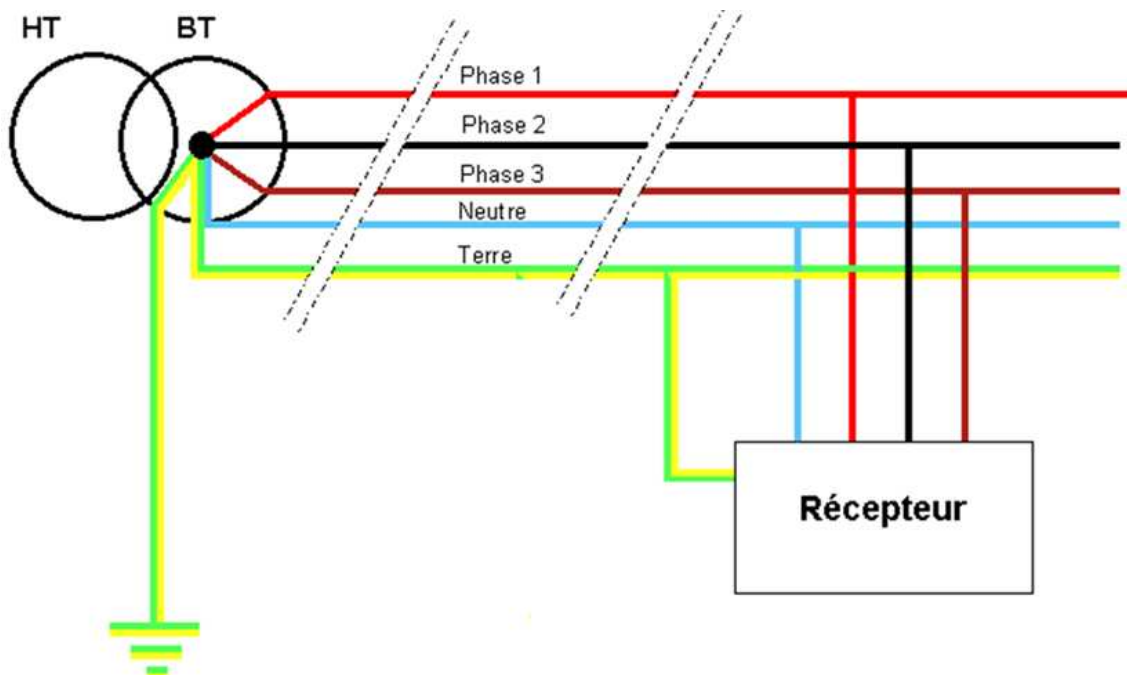
13

5.2. SCHÉMA T N - S

Neutre à la terre

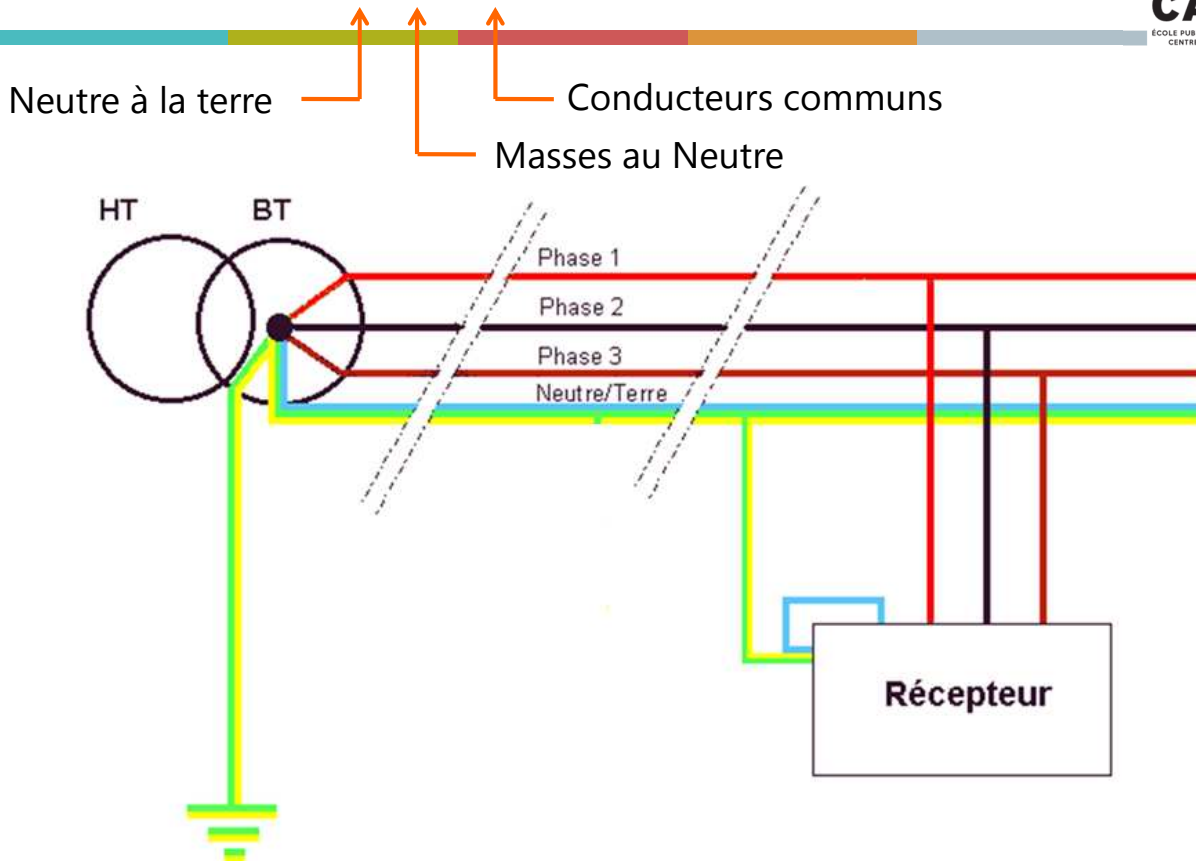
Conducteurs séparés

Masses au Neutre



14

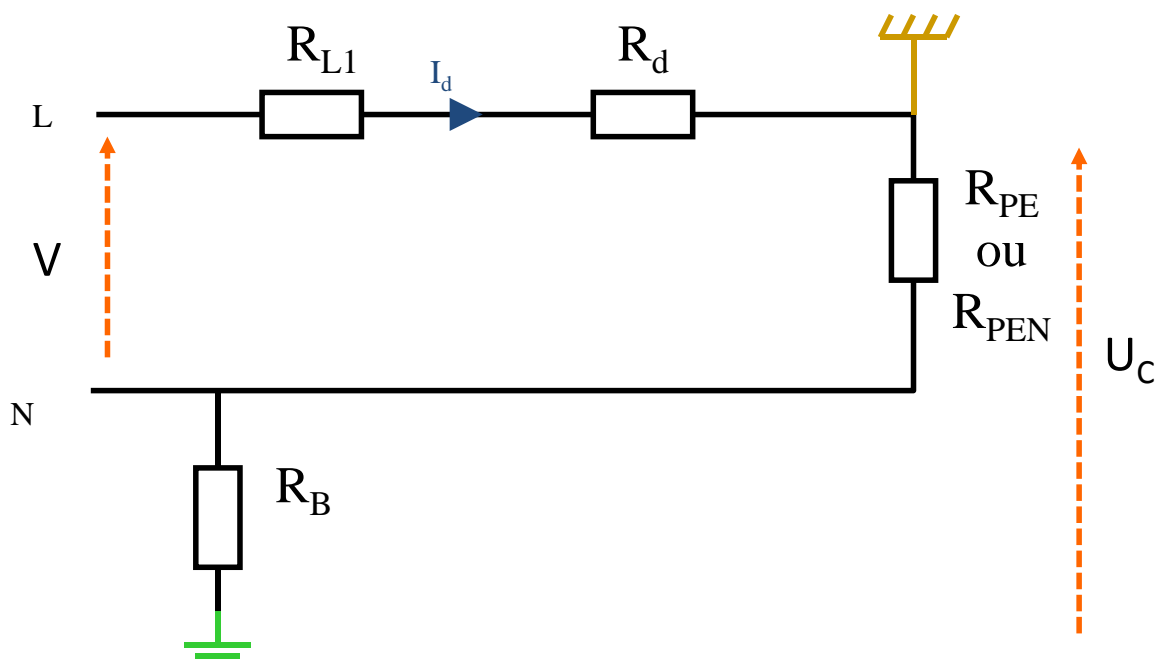
5.3. SCHÉMA T N - C



15

5.4. SCHÉMA ÉQUIVALENT

- × Que se soit en TN-C ou TN-S, lors de son apparition le défaut d'isolement se traduit par un court-circuit.



16

5.5. IMPÉDANCES DES CÂBLES

- ✗ Afin de tenir compte des impédances en amont de l'installation, on admet une chute de tension de 20%.

$$Z_t = \sqrt{\sum R^2 + \sum X^2} \quad I_{CC} = 0,8 \times \frac{V}{Z_t}$$

- ✗ Pour simplifier, on ne considère que les résistances (réactances négligées si $S < 120 \text{ mm}^2$).
- ✗ On peut déterminer la résistance d'un câble par la formule classique :

$$R = \rho \times \frac{L}{S}$$

NF C 15-500 :

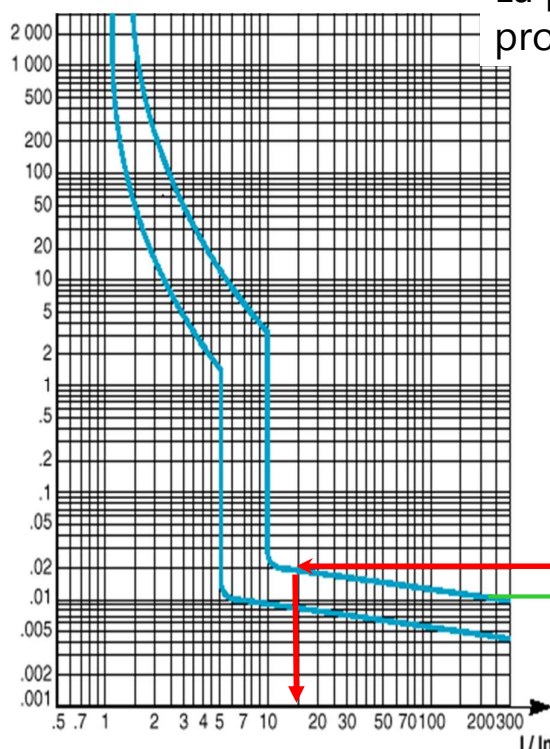
Cu $\rho_0 = 18,51 \cdot 10^{-3} \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$

Al $\rho_0 = 29,41 \cdot 10^{-3} \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$

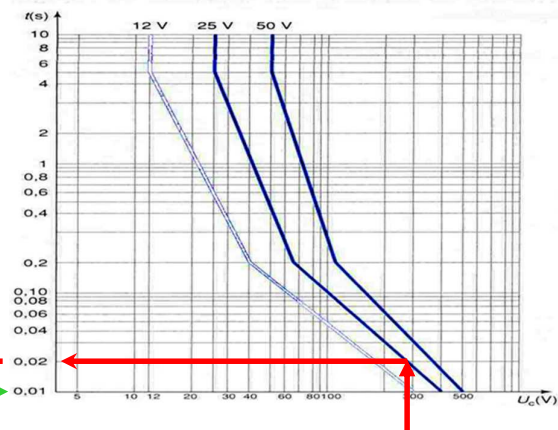
- ✗ Le fort courant de défaut sera détecté par la partie magnétique des disjoncteurs. Il faut alors veiller à toujours avoir de forts courants ! Résistance faible !

17

5.6. COURBE DE PROTECTION



La partie magnétique des disjoncteurs protège ici les personnes !!



Il faut donc toujours connaître précisément I_d (I_{cc})

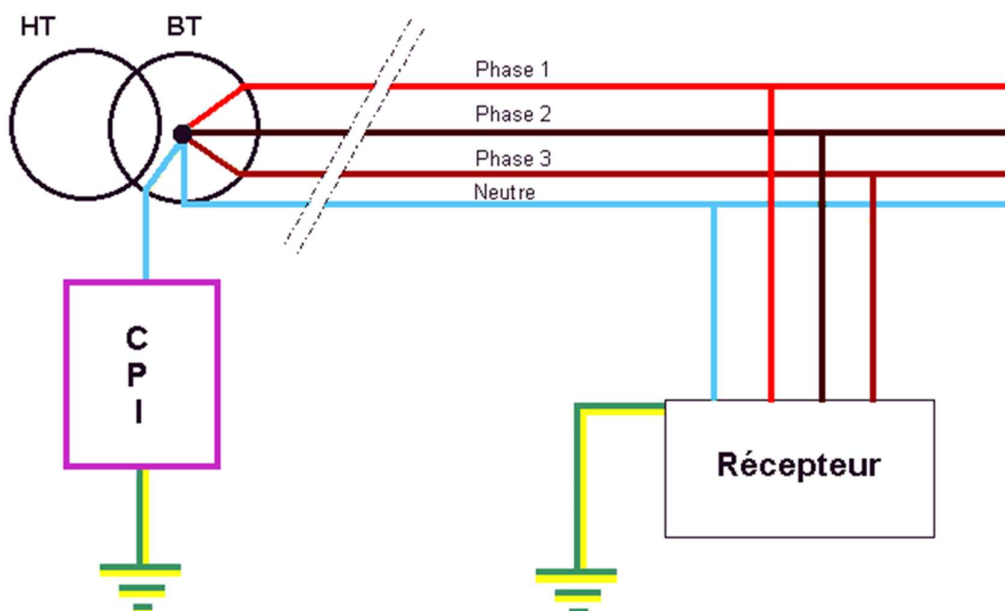
5.7. CONCLUSION

- ✗ En TN, la sécurité des personnes est assurée par la partie magnétique des disjoncteurs !!
- ✗ Il faut donc toujours veiller à avoir $I_{cc} > I_{mag}$
- ✗ Pour satisfaire cette condition, on peut :
 1. augmenter la section des conducteurs R_{Σ} ; $I_{cc} \nearrow$
 2. utiliser des déclencheurs électroniques configurables :
⇒ diminuer I_{mag}
- ✗ Le courant de défaut étant élevé, ce régime est interdit lors des risques d'explosion

19

6.1. SCHÉMA I T

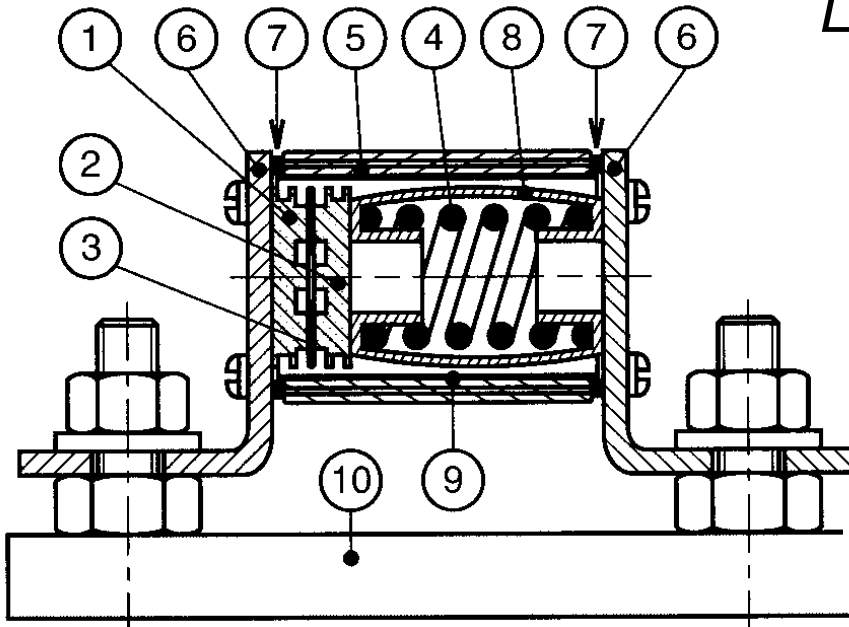
Neutre isolé Masses à la terre



20

6.2. LE LIMITEUR DE SURTENSION (ÉCLATEUR)

* Liaison neutre-terre en cas de surtension

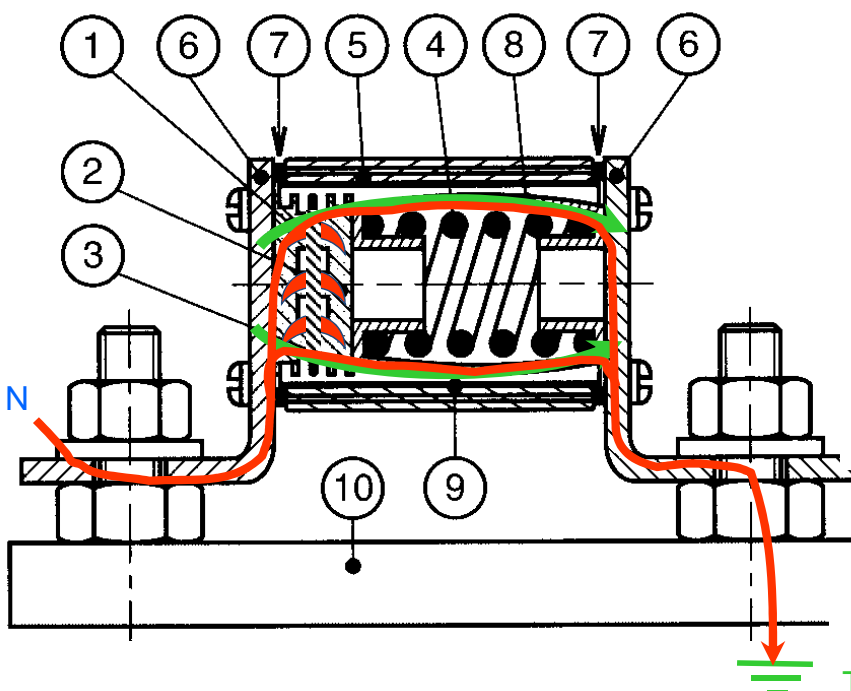


Légende :

- 1 & 2. Électrodes
- 3. Anneau isolant
- 4. Ressort
- 5. Enveloppe stéatite
- 6. Équerres de raccordement
- 7. Joints d'étanchéité
- 8. Tresse conductrice
- 9. Fourreau de protection
- 10. Socle isolant

21

6.3. AMORÇAGE DU LIMITEUR DE TENSION



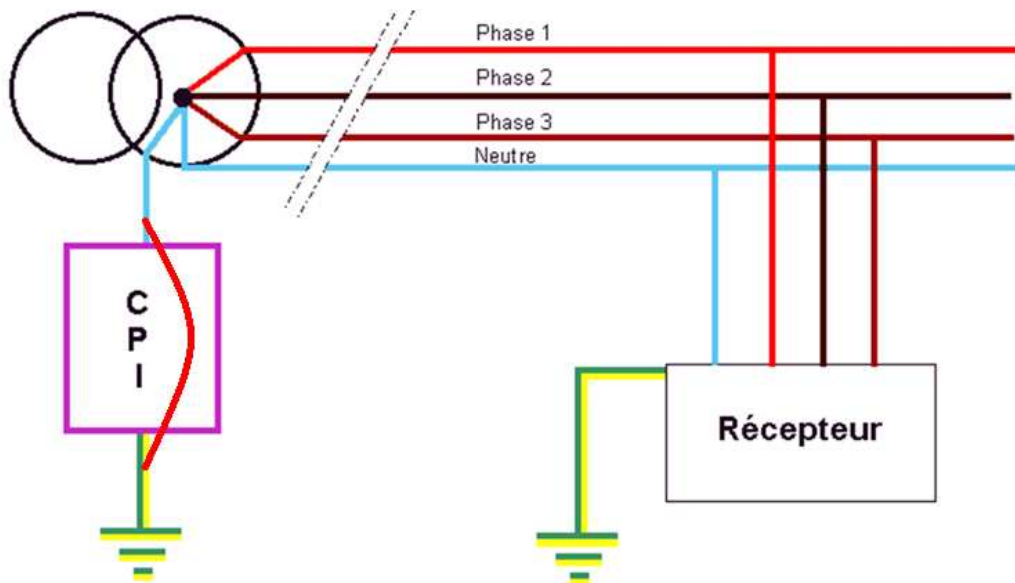
Surtension

- ⇒ arc entre (1) et (2)
- ⇒ destruction isolant (3) donc soudure électrodes
- ⇒ les 2 points de raccordement sont connectés
- ⇒ le Neutre est relié à la Terre.

22

6.4. TRANSFORMATION IT -> TT

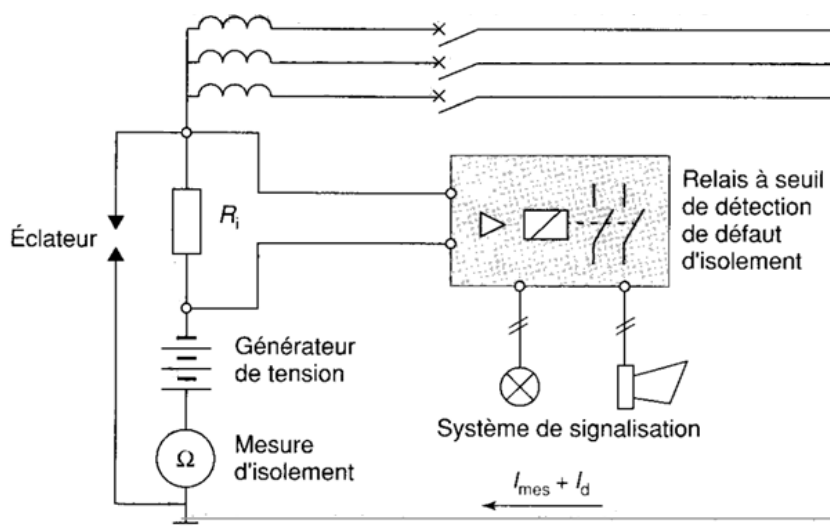
- × Après un défaut de surtension (foudre), le régime IT se transforme en régime "TT".



23

6.5. FONCTIONNEMENT DU C.P.I.

- × Une tension continue est injectée entre le neutre et la terre, à travers une résistance.
- × Le CPI mesure le courant de fuite qui y circule pour déterminer la résistance d'isolement.



Indication de l'isolement



Réglage du seuil

24

6.6. 1^{ER} ET 2^{ÈME} DÉFAUTS

- ✗ Cas d'un 1er défaut (ex : Ph1/masse) :
 - Courant et tension faible. Absence de danger.
 - Aucun déclenchement n'est nécessaire mais signalisation obligatoire.

- ✗ Cas d'un 2ème défaut (ex : Ph2/masse) :
 - on se trouve maintenant en présence d'un court-circuit entre phase (ici Ph1 / Ph2) !
 - On peut alors se considérer en TN.
- ✗ De même qu'en régime TN, on considère une chute de tension en ligne de 20%.

$$I_{CC} = 0,8 \times \frac{V}{Z_t}$$

2^{ème} défaut phase-neutre

$$I_{CC} = 0,8 \times \frac{U}{Z_t}$$

2^{ème} défaut phase-phase

25

6.7. RÈGLES

1er défaut : (ex : Ph1/masse, N/masse, ...)

- ✗ pas de coupure mais signalisation. Réparation !
- ✗ masses à la terre correctement ($R_A \times I_d \leq 50V$)

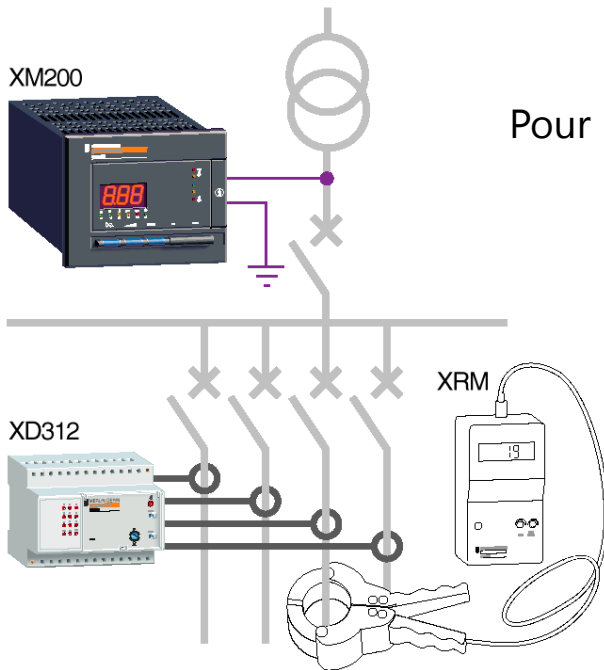
2ème défaut : (ex : Ph2/masse) ⇨ ≅ TN

- ✗ coupure impérative
- ✗ prises de terre reliées ensembles sinon DDR
- ✗ comme en TN, maîtrise de la boucle de défaut

$$I_{CC} = 0,8 \times \frac{U}{Z_t}$$

26

6.8. RECHERCHE DU DÉFAUT



Pour localiser un 1^{er} défaut on peut :

- ✗ Ouvrir chaque départ !
(on perd ainsi la continuité de service !)
- ✗ Injecter un courant basse fréquence (10Hz) dans l'installation puis détecter l'endroit où il passe.

1^{er} niveau : détection et localisation automatique du défaut

7. TABLEAU COMPARATIF

| | TT | TN-C | TN-S | IT |
|---|--|--|---|---|
| Sécurité des personnes | Bien Disjoncteur différentiel obligatoire | Bien Être vigilants et assurer la continuité du conducteur PE lors d'extension d'installation | | |
| Sécurité des biens Risques d'incendie Risques pour les matériels | Bien | Mauvais Courants très élevés dans le conducteur PEN pouvant être > kA Interdit dans les locaux à risque | Mauvais Protection différentielle 500 mA | Bien Recommandé en sécurité intrinsèque car pas d'arc électrique |
| Disponibilité de l'énergie | Bien | Bien | Bien | Très bien |
| Comportement en «CEM» | Bien Le PE n'est plus une référence de potentiel unique pour l'installation - Parafoudres à prévoir (distribution aérienne) - Nécessite la gestion des équipements à courants de fuite élevés situés en aval des protections différentielles | Mauvais Circulation de courants perturbateurs dans les masses Rayonnement de perturbations «CEM» par le PE. A déconseiller si générateur d'harmonique dans l'installation | Très bien - Nécessite la gestion des équipements à courant de fuite élevés situés en aval des protections différentielles - Courants de défaut importants dans le PE (perturbations induites) - 1 seule terre | Mauvais Incompatibilité avec l'utilisation de filtre de mode commun. - Il peut être nécessaire de fragmenter l'installation pour réduire la longueur des câbles et limiter les courants de fuite. - Schéma TN au 2 ^{ème} défaut |

LE RISQUE ÉLECTRIQUE

Ahmed AOUCHAR



L'École des INGÉNIEURS Scientifiques

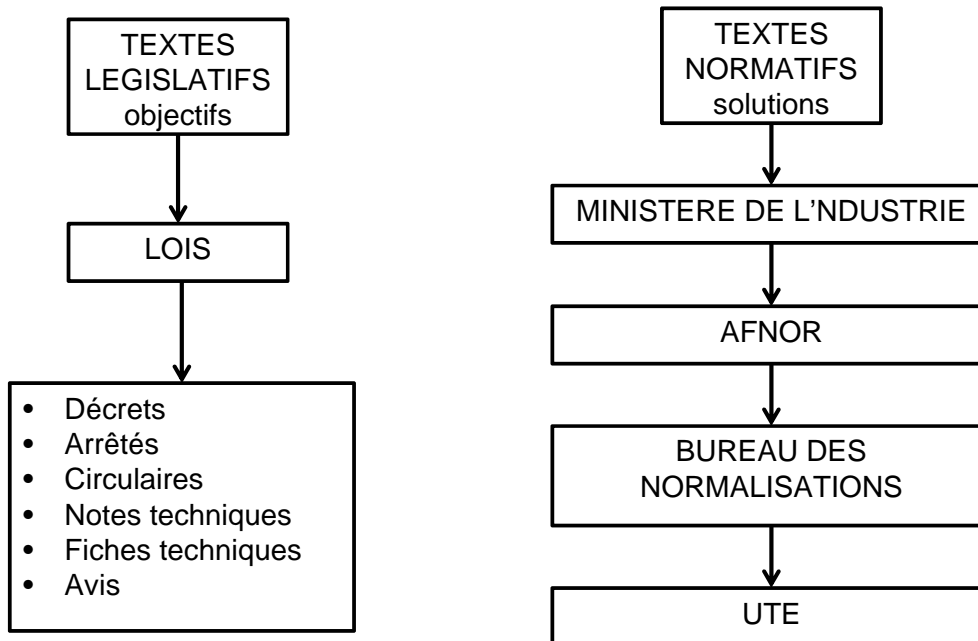


1. INTRODUCTION



- ✗ L'électricité est devenue familière par son utilisation courante en milieu industriel ou domestique.
- ✗ L'électricité est par contre pour beaucoup de personnes une notion abstraite car elle est invisible.
- ✗ Le danger est sournois car les appareils électriques ne dégagent pas d'odeur et ne changent pas de couleur lorsque le niveau de tension est dangereux.
- ✗ Les risques liés à une mauvaise utilisation sont par conséquent mal perçus, ce qui se traduit malheureusement par de nombreux accidents plus ou moins graves.
- ✗ Le risque touche les spécialistes comme les non spécialistes du domaine.
- ✗ Les normes électriques, de plus en plus draconiennes permettent de limiter chaque année le nombre d'accidents.

2. LÉGISLATION ET NORMES



3

3. ORGANISATION DES NORMES

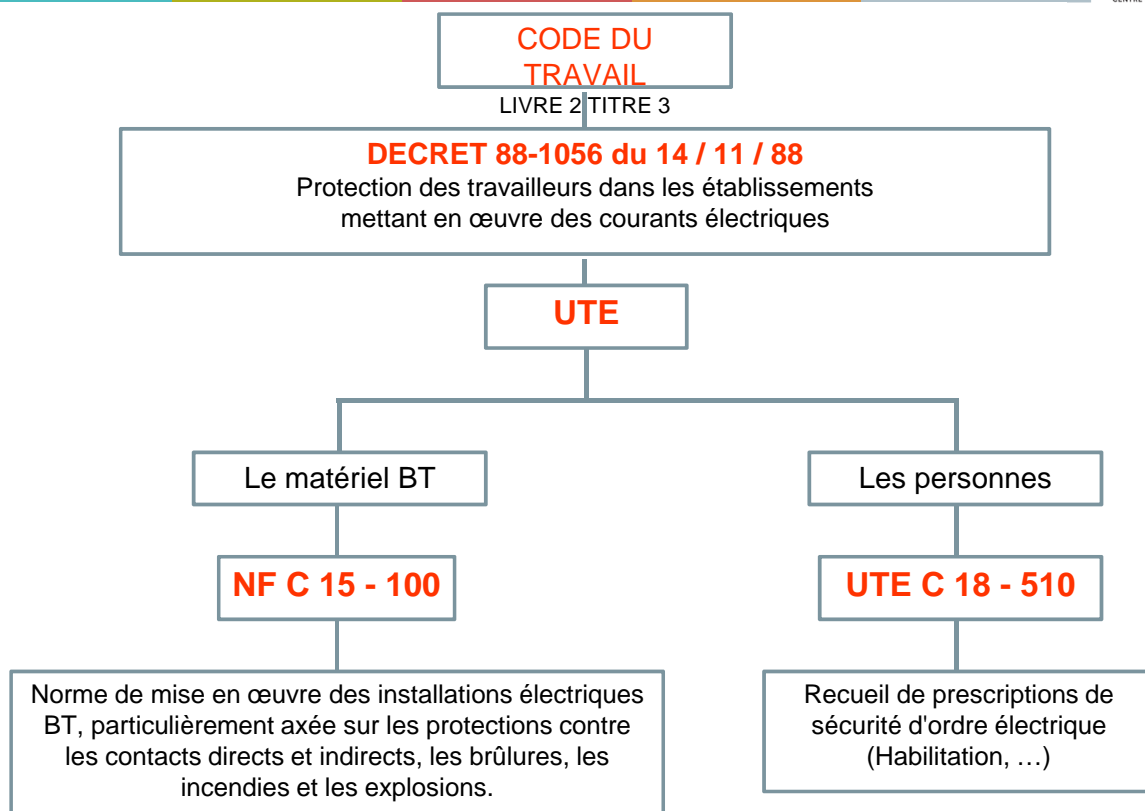
- ✗ Les normes électriques sont des recueils de règles, de prescriptions et de méthodes destinées aux constructeurs de matériel électrique et aux professionnels exposés aux risques électriques.
- ✗ Les différents organismes :

| AFNOR | Association Française de Normalisation | Normes NF C... |
|--------------|---|-----------------------|
| UTE | Union Technique de l'Electricité (associée à l'AFNOR) | Normes UTE C... |
| CEI | Commission Electrotechnique Internationale (Genève) | Normes CEI... |
| CENELEC | Comité Européen de Normalisation Electrotechnique (Bruxelles) | Normes EN... |

- ✗ Les publications internationales sont des recommandations ayant pour but une harmonisation internationale des normes en vigueur dans les différents pays.

4

4. LA RÉGLEMENTATION



5

5. STATISTIQUES

- ✗ Le nombre des accidents du travail d'origine électrique est passé de près de 3 000 avant 1975 à 771 en 2008. Il en va de même des accidents graves, dont le nombre recule de 360 en 1975 à 82 en 2008.
- ✗ Cette tendance traduit une plus large maîtrise du risque, mais les analyses de sévérité sont là pour nous en rappeler la particulière gravité.

| Accidents dus à l'électricité | | | |
|-------------------------------|----------|---------|-------|
| Année | AT-arrêt | AT - IP | Décès |
| 2008 | 771 | 82 | 9 |
| 2007 | 838 | 86 | 11 |
| 2006 | 834 | 74 | 11 |
| 2005 | 802 | 90 | 5 |
| 2004 | 865 | 79 | 22 |
| 2003 | 837 | 87 | 6 |
| 2002 | 915 | 97 | 8 |
| 2001 | 876 | 69 | 16 |
| 2000 | 888 | 84 | 12 |
| 1999 | 861 | 81 | 11 |
| 1998 | 896 | 89 | 9 |
| 1997 | 906 | 86 | 17 |
| 1996 | 916 | 99 | 19 |
| 1995 | 930 | 122 | 12 |
| 1990 | 1 308 | 177 | 35 |
| 1985 | 1 306 | 185 | 42 |
| 1980 | 1 883 | 247 | 50 |
| 1975 | 2 793 | 360 | 67 |

AT-arrêt : accidents du travail avec arrêt
 AT-IP : accidents ayant entraîné une incapacité permanente
 (source C.NAMTS)

6

6. SECTEURS D'ACTIVITÉS TOUCHÉS

| Accidents d'origine électrique selon le CTN | | | |
|--|------------|-----------|----------|
| Comités techniques nationaux | AT-arrêt | AT - IP | Décès |
| A Métallurgie | 133 | 11 | 1 |
| B Bâtiment et travaux publics | 234 | 37 | 4 |
| C Transports, EGE, Livre, Communication | 56 | 1 | 0 |
| D Alimentation | 85 | 7 | 1 |
| E Chimie, Caoutchouc, Plasturgie | 25 | 1 | 1 |
| F Bois, Ameublement, Papier-carton, Textiles, Vêtement... | 28 | 5 | 0 |
| G Commerces non Alimentaires | 54 | 5 | 1 |
| H Activités de Services I | 31 | 2 | 0 |
| I Activités de Services II et Travail Temporaire | 125 | 13 | 1 |
| Total électricité | 771 | 82 | 9 |
| Ensemble des accidents du travail | 703 976 | 44 037 | 569 |
| Pourcentage des accidents dus à l'électricité | 0,11% | 0,19% | 1,58% |

- × L'incapacité permanente peut être définie comme la perte définitive, partielle ou totale de la capacité à travailler.

7

7. PRINCIPALES CAUSES

| Accidents d'origine électrique selon l'élément matériel en cause | | | |
|--|------------|-----------|----------|
| Élément matériel | AT-arrêt | AT - IP | Décès |
| non précisé | 113 | 11 | 1 |
| non classé ci-dessous | 401 | 46 | 3 |
| Installations fixes basse tension | 159 | 12 | 2 |
| Ponts roulants | 15 | 1 | 0 |
| Machines outils portatives | 12 | 0 | 0 |
| Machines et appareils de soudure électrique | 13 | 2 | 0 |
| Lampes portatives | 6 | 1 | 0 |
| Plate-formes d'essai | 2 | 1 | 1 |
| Poste de transformation côté BT | 14 | 0 | 0 |
| Poste de transformation côté HT | 5 | 0 | 0 |
| Lignes aériennes BT | 5 | 2 | 0 |
| Lignes aériennes HT | 14 | 5 | 2 |
| Canalisations enterrées | 8 | 1 | 0 |
| Matériel à haute fréquence | 4 | 0 | 0 |
| Total électricité | 771 | 82 | 9 |

- × Dans 66 % des cas, les circonstances exactes de l'électrisation ne sont pas connues
- × 20,6 % des cas se produisent sur des installations fixes basse tension

8

8. TRANCHE D'ÂGE ET SECTEUR D'ACTIVITÉ

- ✗ Le risque relatif s'exprime par le rapport du pourcentage des accidents survenus dans une catégorie de population donnée au pourcentage de l'effectif salarié qu'elle représente.
- ✗ Supérieur à 1, il traduit une sur-accidentalité du groupe de population concernée par rapport à l'ensemble de la population étudiée et pour le risque considéré.

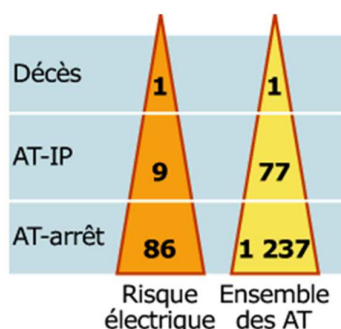
| AGE | SERVICES | BTP | INDUSTRIE | ENSEMBLE |
|-------------|----------|------|-----------|----------|
| < 25 | 2,10 | 1,45 | 2,35 | 2,03 |
| 25 – 49 ans | 0,83 | 0,89 | 0,88 | 0,85 |
| ≥ 50 | 0,91 | 1,06 | 0,78 | 0,91 |

SERVICES = Transports, commerces, services aux entreprises (conseil, publicité ...), services aux particuliers (hôtels, cafés, restaurants ...), immobilier, finance, éducation, santé ...

9

9. TRIANGLE DE SÉVÉRITÉ

- ✗ Les accidents d'origine électrique ne correspondent qu'à 0.2% des accidents du travail avec arrêt mais ils sont plus mortels.
- ✗ Les triangles de sévérité mettent en lumière la particulière gravité du risque électrique.
- ✗ Les accidents d'origine électriques sont 15 fois plus mortels que les autres.



Les origines sont diverses :

- ✗ un mode opératoire inapproprié ou dangereux.
- ✗ la méconnaissance des risques.
- ✗ l'application incomplète des procédures.
- ✗ une formation insuffisante.
- ✗ l'état du matériel, l'état du sol..

10

10. DÉFINITIONS UTE 18.510

| | |
|--------------------|---|
| Masse électrique | Éléments conducteurs accessibles, pouvant en cas de défaut, être portés à un potentiel différent de celui de la terre |
| Conducteur actif | Conducteur normalement affecté à la transmission de l'énergie électrique |
| Ouvrage électrique | Ensemble des matériels assurant la production, la distribution et l'utilisation de l'énergie électrique, |
| Travaux | Toute opération dont le but est de réaliser, de modifier, d'entretenir ou de réparer un ouvrage électrique |
| Interventions | Opérations, de courte durée et n'intéressant qu'une faible étendue de l'ouvrage |
| Manœuvres | Opérations conduisant à un changement de la configuration électrique d'un réseau |
| Installation élec. | Ensemble des appareils qui transforment et distribuent, au moyen de canalisations fixes, l'énergie électrique |
| Équipement élec. | Appareils utilisant l'énergie électrique. |

11

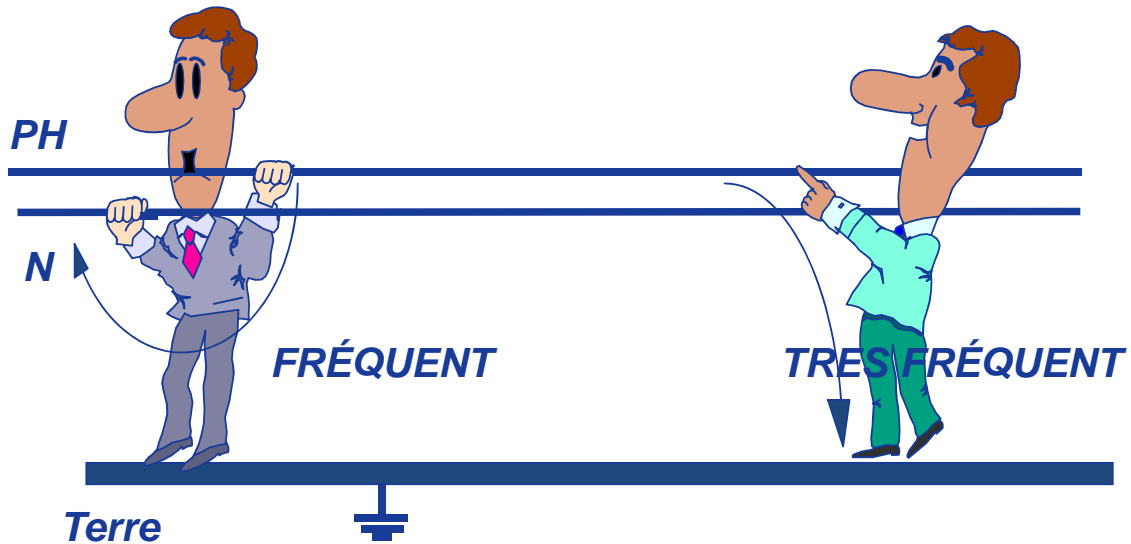
11. CAUSES ET EFFETS DES ACCIDENTS

- ✘ l'accident dépend du type de contact entre la personne et l'élément sous tension :
 1. Contact direct : contact d'une personne avec une partie active d'un circuit électrique.
 2. Contact indirect : contact d'une personne avec une masse mise sous tension accidentellement à la suite d'un défaut d'isolement.
- ✘ Les accidents d'origine électrique ont pour principaux effets :
 1. L'électrisation : c'est la réaction du corps humain due à un contact accidentel avec l'électricité.
 2. L'électrocution : c'est une électrisation qui entraîne la mort.
 3. Les brûlures par arcs et projection. (les mains et la tête sont le plus touchées)
 4. Les chutes, conséquences d'une électrisation..
 5. L'électricité peut aussi être à l'origine d'incendie ou d'explosion.

12

12. LE CONTACT DIRECT

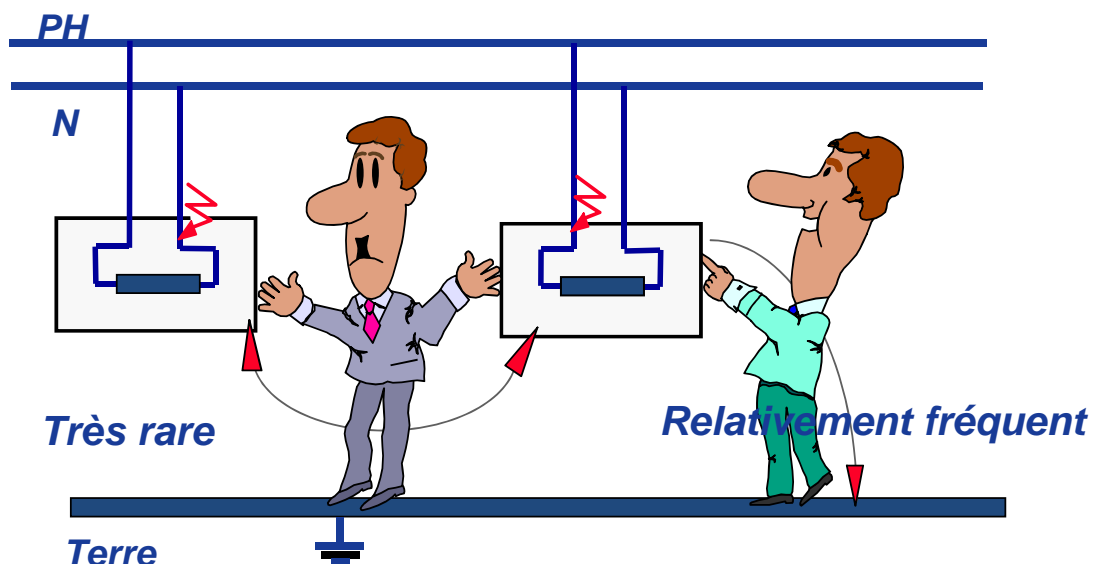
- ✗ Le contact direct représente 45% des accidentés d'origine électrique
- ✗ Le contact entre une partie active sous tension et un élément conducteur relié à la terre est **très fréquent**
- ✗ Le contact entre 2 parties actives sous tension est **fréquent**



13

13. LE CONTACT INDIRECT

- ✗ Le contact indirect représente 20% des accidentés d'origine électrique
- ✗ Le contact entre une masse mise accidentellement sous tension et un élément conducteur relié à la terre est **relativement fréquent**
- ✗ Le contact entre 2 masses mises accidentellement sous tension est **très rare**



14

14. PHÉNOMÈNE D'ÉLECTRISATION

- ✗ Le début du processus d'électrification n'est perceptible qu'à partir d'une certaine valeur de tension et du contexte.
- ✗ Un contact entre deux bornes d'une batterie de voiture (12 ou 24 V) n'occasionne aucune sensation au niveau du corps humain. Par contre, un même contact aux bornes d'une prise de courant (230 V) se traduira par une sensation douloureuse, voire un coma.
- ✗ Le corps humain est protégé par la peau. Celle-ci représente un écran (une barrière physiologique) s'opposant aux sensations de l'électricité.
- ✗ Malheureusement, une trop forte augmentation de la tension appliquée au niveau de la peau entraîne la perforation de celle-ci.
- ✗ Cette destruction de la barrière physiologique entraîne une chute de la résistance humaine face au courant électrique qui peut alors circuler facilement au risque de détruire la structure des cellules qui constituent les organes.

15 DÉFINITIONS NFC 15.100

| | |
|----------------|--|
| Conditions BB1 | La peau est sèche, le sol présente une résistance importante, y compris la présence de chaussures, et les personnes se trouvent dans des locaux (ou emplacements) secs ou humides (condition d'influences externes AD1, AD2 et AD3). |
| Conditions BB2 | La peau est mouillée, le sol présente une résistance faible, et les personnes se trouvent dans des locaux (ou emplacements) mouillés (condition d'influences externes AD4, AD5 et AD6). |
| Conditions BB3 | La peau est immergée dans l'eau, il existe une infinité de points de contact et la résistance totale du corps humain se réduit à la résistance interne (AD7, AD8). |

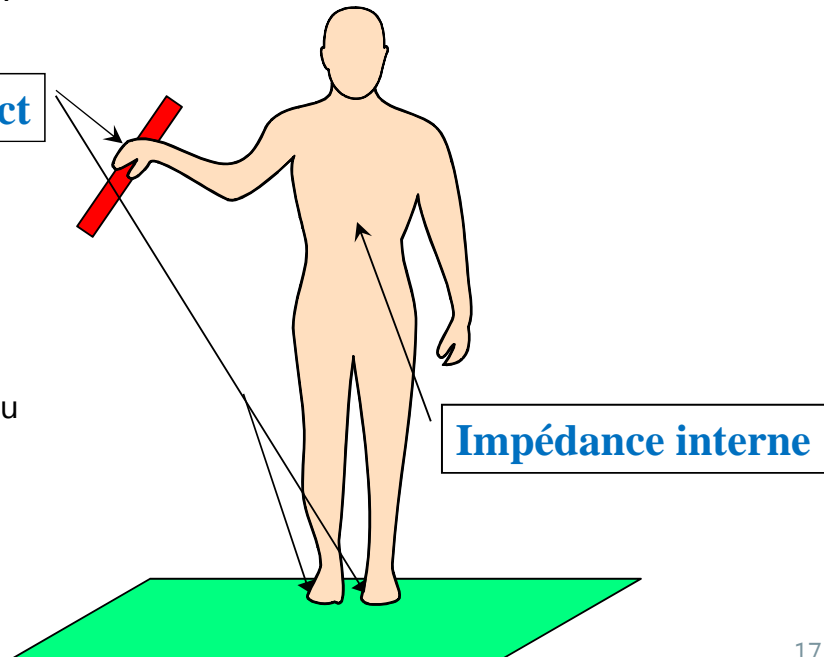
| AD | eau | AD | eau |
|-----|-------------|-----|------------|
| AD1 | Négligeable | AD5 | Jets |
| AD2 | Gouttes | AD6 | Paquets |
| AD3 | Aspersion | AD7 | Immersion |
| AD4 | Projections | AD8 | Submersion |

16.1. IMPÉDANCE DU CORPS HUMAIN

- × Les tissus du corps humain peuvent être représentés par une succession de résistances R et de réactances X , le tout constituant une impédance Z :
L'impédance : $Z^2 = R^2 + X^2$

Impédance de contact

- × L'impédance du corps humain Z résulte de la somme géométrique des impédances de la peau ou muqueuse aux points de contact Z_{p1} et Z_{p2} et de l'impédance interne des tissus Z_i .



17

16.2. PARAMÈTRES INFLUANT SUR Z

- × L'impédance de la peau varie pour chaque individu en fonction, essentiellement, des paramètres :
 1. la température de la peau
 2. la surface de contact
 3. la pression de contact
 4. la tension de contact
 5. l'état d'humidité et de sudation de la peau
 6. le temps de passage du courant

| U_{contact} (V) | R (Ω) | | |
|--------------------------|------------------|-----|-----|
| | BB1 | BB2 | BB3 |
| 25 | 1725 | 925 | 500 |
| 50 | 1625 | 825 | 440 |
| 110 | 1535 | 730 | 400 |
| 230 | 1375 | 660 | 350 |
| 350 | 1365 | 565 | 325 |

18

17.1. EFFETS DE LA TENSION

EN ALTERNATIF

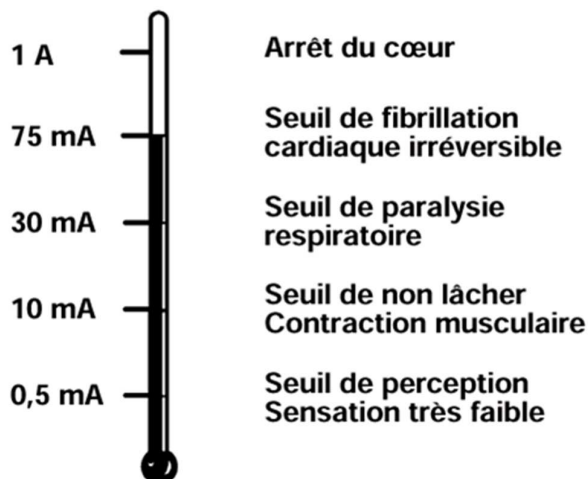
- ✗ en dessous de 50 V absence d'accident mortel
- ✗ entre 50 et 500 V, on constate de plus grand pourcentage de fibrillation cardiaque
- ✗ pour des tensions de l'ordre de 500 à 1 000 V il y a principalement syncope respiratoire et brûlures
- ✗ à partir d'environ 1 000 V les brûlures internes de type hémorragique avec libération de myoglobine (blocage des reins)

EN CONTINU

- ✗ en dessous de 120 V absence d'accident mortel
- ✗ entre 120 et 750 V, tensions peu répandues, où l'on constate des effets d'électrolyse et des brûlures par effet Joule
- ✗ à partir d'environ 750 V les accidents entraînent surtout des brûlures internes et externes

17.2. EFFETS DU COURANT

EN ALTERNATIF

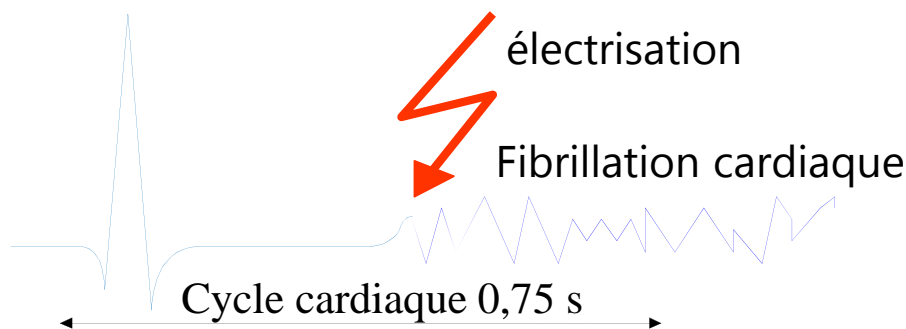
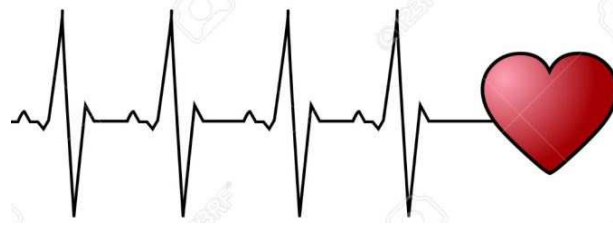


EN CONTINU



17.3. LA FIBRILLATION CARDIAQUE

- ✗ Le cœur possède son propre rythme cadencé automatique.
- ✗ En cas d'électrisation, il s'affole et perd sa cadence : on parle de fibrillation cardiaque).



21

17.4. LES BRÛLURES

L'ARC ÉLECTRIQUE

- ✗ Les brûlures par arc sont dues à l'intense chaleur dégagée par effet Joule au cours de la production de l'arc électrique ainsi qu'aux projections de particules métalliques en fusion. Ce sont les plus fréquentes tant en basse tension, qu'en haute tension.
- ✗ En basse tension elles sont localisées aux parties découvertes (mains et faces).
- ✗ Les arcs peuvent entraîner également des conjonctivites, des brûlures cornéennes.

L'EFFET JOULE

- ✗ Les brûlures électrothermiques sont provoquées par l'énergie dissipée par effet Joule tout le long du trajet du courant.
- ✗ Ces brûlures sont toujours plus étendues qu'elles n'apparaissent lors d'un premier examen, car aux brûlures superficielles s'associent des brûlures profondes, le long du trajet du courant, et en particulier au niveau des masses musculaires.

22

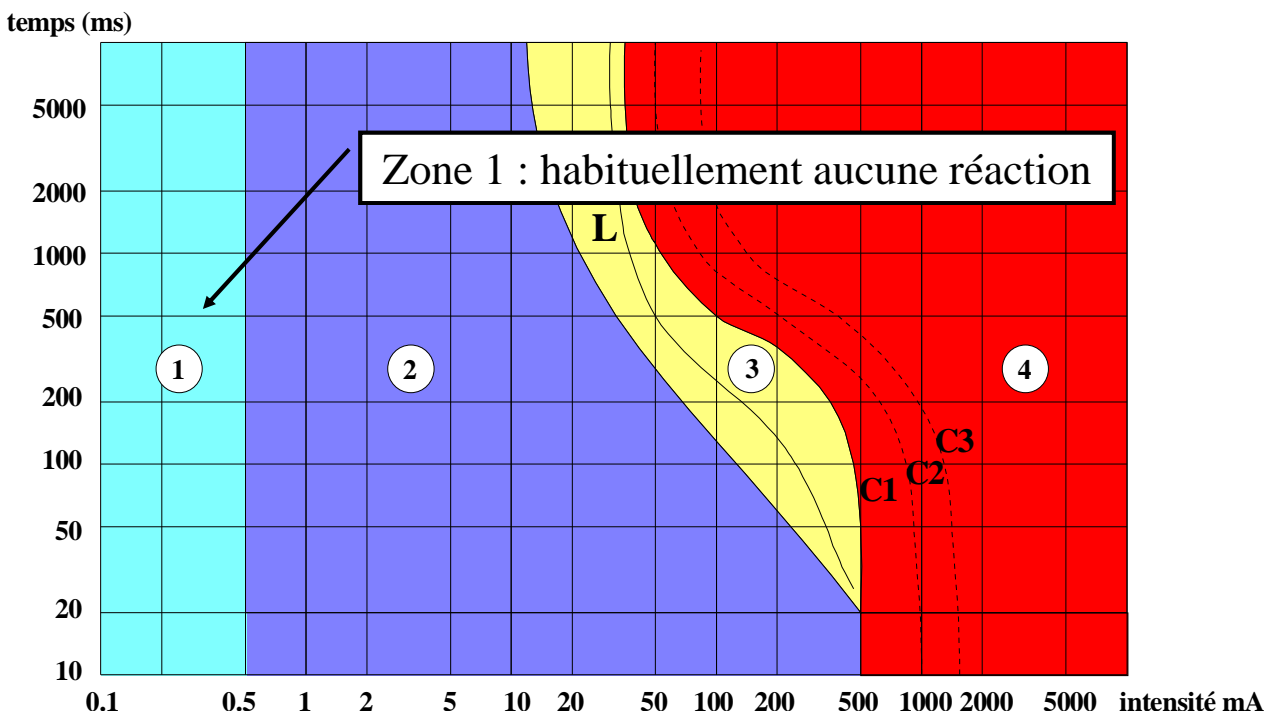
LES MUSCLES MOTEURS

- ✗ Les muscles moteurs assurent par leur contraction et leur élasticité les mouvements du corps.
- ✗ Le cerveau ne contrôle plus les muscles parcourus par un courant électrique, ce qui a pour effet de provoquer de violentes contractions.
- ✗ Ces conditions, générant des mouvements intempestifs, se traduisent par le non lâcher de l'objet en contact.

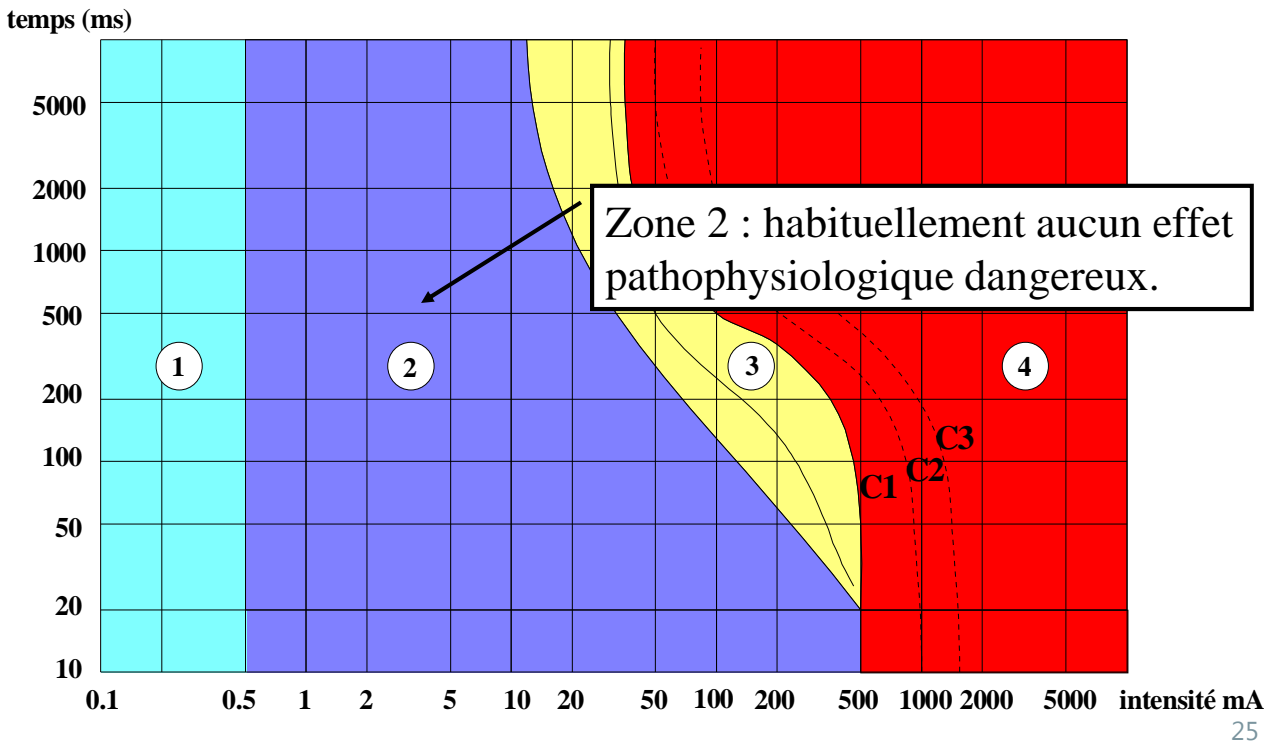
MUSCLES AUTO REFLEXES

- ✗ La cage thoracique fonctionne automatiquement sous le contrôle du cervelet qui commande les nombreux muscles concernés (diaphragme notamment).
- ✗ L'asphyxie d'origine respiratoire peut donc être due à l'action du courant électrique au niveau des muscles thoracique ou du cervelet provoquant l'arrêt respiratoire.

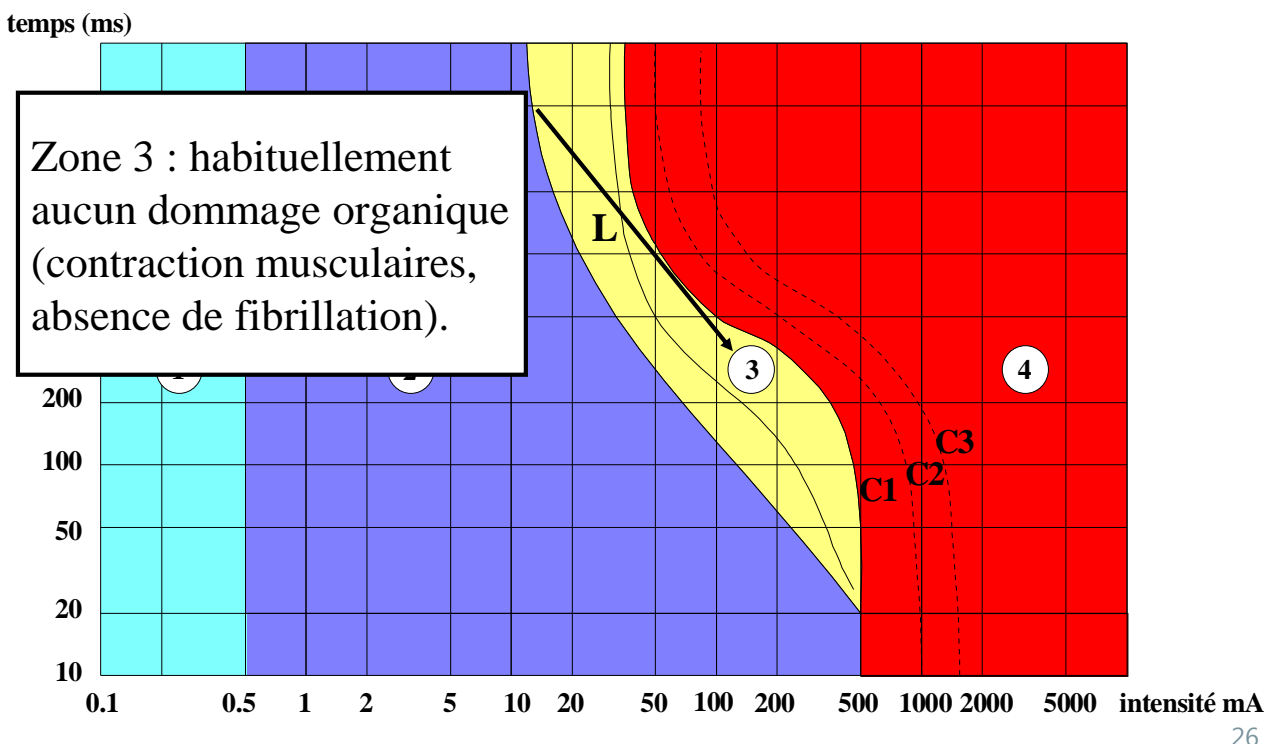
18.1. CARACTÉRISTIQUE COURANT-TEMPS



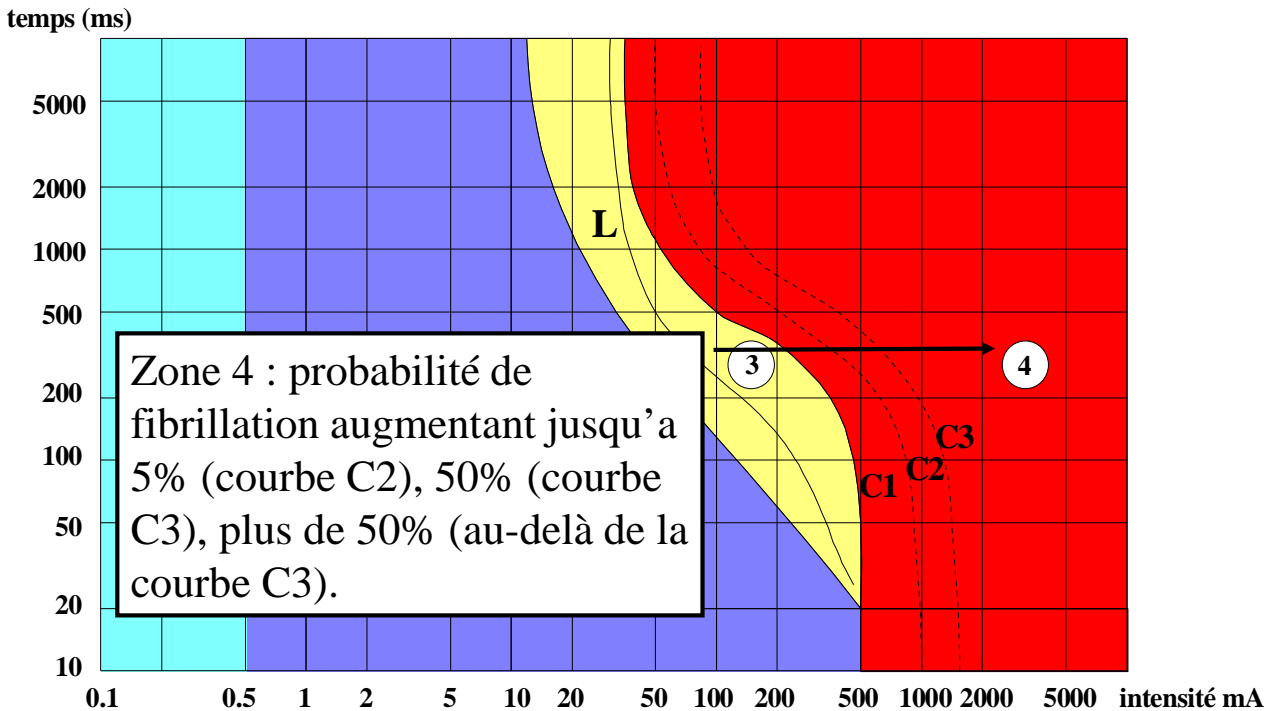
18.2. ZONE DE SÉCURITÉ



18.3. DÉBUT DU DANGER

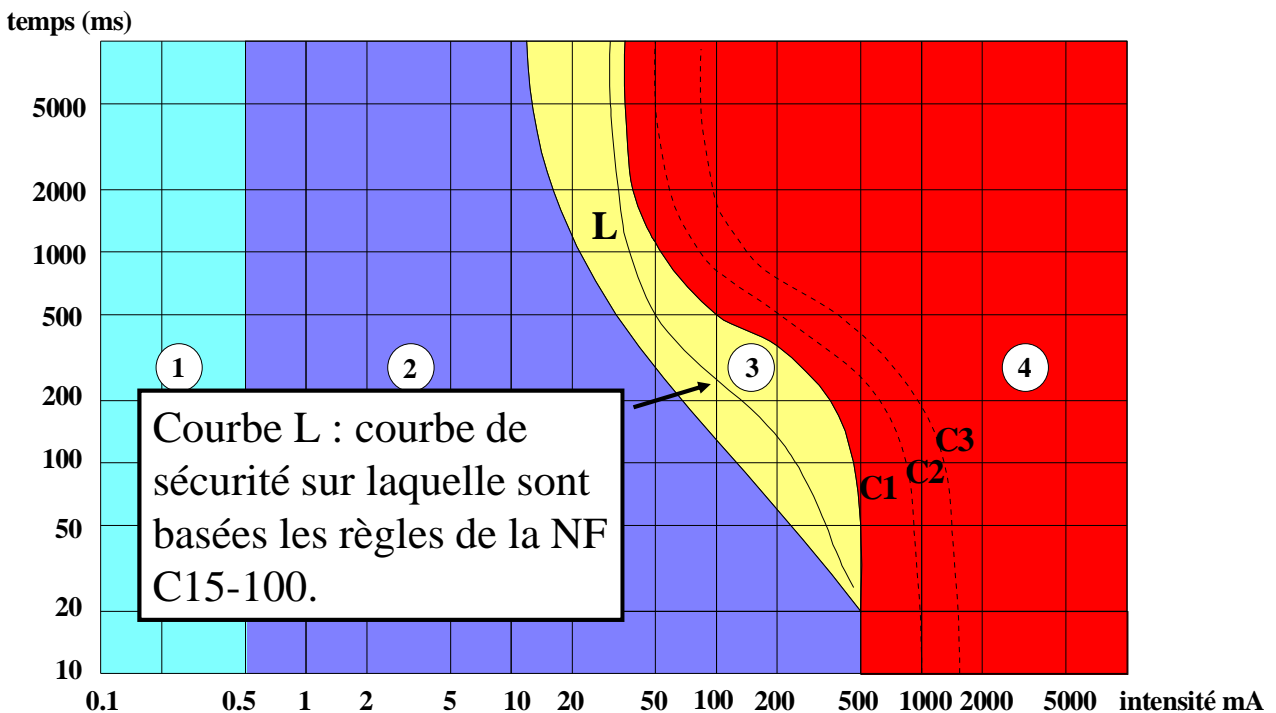


18.4. ZONE DANGEREUSE



27

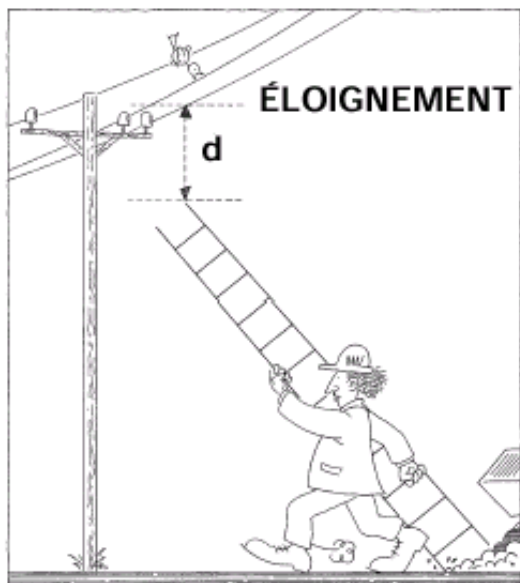
18.5. COURBE DE SÉCURITÉ



28

19.1. PROTECTION CONTRE LE CONTACT DIRECT

- ✗ Eloignement des pièces nues sous tension, c'est une protection collective.



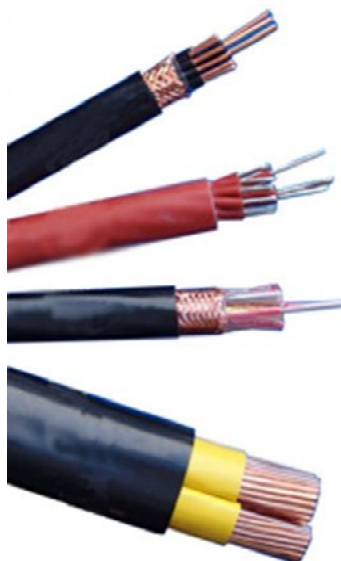
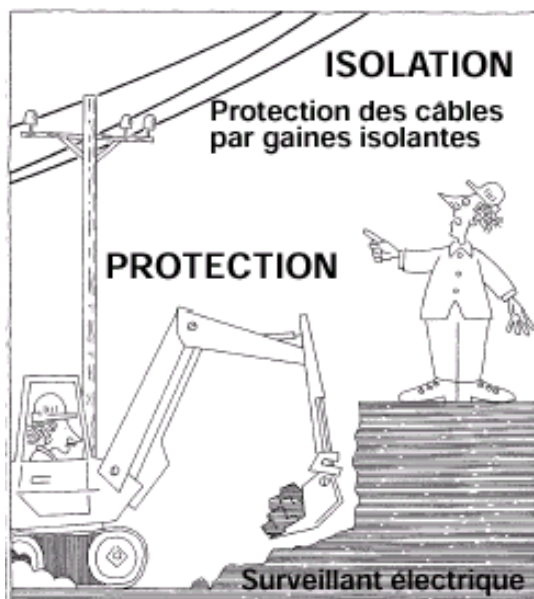
Exemple pour les lignes HT

| Tension Nominale | Jardins, prairies, champs | Croisement de voirie |
|------------------|---------------------------|----------------------|
| 70 kV | 7.2 m | 8.2 m |
| 150 kV | 8.0 m | 9.0 m |
| 220 kV | 8.7 m | 9.7 m |

29

19.2. ISOLATION DES CONDUCTEURS ACTIFS

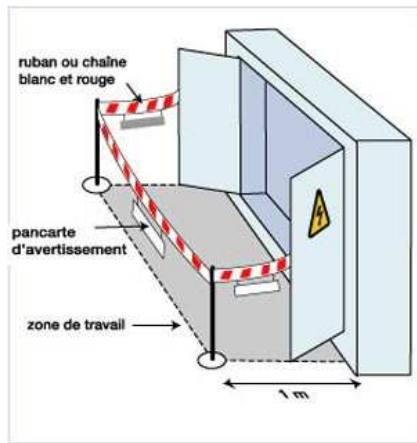
- ✗ L'isolation des conducteurs actifs constitue une protection intrinsèque.



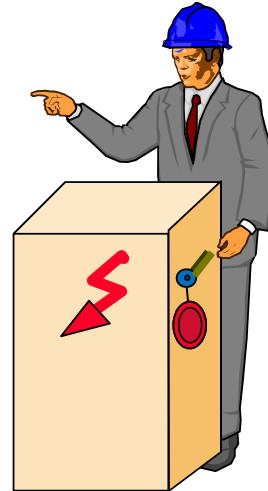
30

19.3. SÉCURISER L'ESPACE

- ✗ La mise en place d'écrans mettant hors de portée des sites dangereux, c'est une protection collective



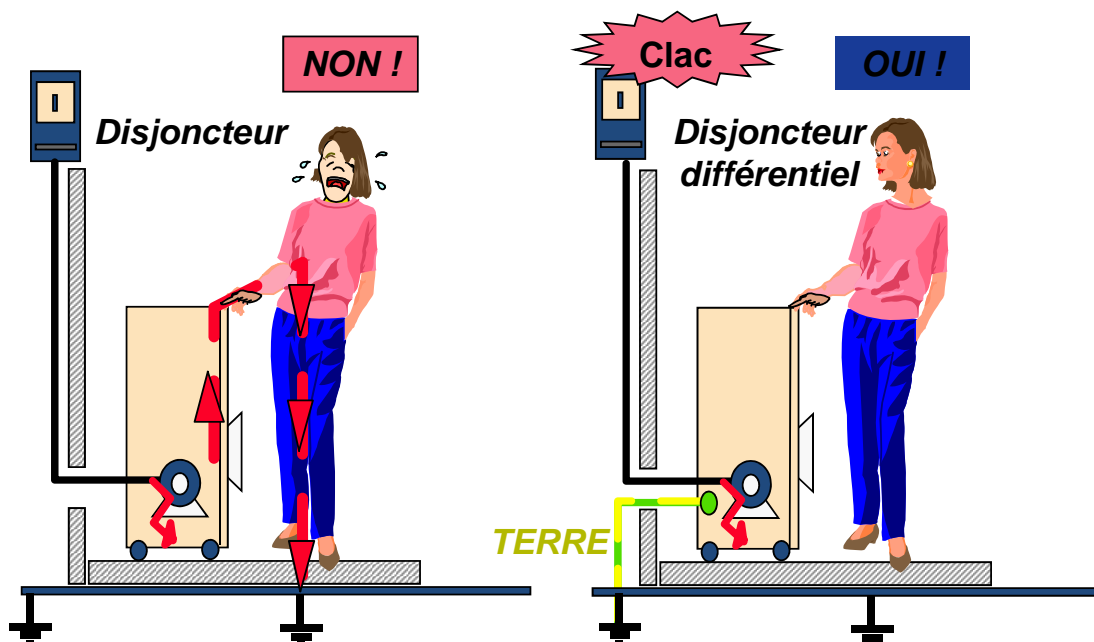
Balises autour d'une armoire électrique ouverte © IRE



31

20.1. PROTECTION CONTRE LE CONTACT INDIRECT



- ✗ Il faut couper rapidement l'alimentation en cas de défaut : c'est le rôle du disjoncteur différentiel.



32

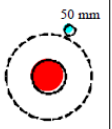

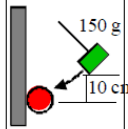
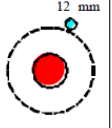
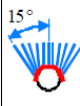
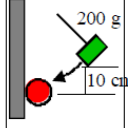
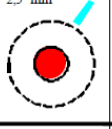
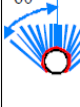
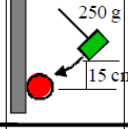
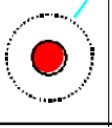

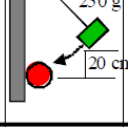
20.2. APPAREILS DE CLASSE 2 OU 3

- ✗ L'emploi d'appareils de classe 2, qui possèdent une double isolation, permet de protéger les utilisateurs.

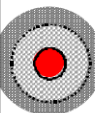
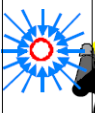
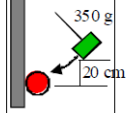


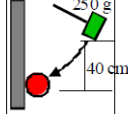
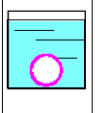
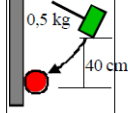
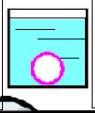
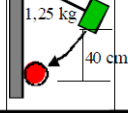
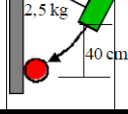
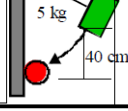
| Les classes des matériels électriques | | | |
|---------------------------------------|--|--|---|
| Classes | Caractéristiques | Emploi | Symbole |
| 0 | <ul style="list-style-type: none"> ■ isolation principale ■ pas de possibilité de relier les masses entre elles ou à la terre | Utilisation interdite sur les lieux de travail. | Pas de symbole |
| I | <ul style="list-style-type: none"> ■ isolation principale ■ masses reliées entre elles et à la terre | Utilisation possible sur les lieux de travail pour les machines fixes |  |
| II | <ul style="list-style-type: none"> ■ isolation renforcée (double isolation) ■ masses non reliées à la terre | Utilisation possible sur les lieux de travail pour les machines non fixes |  |
| III | <ul style="list-style-type: none"> ■ alimentation en très basse tension de sécurité (TBTS) ou de protection ■ masses non reliées à la terre ■ alimentation sécurisée (transformateur de sécurité) | Obligatoire sur les appareils portatifs, non fixes en milieu confiné humide ou mouillé | Indication de la tension nominale (maximale) |

33

21.1. LES INDICES DE PROTECTION

| Protection contre les corps solides | | | Protection contre les liquides | | | Protection mécanique | | |
|-------------------------------------|---|---|--------------------------------|---|--|----------------------|---|------------------------|
| IP | test | définition | IP | test | définition | IK | test | définition |
| 0 | | Pas de protection | 0 | | Pas de protection | 00 | | Pas de protection |
| 1 |  | Protégé contre les corps solides supérieurs à 50 mm. | 1 |  | Protégé contre les chutes verticales de gouttes d'eau | 01 |  | Energie de choc 0,15 j |
| 2 |  | Protégé contre les corps solides supérieurs à 12 mm. | 2 |  | Protégé contre les chutes de gouttes d'eau jusqu'à 15 ° de la verticale. | 02 |  | Energie de choc 0,2 j |
| 3 |  | Protégé contre les corps solides supérieurs à 2,5 mm. | 3 |  | Protégé contre les chutes de gouttes d'eau jusqu'à 60 ° de la verticale. | 03 |  | Energie de choc 0,37 j |
| 4 |  | Protégé contre les corps solides supérieurs à 1 mm. | 4 |  | Protégé contre les projection d'eau de toutes les directions. | 04 |  | Energie de choc 0,5 j |

34

| | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|--|---|----|---|---|---------------|---|--------------------------|---|---------------------|---|---|--|----|---|------------------------|
| 5 |  | Protégé contre les poussières (pas de dépôt nuisible). | 5 |  | Protégé contre les jets d'eau à la lance et de toutes les directions. | 05 |  | Energie de choc 0.7 j | | | | | | | | |
| 6 |  | Totalement protégé contre les poussières.. | 6 |  | Protégé contre les projections d'eau assimilables aux paquets de mer. | 06 |  | Energie de choc 1 j | | | | | | | | |
| <p>Lettre additionnelle: Elle correspond à la protection des personnes contre l'accès aux parties dangereuses.</p> <table border="1"> <tr> <td>A</td> <td>avec le dos de la main</td> </tr> <tr> <td>B</td> <td>avec le doigt</td> </tr> <tr> <td>C</td> <td>avec un outil de 2,5 mm</td> </tr> <tr> <td>D</td> <td>avec un fil de 1 mm</td> </tr> </table> | | | A | avec le dos de la main | B | avec le doigt | C | avec un outil de 2,5 mm | D | avec un fil de 1 mm | 7 |  | Protégé contre les effets de l'immersion entre 0,15 et 1m. | 07 |  | Energie de choc 2 j |
| | | | A | avec le dos de la main | | | | | | | | | | | | |
| | | | B | avec le doigt | | | | | | | | | | | | |
| | | | C | avec un outil de 2,5 mm | | | | | | | | | | | | |
| D | avec un fil de 1 mm | | | | | | | | | | | | | | | |
| 8 |  | Protégé contre les effets prolongés de l'immersion sous pression. | 08 |  | Energie de choc 5 j | | | | | | | | | | | |
| 09 |  | Energie de choc 10 j | | | | | | | | | | | | | | |
| 10 |  | Energie de choc 20 j | | | | | | | | | | | | | | |

21.2. ÉQUIPEMENTS DE PROTECTION (EPI)

- ✗ Les EPI doivent être conformes aux exigences essentielles de sécurité et santé de la directive européenne 89/686/CEE et faire l'objet du marquage de conformité CE.
- ✗ Cet équipement est composé de :
 1. Un casque isolant et antichoc, conforme à la norme NF EN 397.
 2. Une paire de gants isolants, conformes à la norme NF EN 60 903 et marqués d'un triangle double.
 3. Un écran facial anti UV, pour la protection contre les arcs électriques et les courts circuits, conforme à la norme NF EN 166.
 4. Des chaussures ou bottes isolantes de sécurité, conformes à la norme NF EN 345.
 5. Une combinaison de travail en coton ou en matériau similaire.
 6. Un protèges-bras isolants, conformes à la norme NF EN 60 984

LES ÉQUIPEMENTS INDIVIDUELS DE SÉCURITÉ (EIS) :

- ✗ Des tapis, échelles, perches et tabourets isolants
- ✗ Des outils à isolation renforcés, marqués du symbole
- ✗ Des cadenas et des étiquettes de consignation
- ✗ Des VAT (vérificateur d'absence de tension)
- ✗ Des dispositifs de MALT et CCT.

LES ÉQUIPEMENTS COLLECTIFS DE SÉCURITÉ (ECS) :

- ✗ Des écrans de protection (nappe isolante, tôle épaisse mise à la terre...)
- ✗ Délimitation de l'emplacement de travail par un balisage et une pancarte d'avertissement de travaux
- ✗ Utilisation des baladeuses conformes à la réglementation.

37

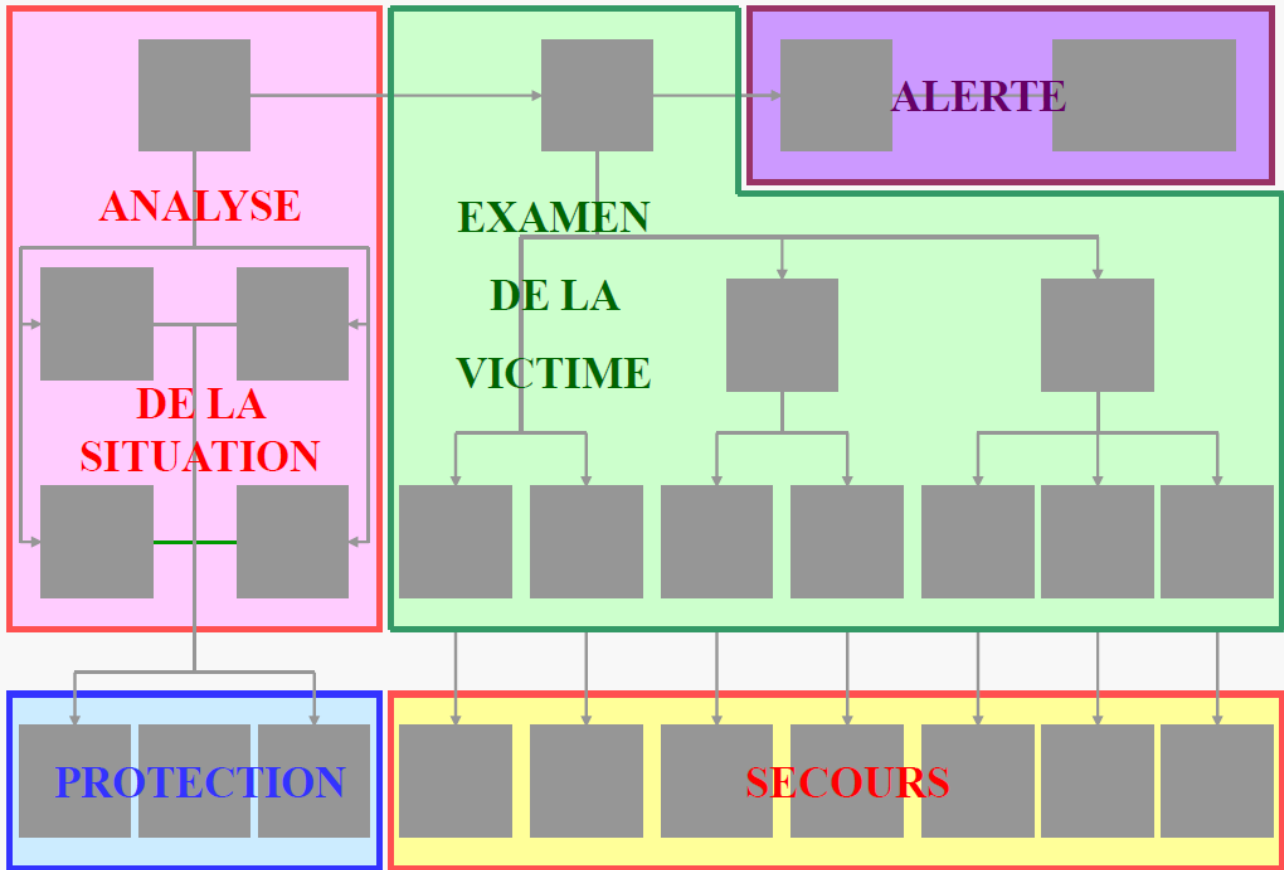
22.1. LE SECOURS AU TRAVAIL

Le sauveteur-secouriste du travail doit :

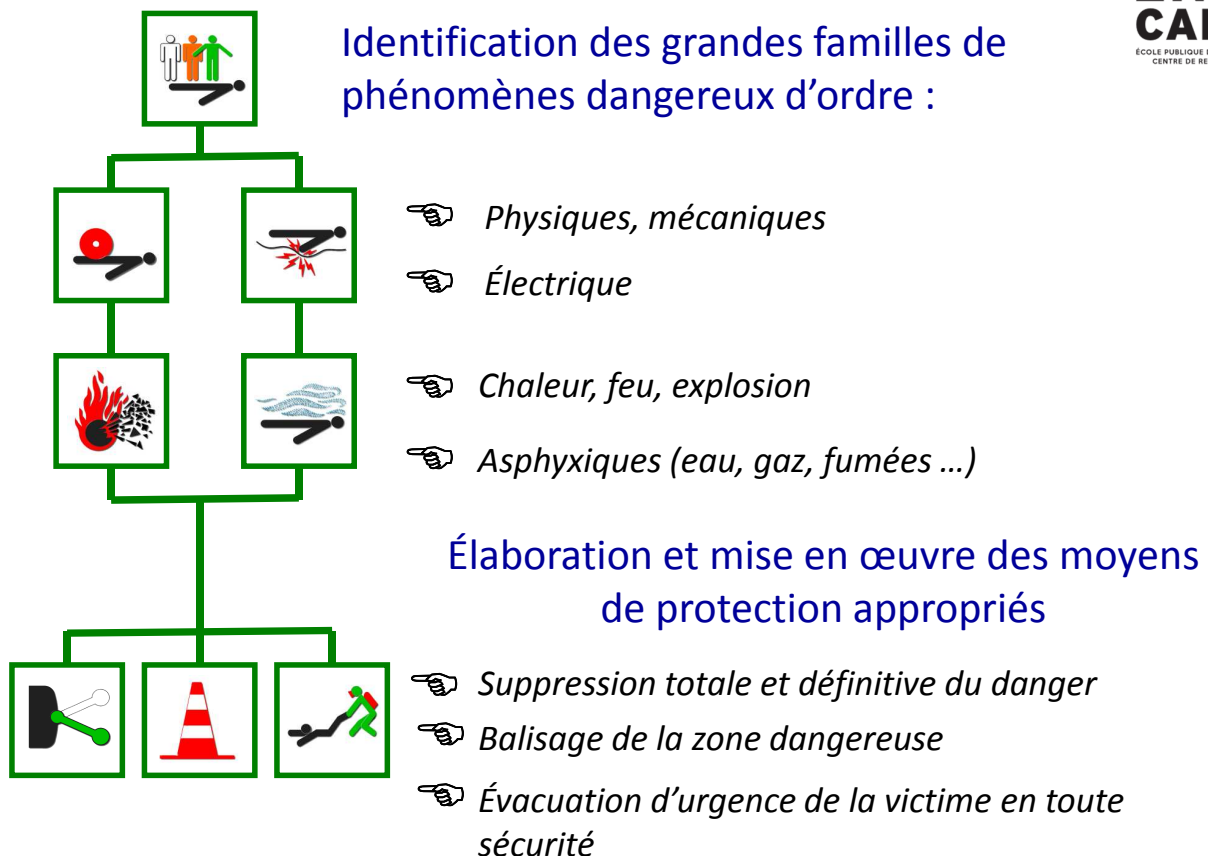
1. Connaître les risques propres à son entreprise
 2. Connaître l'emplacement du matériel de secours (brancards, trousse de secours...)
 3. Faire en sorte que le matériel de secours soit en état et à portée de main
 4. Connaître l'emplacement et le contenu des registres d'hygiène et sécurité
 5. Connaître les services de secours et savoir les alerter
- ✗ Le SST doit avoir les connaissances suffisantes pour se protéger lui-même et autrui, alerter et porter secours à la victime avec des gestes simples
 - ✗ Il doit prévenir les complications immédiates des lésions corporelles résultant de l'accident mais non en réparer les conséquences
 - ✗ Le plan d'intervention est un aide pédagogique facilitant la mémorisation, par le SST, de l'enchaînement des actions à mener en fonction de la nature de l'accident et de l'état de la victime

38

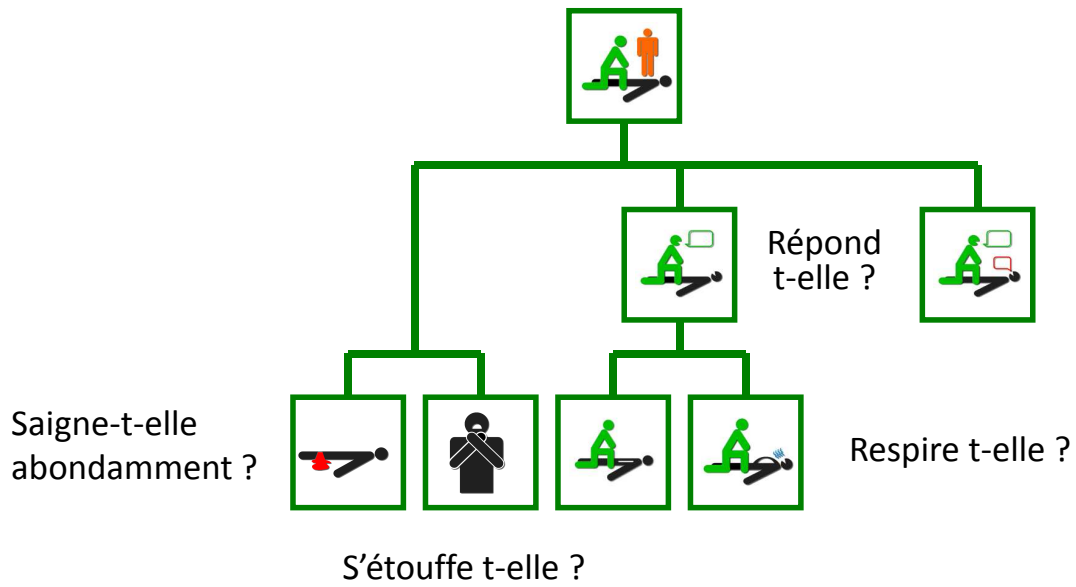
PLAN D'INTERVENTION



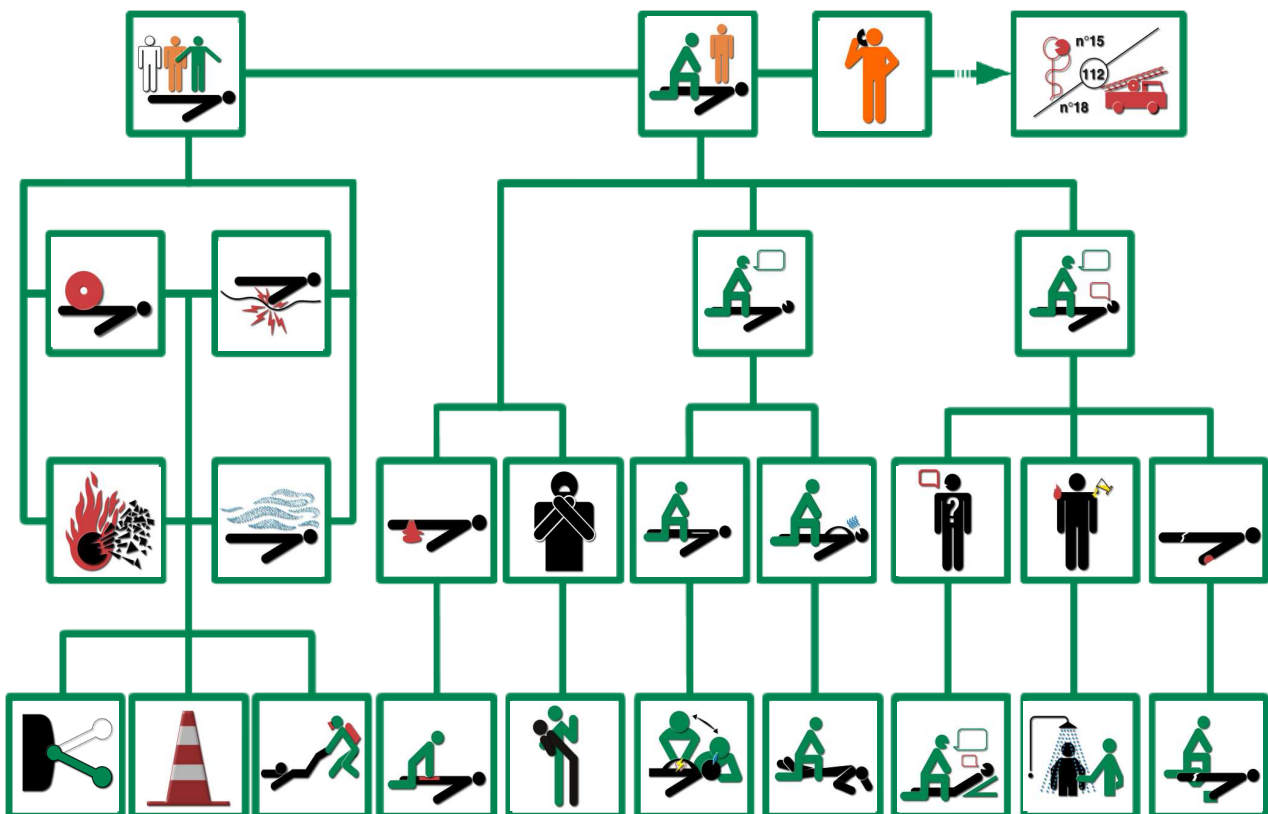
RECHERCHER LES RISQUES



EXAMINER LA VICTIME



41



PROTÉGER ALERTER SECOURIR

42

TRANSFORMATEUR



ENSICAEN
ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'INGÉNIEURS DE CAEN
LE CENTRE DU MONDIALISME

1. Introduction

Un **transformateur** est un convertisseur d'énergie électrique. Son rôle est de convertir les valeurs des courants/tensions délivrés par une source en des valeurs différentes pour une charge. En sinusoïdal, la fréquence du signal est préservée, seules les amplitudes des grandeurs sont modifiées. Il s'agit donc d'une conversion \sim/\sim ou AC/AC :

... à la découverte des transformateurs

1. Introduction

2. Transfo. Monophasé

3. Transfo. Triphasé

4. Transfo. Spéciaux

3

ENSICAEN
ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'INGÉNIEURS DE CAEN
LE CENTRE DU MONDIALISME

1. Introduction

Les transformateurs possèdent un **excellent rendement**, >98% selon leur process de fabrication et la puissance de travail. Voici les deux principaux symboles électriques rencontrés :

Symbole modélisant le rapport de transformation ainsi que l'isolation galvanique

Symbole modélisant des inductances couplées ainsi qu'une isolation galvanique avec utilisation d'un circuit magnétique

... à la découverte des transformateurs

1. Introduction

2. Transfo. Monophasé

3. Transfo. Triphasé

4. Transfo. Spéciaux

4

2. Transformateur Monophasé

5

ENSICAEN
ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'INGÉNIEURS DE CAEN
LE CENTRE DE RECHERCHE

2. Transformateur monophasé

Nous allons nous attarder sur l'étude du **transformateur monophasé**. Cette présentation sera principalement découpée en 4 parties :

- **Technologie** : architecture d'un transformateur monophasé, matériaux, fabrication ...
- **Electromagnétisme** : rappels de base !
- **Modèle de l'Electrotechnicien** : inductances magnétisante saturable et de fuites réparties
- **Modèle de l'Electronicien** : inductances propres des enroulements et mutuelle

... à la découverte des transformateurs

1. Introduction
2. Transfo. Monophasé
 - Technologie
 - Electromagnétisme
 - Modèle Electrotech.
 - Modèle Electronique
3. Transfo. Triphasé
4. Transfo. Spéciaux

6

ENSICAEN
ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'INGÉNIEURS DE CAEN
LE CENTRE DE RECHERCHE

2. Transformateur monophasé - Technologie

Prenons quelques exemples de transformateurs et d'applications :

... à la découverte des transformateurs

1. Introduction
2. Transfo. Monophasé
 - Technologie
 - Electromagnétisme
 - Modèle Electrotech.
 - Modèle Electronique
3. Transfo. Triphasé
4. Transfo. Spéciaux

Transformateur sur Poteau 20kV/230V

Autotransformateur 500kV
(les transformations 400kV/225kV se font systématiquement via autotransformateur)

Transformateur 230V/12V-24V

7

ENSICAEN
ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'INGÉNIEURS DE CAEN
LE CENTRE DE RECHERCHE

2. Transformateur monophasé - Technologie

Un **transformateur** effectue un transfert d'énergie électromagnétique direct (sans stockage). Nous parlerons de préférence d'inductances couplées lorsque nous chercherons à effectuer un stockage d'énergie (Flyback, Forward ...):

... à la découverte des transformateurs

1. Introduction
2. Transfo. Monophasé
 - Technologie
 - Electromagnétisme
 - Modèle Electrotech.
 - Modèle Electronique
3. Transfo. Triphasé
4. Transfo. Spéciaux

Structure simplifiée sur papier (1 colonne + 1 jambe de retour)

Puissance Absorbée → Puissance Utile

Primaire Secondaire

8

2. Transformateur monophasé - Technologie

... à la découverte des transformateurs

1. Introduction

2. Transfo. Monophasé


- Technologie
- Electromagnétisme
- Modèle Electrotech.
- Modèle Electronique

3. Transfo. Triphasé

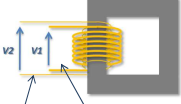
4. Transfo. Spéciaux

Un **transformateur** est essentiellement constitué d'enroulement assurant un transfert électromagnétique direct d'énergie entre primaire et secondaire. Le circuit magnétique permet de canaliser au mieux les lignes de champ (ou induction) :

Structure simplifiée sur papier (1 colonne + 1 jambe de retour)



Structure simplifiée en réalité (1 colonne + 1 jambe de retour)



Basse Tension dessous
Haute Tension dessus (isolation)

9

2. Transformateur monophasé - Technologie

... à la découverte des transformateurs

1. Introduction

2. Transfo. Monophasé

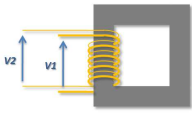
- Technologie
- Electromagnétisme
- Modèle Electrotech.
- Modèle Electronique

3. Transfo. Triphasé

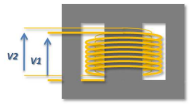
4. Transfo. Spéciaux

Il existe différents types de structures pour les circuits magnétiques. Chaque forme amenant son lot d'avantages et d'inconvénients :

Structure simplifiée en réalité (minimisation fuites, plus coûteux)



Structure simplifiée en réalité - très rencontrée ! (1 colonne + 2 jambes de retour). Minimisation fuites



10

2. Transformateur monophasé - Technologie

... à la découverte des transformateurs

1. Introduction

2. Transfo. Monophasé

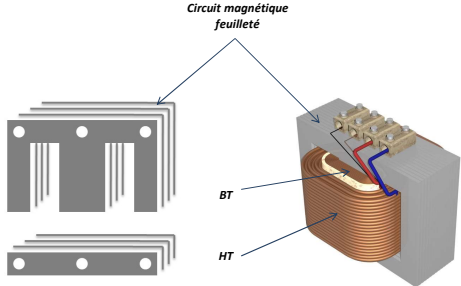
- Technologie
- Electromagnétisme
- Modèle Electrotech.
- Modèle Electronique

3. Transfo. Triphasé

4. Transfo. Spéciaux

Quelque soit la forme du circuit magnétique, il est le plus souvent constitué de feuilles de tôles (minimisation des pertes par courants de Foucault) :

Circuit magnétique feuilleté



BT
HT

11

2. Transformateur monophasé - Technologie

... à la découverte des transformateurs

1. Introduction

2. Transfo. Monophasé

- Technologie
- Electromagnétisme
- Modèle Electrotech.
- Modèle Electronique

3. Transfo. Triphasé

4. Transfo. Spéciaux

Le choix des matériaux utilisés est également essentiel :

- **FeSi (3% de silicium)** : peu coûteux, forte perméabilité (bonne conduction magnétique) et forte résistivité (minimisation pertes par courants de Foucault)
- **FeCo** : coûteux, mais matériaux légers (aéronautique, aérospatiale ...)
- **FeNi** : coûteux, mais perméabilité très élevée (militaire – exemple : minimisation rayonnement dans sous-marin ...)

12

2. Transformateur monophasé - Technologie

... à la découverte des transformateurs

1. Introduction

2. Transfo. Monophasé

- Technologie
- Electromagnétisme
- Modèle Electrotech.
- Modèle Electronique

3. Transfo. Triphasé

4. Transfo. Spéciaux

Prenons l'exemple d'un transformateur triphasé :

13

2. Transformateur monophasé - Technologie

... à la découverte des transformateurs

1. Introduction

2. Transfo. Monophasé

- Technologie
- Electromagnétisme
- Modèle Electrotech.
- Modèle Electronique

3. Transfo. Triphasé

4. Transfo. Spéciaux

Il est possible de connaître les modes de refroidissement internes et externes en regardant la plaque signalétique d'un transformateur :

XXXX (2 ou 4 lettres)

Fluide de refroidissement interne en contact avec les enroulements

Mode de circulation du fluide interne

Fluide de refroidissement externe

Mode de circulation du fluide externe

O = huile minérale ou liquide isolant ≤ 300°C
 K = liquide isolant > 300°C
 L = non mesurable

N = naturel
 F = Forcé
 D = Forcé et dirigé

A = air
 W = eau

N = naturel
 F = Forcé (ventilateurs, pompes)

14

2. Transformateur monophasé - Technologie

... à la découverte des transformateurs

1. Introduction

2. Transfo. Monophasé

- Technologie
- Electromagnétisme
- Modèle Electrotech.
- Modèle Electronique

3. Transfo. Triphasé

4. Transfo. Spéciaux

Prenons un exemple de la société **France transfo**, fabricant de transformateurs appartenant au groupe Schneider Electric :

Fluide et mode de refroidissement externe

A = air
 N = naturel

ONAN

15

2. Transformateur monophasé - Technologie

... à la découverte des transformateurs

1. Introduction

2. Transfo. Monophasé

- Technologie
- Electromagnétisme
- Modèle Electrotech.
- Modèle Electronique

3. Transfo. Triphasé

4. Transfo. Spéciaux

Continuons l'analyse de la plaque signalétique :

Année de fabrication

Transformateur triphasé (???)

Fréquence nominale de travail

N° de série

Puissance apparente nominale

Tensions possibles côté haute tension en fonction des impédances totales ramenées au secondaire (fuites magnétiques + pertes joules)

Permet de retrouver expérimentalement l'impédance totale ramenée au secondaire (fuites magnétiques + pertes joules)

Valeurs tensions nominales possibles au secondaire

Masse du transformateur

Valeurs courants nominales possibles au secondaire

16

2. Transformateur monophasé – Electromagnétisme

... à la découverte des transformateurs

1. Introduction


2. Transfo. Monophasé

- Technologie
- Electromagnétisme
- Modèle Electrotech.
- Modèle Electronique

3. Transfo. Triphasé

4. Transfo. Spéciaux

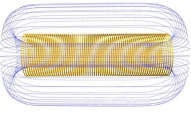
L'un des théorème à la base de l'électrotechnique est le **Théorème d' Ampère** :



$$\oint_{\tau} \vec{B}_0 \cdot d\vec{l} = \mu_0 \cdot \sum I_{\text{courants Traversants}}$$

$$\oint_{\tau} \vec{H} \cdot d\vec{l} = \sum I_{\text{courants Traversants}}$$

L'élément magnétique autour duquel est construit la théorie des machines et des transformateurs est le **Solénoïde** :



17

2. Transformateur monophasé – Electromagnétisme

... à la découverte des transformateurs

1. Introduction

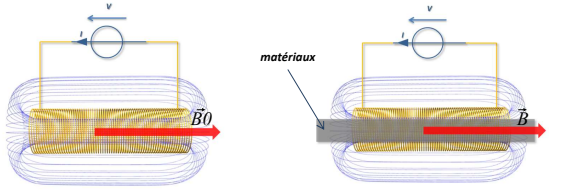
2. Transfo. Monophasé

- Technologie
- Electromagnétisme
- Modèle Electrotech.
- Modèle Electronique

3. Transfo. Triphasé

4. Transfo. Spéciaux

Découvrons l'influence d'un matériaux magnétique (ferromagnétique en Electrotechnique) :



Induction dans le vide (T) $\vec{B}_0 = \mu_0 \cdot \vec{H}$ Excitation magnétique (A/m)

Induction dans le matériaux (T) $\vec{B} = \mu_r \cdot \mu_0 \cdot \vec{H}$ Perméabilité relative du matériaux

Perméabilité relative du matériaux (fonction non-linéaire, ~10000 en MAX pour le fer) $\mu_r = 1 + \chi$ Susceptibilité Magnétique (faculté d'aimantation)

18

2. Transformateur monophasé – Electromagnétisme

... à la découverte des transformateurs

1. Introduction

2. Transfo. Monophasé

- Technologie
- Electromagnétisme
- Modèle Electrotech.
- Modèle Electronique

3. Transfo. Triphasé

4. Transfo. Spéciaux

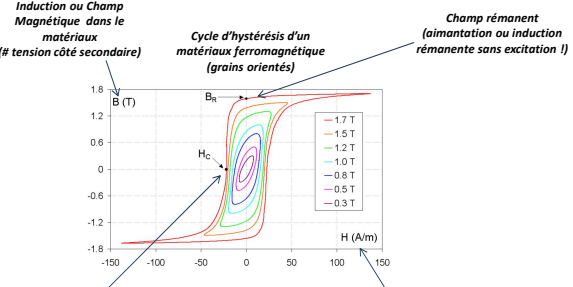
La **perméabilité μ** du matériaux est une fonction non-linéaire :

$$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$$

Induction ou Champ Magnétique dans le matériaux (# tension côté secondaire)

Cycle d'hystérésis d'un matériaux ferromagnétique (grains orientés)

Champ rémanent (aimantation ou induction rémanente sans excitation I)



Champ coercitif (Excitation nécessaire à la désaimantation du matériaux I)

Excitation magnétique (# courant côté primaire)

19

2. Transformateur monophasé – Electromagnétisme

... à la découverte des transformateurs

1. Introduction

2. Transfo. Monophasé

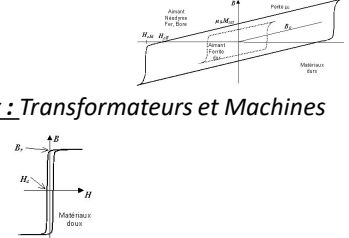
- Technologie
- Electromagnétisme
- Modèle Electrotech.
- Modèle Electronique

3. Transfo. Triphasé

4. Transfo. Spéciaux

Contrairement aux matériaux **diamagnétiques** ($\mu \leq 1$, cuivre, eau, or ...) et **paramagnétiques** ($\mu \geq 1$, air, aluminium ...), les matériaux **ferromagnétiques** ($\mu \gg 1$, fer, cobalt, nickel...) sont classés en deux grandes familles :

- **Matériaux Durs** : Machines à aimants
- **Matériaux Doux** : Transformateurs et Machines



20

2. Transformateur monophasé – Modèle Electrotech

ENSICAEN
ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'INGÉNIEURS DE CAEN
LE CENTRE DE RECHERCHE

... à la découverte des transformateurs

1. Introduction
2. Transfo. Monophasé
 - Technologie
 - Electromagnétisme
 - Modèle Electrotech.
 - Modèle Electronique
3. Transfo. Triphasé
4. Transfo. Spéciaux

Nous allons maintenant nous intéresser à la modélisation électrique des transformateurs monophasés. Nous sommes de nos jours habitués à l'utilisation de tels modèles et de leurs équations. Selon la culture et la sensibilité de l'utilisateur, nous pouvons retrouver deux grandes familles de modèles :

- **Modèles de l'électrotechnicien** : inductance magnétisante saturable (ou non) et inductances de fuites réparties au primaire et au secondaire.
- **Modèles de l'électronicien** : notion d'inductances propres des enroulements et de mutuelle (modèle très rencontré dans les simulateurs)

21

2. Transformateur monophasé – Modèle Electrotech

ENSICAEN
ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'INGÉNIEURS DE CAEN
LE CENTRE DE RECHERCHE

... à la découverte des transformateurs

1. Introduction
2. Transfo. Monophasé
 - Technologie
 - Electromagnétisme
 - Modèle Electrotech.
 - Modèle Electronique
3. Transfo. Triphasé
4. Transfo. Spéciaux

Découvrons le modèle de l'Electrotechnicien en partant du modèle parfait pour arriver au modèle réel en tenant compte des différentes imperfections structurelles d'un transformateur :

Rapport de transformation (rapport entre nombre de spires primaire et secondaire)

$m = N2/N1$

Nous pouvons écrire :

$$\frac{V2}{V1} = \frac{N2}{N1}$$

$$S1 = V1 \cdot I1 = V2 \cdot I2 = S2$$

Rapport de transformation et isolation galvanique (isolation électrique)

22

2. Transformateur monophasé – Modèle Electrotech

ENSICAEN
ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'INGÉNIEURS DE CAEN
LE CENTRE DE RECHERCHE

... à la découverte des transformateurs

1. Introduction
2. Transfo. Monophasé
 - Technologie
 - Electromagnétisme
 - Modèle Electrotech.
 - Modèle Electronique
3. Transfo. Triphasé
4. Transfo. Spéciaux

Un transformateur étant constitué de deux bobines enroulées autour d'un noyau magnétique, il semble normal que le premier élément de modélisation d'un transformateur soit une inductance (non saturable) pure jumelée au rapport de transformation :

Inductance Magnétisante (modélise le flux commun sans fuites dans le circuit magnétique)

23

2. Transformateur monophasé – Modèle Electrotech

ENSICAEN
ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'INGÉNIEURS DE CAEN
LE CENTRE DE RECHERCHE

... à la découverte des transformateurs

1. Introduction
2. Transfo. Monophasé
 - Technologie
 - Electromagnétisme
 - Modèle Electrotech.
 - Modèle Electronique
3. Transfo. Triphasé
4. Transfo. Spéciaux

Il faut maintenant modéliser les pertes amenées par la résistance électrique des enroulements. Ces pertes se nomment pertes Joule ou pertes cuivre :

Modèle en charge

Modèle des pertes Joules au primaire (résistance des enroulements primaire)

Modèle des pertes Joules au secondaire (résistance des enroulements secondaire)

- Pertes Joule souvent négligeables en forte puissance (Résistance faible car section des conducteurs grande)
- Nous pouvons écrire :

$$Pj = \sum_i ri \cdot Ii^2$$

24

ENSICAEN
ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'INGÉNIEURS DE CAEN
LE CENTRE DE RECHERCHE

2. Transformateur monophasé – Modèle Electrotech

... à la découverte des transformateurs

1. Introduction
2. Transfo. Monophasé
 - Technologie
 - Electromagnétisme
 - Modèle Electrotech.
 - Modèle Electronique
3. Transfo. Triphasé
4. Transfo. Spéciaux

Il faut maintenant modéliser les **fuites magnétiques**. Elles sont mises en série avec l'inductance magnétisante car elles modélisent des échanges de flux non utile (non transmis au secondaire):

Modèle en charge

• ne pas confondre pertes et fuites !

- Pertes = Energie consommée non utile au transfert d'énergie (chaleur) !
- Fuites = Energie échangée !

25

ENSICAEN
ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'INGÉNIEURS DE CAEN
LE CENTRE DE RECHERCHE

2. Transformateur monophasé – Modèle Electrotech

... à la découverte des transformateurs

1. Introduction
2. Transfo. Monophasé
 - Technologie
 - Electromagnétisme
 - Modèle Electrotech.
 - Modèle Electronique
3. Transfo. Triphasé
4. Transfo. Spéciaux

A quels phénomènes correspondent les fuites magnétiques :

Fonctionnement en charge sans fuites

Fonctionnement en charge avec fuites

Voici quelques solutions permettant d'atténuer les fuites magnétiques :

26

ENSICAEN
ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'INGÉNIEURS DE CAEN
LE CENTRE DE RECHERCHE

2. Transformateur monophasé – Modèle Electrotech

... à la découverte des transformateurs

1. Introduction
2. Transfo. Monophasé
 - Technologie
 - Electromagnétisme
 - Modèle Electrotech.
 - Modèle Electronique
3. Transfo. Triphasé
4. Transfo. Spéciaux

Il reste maintenant à modéliser les dernières pertes rencontrés dans un transformateur, les **pertes fer** ou **pertes magnétiques**. Ces pertes se situent physiquement dans le circuit magnétique, elles sont donc représentés par une résistance en parallèle de l'inductance magnétisante :

Il en existe principalement deux types :

- Pertes par courants de Foucault
- Pertes par hystérésis

Pertes fer (vrai qu'à fréquence constante !)

27

ENSICAEN
ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'INGÉNIEURS DE CAEN
LE CENTRE DE RECHERCHE

2. Transformateur monophasé – Modèle Electrotech

... à la découverte des transformateurs

1. Introduction
2. Transfo. Monophasé
 - Technologie
 - Electromagnétisme
 - Modèle Electrotech.
 - Modèle Electronique
3. Transfo. Triphasé
4. Transfo. Spéciaux

Les **pertes par courants de Foucault** sont liées aux variations d'induction magnétique dans le circuit :

$$\text{rot } \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

28

ENSICAEN
ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'INGÉNIEURS DE CAEN
LE CENTRE DE RECHERCHE

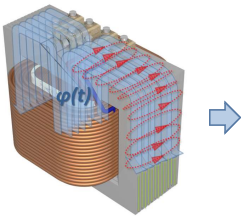
2. Transformateur monophasé – Modèle Electrotech

Les pertes par courants de Foucault sont liées aux variations d'induction magnétique dans le circuit magnétique :

$$\text{rot } \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

Solutions :

- Matériaux à fortes résistivité (ex : FeSi 3%)
- Circuit magnétique feuilleté avec isolation électrique entre chaque tôle (vernis en général)



... à la découverte des transformateurs

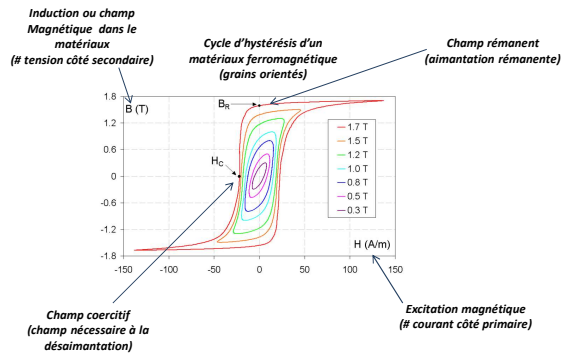
1. Introduction
2. Transfo. Monophasé
 - Technologie
 - Electromagnétisme
 - Modèle Electrotech.
 - Modèle Electronique
3. Transfo. Triphasé
4. Transfo. Spéciaux

29

ENSICAEN
ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'INGÉNIEURS DE CAEN
LE CENTRE DE RECHERCHE

2. Transformateur monophasé – Modèle Electrotech

Les pertes par hystérésis sont liées à la nature du milieu utilisé pour canaliser les lignes de champ :



... à la découverte des transformateurs

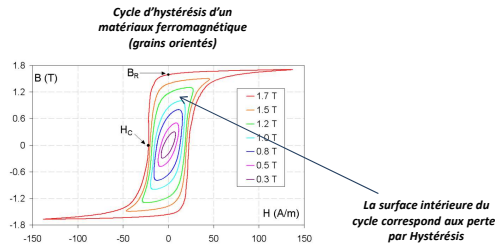
1. Introduction
2. Transfo. Monophasé
 - Technologie
 - Electromagnétisme
 - Modèle Electrotech.
 - Modèle Electronique
3. Transfo. Triphasé
4. Transfo. Spéciaux

30

ENSICAEN
ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'INGÉNIEURS DE CAEN
LE CENTRE DE RECHERCHE

2. Transformateur monophasé – Modèle Electrotech

Les pertes par hystérésis correspondent à l'énergie dépensée afin de parcourir le cycle :



... à la découverte des transformateurs

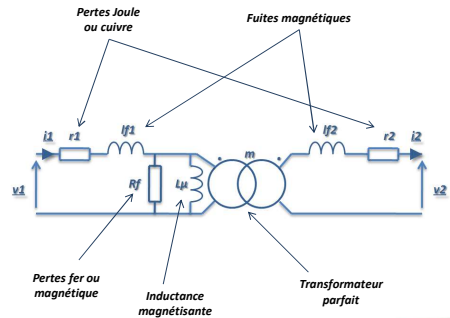
1. Introduction
2. Transfo. Monophasé
 - Technologie
 - Electromagnétisme
 - Modèle Electrotech.
 - Modèle Electronique
3. Transfo. Triphasé
4. Transfo. Spéciaux

31

ENSICAEN
ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'INGÉNIEURS DE CAEN
LE CENTRE DE RECHERCHE

2. Transformateur monophasé – Modèle Electrotech

Le modèle couramment utilisé par l'électrotechnicien est celui-ci. Il existe d'autres variantes de ce schéma (fuites totalisées au secondaire et au primaire ...) :



... à la découverte des transformateurs

1. Introduction
2. Transfo. Monophasé
 - Technologie
 - Electromagnétisme
 - Modèle Electrotech.
 - Modèle Electronique
3. Transfo. Triphasé
4. Transfo. Spéciaux

32

2. Transformateur monophasé – Modèle Electrotech

... à la découverte des transformateurs

1. Introduction

2. Transfo. Monophasé

- Technologie
- Electromagnétisme
- Modèle Electrotech.
- Modèle Electronique

3. Transfo. Triphasé

4. Transfo. Spéciaux

Le modèle couramment utilisé par l'électrotechnicien est celui-ci. Il existe d'autres variantes de ce schéma (fuites totalisées au secondaire et au primaire ...):

33

2. Transformateur monophasé – Modèle Electronique

... à la découverte des transformateurs

1. Introduction

2. Transfo. Monophasé

- Technologie
- Electromagnétisme
- Modèle Electrotech.
- Modèle Electronique

3. Transfo. Triphasé

4. Transfo. Spéciaux

Ce modèle est de préférence utilisé par l'électronicien ainsi que par les simulateurs de circuits. Les inductances propres modélisent le flux propre brassé par enroulement ainsi que les fuites associées (sans pertes Fer). Les couplages magnétiques entre enroulements primaires et secondaires sont modélisés par l'inductance mutuelle :

34

2. Transformateur monophasé – Modèle Electronique

... à la découverte des transformateurs

1. Introduction

2. Transfo. Monophasé

- Technologie
- Electromagnétisme
- Modèle Electrotech.
- Modèle Electronique

3. Transfo. Triphasé

4. Transfo. Spéciaux

Nous pouvons écrire :

$$v_1 = e_1 + r_1 \cdot i_1$$

$$v_2 = e_2 - r_2 \cdot i_2$$

Avec :

$$e_1 = L_1 \cdot \frac{di_1}{dt} - M \cdot \frac{di_2}{dt} \quad n1 \cdot \varphi_1 = L_1 \cdot i_1 - M \cdot i_2$$

$$e_2 = -L_2 \cdot \frac{di_2}{dt} + M \cdot \frac{di_1}{dt} \quad n2 \cdot \varphi_2 = -L_2 \cdot i_2 + M \cdot i_1$$

35

3. Transformateur Triphasé

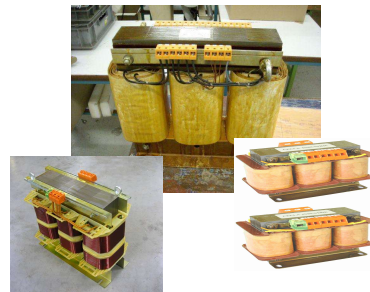
36

3. Transformateur triphasé

... à la découverte des transformateurs

1. Introduction
2. Transfo. Monophasé
3. Transfo. Triphasé
 - Couplages
 - Indice horaire
 - Mise en parallèle
4. Transfo. Spéciaux

Cette partie sur les transformateurs triphasés sera relativement succincte faute de temps. Les circuits magnétiques les plus rencontrés sont ceux à 3 colonnes à flux forcé (le choix du circuit n'est utile qu'en régime déséquilibré !):



3. Transformateur triphasé – Couplages

... à la découverte des transformateurs

1. Introduction
2. Transfo. Monophasé
3. Transfo. Triphasé
 - Couplages
 - Indice horaire
 - Mise en parallèle
4. Transfo. Spéciaux

Le couplage correspond à la technique utilisée pour connecter les enroulements entre eux (côté primaire et secondaire):



Il existe 6 couplages, "Y ou D" côté haute tension et "y ou d ou z" côté basse tension. Si le neutre est sorti pour les couplages étoile ou zig-zag, on rajoute N ou n :

YNd Dyn ...

3. Transformateur triphasé – Couplages

... à la découverte des transformateurs

1. Introduction
2. Transfo. Monophasé
3. Transfo. Triphasé
 - Couplages
 - Indice horaire
 - Mise en parallèle
4. Transfo. Spéciaux

Comment choisir le bon couplage :

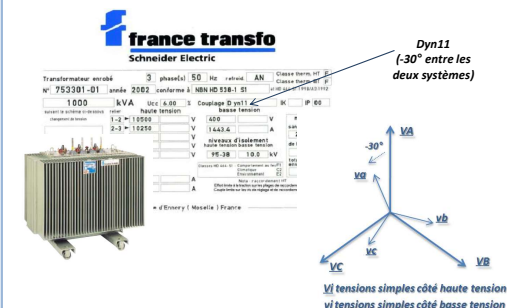
- Besoins en **tensions différents** des tensions disponibles (élévation/abaissement du niveau de tension)
- nécessité d'avoir un **neutre**, typiquement au secondaire. Par exemple, reconstruction de 3 systèmes monophasés sur les réseaux de distribution (déséquilibre souvent fort entre chaque phase)
- Couplages différents primaire/secondaire évite une répercussion totale de **déséquilibre**

3. Transformateur triphasé – Indice Horaire

... à la découverte des transformateurs

1. Introduction
2. Transfo. Monophasé
3. Transfo. Triphasé
 - Couplages
 - Indice horaire
 - Mise en parallèle
4. Transfo. Spéciaux

L'indice horaire définit le déphasage de tensions entre les systèmes côté primaire et secondaire. L'indice horaire est donné en pas de 30°. Prenons un exemple :



ENSICAEN
ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'INGÉNIEURS DE CAEN
LE CENTRE DE RECHERCHE

3. Transformateur triphasé – Indice Horaire

... à la découverte des transformateurs

1. Introduction
2. Transfo. Monophasé
3. Transfo. Triphasé
 - Couplages
 - Indice horaire
 - Mise en parallèle
4. Transfo. Spéciaux

Quand le choix de l'indice horaire intervient-il :

- Si nous sommes en régimes déséquilibrés
- Mise en parallèle de transformateurs
- Les couplages les plus rencontrés :
Yyn0, Yyn6, Yzn5, Yzn11, Dyn5, Dyn11

41

ENSICAEN
ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'INGÉNIEURS DE CAEN
LE CENTRE DE RECHERCHE

3. Transformateur triphasé – Mise en parallèle

... à la découverte des transformateurs

1. Introduction
2. Transfo. Monophasé
3. Transfo. Triphasé
 - Couplages
 - Indice horaire
 - Mise en parallèle
4. Transfo. Spéciaux

Pour la mise en parallèle de transformateurs, les choix des couplages et des indices horaires sont essentiels. La mise en parallèle de transformateurs est couramment rencontrée dans les cas suivants :

- **Réseaux maillés ou bouclés** (réseaux de transport et de répartition)
- **Croissance de la demande** en fonction de la demande (été vs hivers vs matin vs soir ...)
- **Systèmes redondants** (doublement des ressources pour des raison de sûreté)

42

4. Transformateurs Spéciaux

43

ENSICAEN
ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'INGÉNIEURS DE CAEN
LE CENTRE DE RECHERCHE

4. Transformateurs spéciaux – Autotransformateur

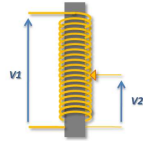

... à la découverte des transformateurs

1. Introduction
2. Transfo. Monophasé
3. Transfo. Triphasé
4. Transfo. Spéciaux
 - Autotransformateur
 - Transfo. courant

L'autotransformateur est un transformateur assurant une conversion de tensions AC/AC mais n'offrant pas d'isolation Galvanique. Ils sont notamment utilisés en très hautes tensions :

Autotransformateur 500kV

En France, les transformations 400kV/225kV se font systématiquement via autotransformateur

44

... à la découverte des transformateurs

1. Introduction
2. Transfo. Monophasé
3. Transfo. Triphasé
4. Transfo. Spéciaux
 - Autotransformateur
 - Transfo. courant

Les autotransformateurs sont principalement utilisés avec des rapport de transformation peux élevés (dimensionnement conducteurs). Ils offrent quelques avantages et inconvénients par rapport aux transformateur :

- **pas d'isolation galvanique** (isolation électrique primaire/secondaire et saturation naturelle du matériaux)
- **Meilleur rendement**, >99% (à puissance et volume de fer identique). Essentiel en très forte puissance !
- **Encombrement réduit**

... à la découverte des transformateurs

1. Introduction
2. Transfo. Monophasé
3. Transfo. Triphasé
4. Transfo. Spéciaux
 - Autotransformateur
 - Transfo. courant

Les transformateurs de courant (TC ou TI) sont des transformateurs de mesure effectuant une conversion courant/courant. Ils sont très utilisés en électronique ainsi qu'en électrotechnique. Prenons quelques exemples :

Transformateur de courant 138KV



Directindustry.fr

Merci de
votre attention !

MACHINES ELECTRIQUES TOURNANTES



ENSICAEN
ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'INGÉNIEURS DE CAEN
LE CENTRE DU MONDIALISME

1. Introduction

... à la découverte des machines électriques

1. Introduction

- Stator
- Champ tournant
- Technologies

2. Machines asynchrones

3. Machines synchrones

Les machines électriques possèdent un fonctionnement réversible. Nous parlons de **moteur** pour une conversion électrique/mécanique et d'**alternateur** ou de **générateur** pour une conversion mécanique/électrique. Nous avons pu le voir durant l'introduction à cet enseignement, les deux familles de machines les plus rencontrées en moyennes et fortes puissances sont :

- **Machines Synchrones (MS)**
- **Machines Asynchrones (MAS)**

3

ENSICAEN
ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'INGÉNIEURS DE CAEN
LE CENTRE DU MONDIALISME

1. Introduction

... à la découverte des machines électriques

1. Introduction

- Stator
- Champ tournant
- Technologies

2. Machines asynchrones

3. Machines synchrones

En 2010, les entraînements électriques représentent 70% de la consommation d'électricité industrielle mondiale (source AIE). Prenons quelques exemples d'applications des machines:

| | | |
|---|--|--|
| <p>AGV de Alstom (MS à aimants)</p>  | <p>Compresseur Dixair (MAS à cage)</p>  | <p>Queen Mary 2 (MS à rotors bobinés - propulsion)</p>  |
| <p>SM de RePower (MAS à rotor bobiné - fonctionnement MADA)</p>  | <p>PRIUS de Toyota (MS à aimants)</p>  | |

4

1. Introduction

... à la découverte des machines électriques

1. Introduction

- Stator
- Champ tournant
- Technologies

2. Machines asynchrones

3. Machines synchrones

En 2010, **Jeumont Electric** est un des leader mondiaux dans les domaines des machines synchrones à aimants appliquées notamment à la production et aux applications marines (militaire et marchande) :



En 2010, Jeumont Electric est notamment le fabricant référence des machines rencontrées dans les motopompes du circuit primaire des centrales nucléaires fabriquées par AREVA.

1. Introduction

... à la découverte des machines électriques

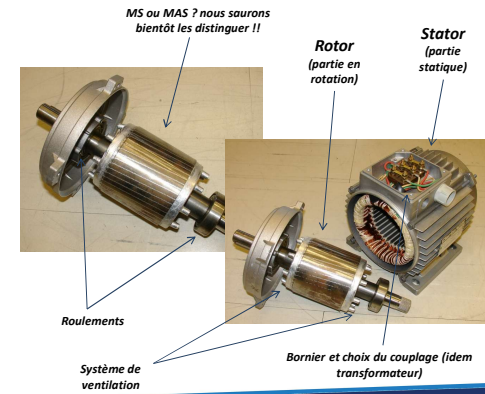
1. Introduction

- Stator
- Champ tournant
- Technologies

2. Machines asynchrones

3. Machines synchrones

Observons rapidement de quoi est constituée une machine électrique :



1. Introduction - Stator

... à la découverte des machines électriques

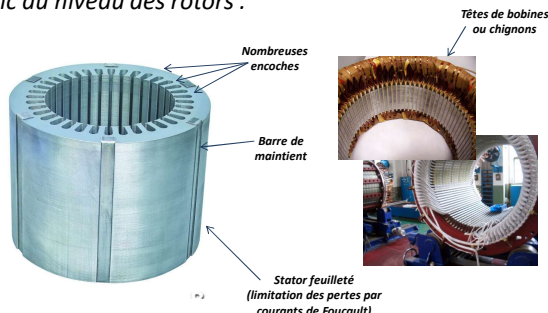
1. Introduction

- Stator
- Champ tournant
- Technologies

2. Machines asynchrones

3. Machines synchrones

A puissance, tensions, courants, nombre de paires de pôles, dimensions, géométries ... équivalents, les **MS et MAS possèdent le même stator**. Les différences entre ces deux familles de machines se font donc au niveau des rotors :



1. Introduction - Champ tournant

... à la découverte des machines électriques

1. Introduction

- Stator
- Champ tournant
- Technologies

2. Machines asynchrones

3. Machines synchrones

En fonctionnement moteur pour une machine triphasée, le rôle du stator est de **générer un champ magnétique tournant** à partir d'un système triphasé de courants. Ce fonctionnement est réversible en fonctionnement alternateur (du champ tournant vers le système triphasé de courants) :



1. Introduction – Champ tournant

ENSICAEN
ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'INGÉNIEURS DE CAEN
LE CENTRE DE RECHERCHE

... à la découverte des machines électriques

1. Introduction

- Stator
- Champ tournant
- Technologies

2. Machines asynchrones

3. Machines synchrones

Observons comment nous pouvons faire tourner un champ magnétique dans une machine électrique :

Représentation réelle (6 encoches et 1 paire de pôles)

Représentation réelle (6 encoches et 1 paire de pôles)

Induction résultante

9

1. Introduction – Champ tournant

ENSICAEN
ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'INGÉNIEURS DE CAEN
LE CENTRE DE RECHERCHE

... à la découverte des machines électriques

1. Introduction

- Stator
- Champ tournant
- Technologies

2. Machines asynchrones

3. Machines synchrones

L'induction magnétique est donc tournante et est répartie sur la totalité de la longueur du circuit magnétique :

Représentation réelle (6 encoches et 1 paire de pôles)

Représentation réelle (6 encoches et 1 paire de pôles)

10

1. Introduction – Champ tournant

ENSICAEN
ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'INGÉNIEURS DE CAEN
LE CENTRE DE RECHERCHE

... à la découverte des machines électriques

1. Introduction

- Stator
- Champ tournant
- Technologies

2. Machines asynchrones

3. Machines synchrones

L'induction magnétique est donc tournante et est répartie sur la totalité de la longueur du circuit magnétique :

Représentation réelle (6 encoches et 1 paire de pôles)

Représentation réelle (6 encoches et 1 paire de pôles)

11

1. Introduction – Champ tournant

ENSICAEN
ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'INGÉNIEURS DE CAEN
LE CENTRE DE RECHERCHE

... à la découverte des machines électriques

1. Introduction

- Stator
- Champ tournant
- Technologies

2. Machines asynchrones

3. Machines synchrones

L'induction magnétique est donc tournante et est répartie sur la totalité de la longueur du circuit magnétique :

Représentation réelle (6 encoches et 1 paire de pôles)

Représentation réelle (6 encoches et 1 paire de pôles)

12

1. Introduction – Champ tournant

... à la découverte des machines électriques

1. Introduction

- Stator
- Champ tournant
- Technologies

2. Machines asynchrones

3. Machines synchrones

Découvrons les principes de fonctionnement des machines synchrones et asynchrones :

Principe de fonctionnement de la machine synchrone (MS)



Aiguille de boussole (rotor constitué d'aimants ou d'électro-aimants)

Principe de fonctionnement de la machine asynchrone (MAS)



Boîte en fer blanc d'aspirine

Claude Divoux

13

1. Introduction – Champ tournant

... à la découverte des machines électriques

1. Introduction

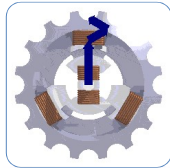
- Stator
- Champ tournant
- Technologies

2. Machines asynchrones

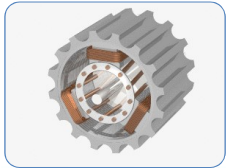
3. Machines synchrones

Découvrons les principes de fonctionnement des machines synchrones et asynchrones :

Principe de fonctionnement de la machine synchrone (MS)



Principe de fonctionnement de la machine asynchrone (MAS)



Claude Divoux

14

1. Introduction – Champ tournant

... à la découverte des machines électriques

1. Introduction

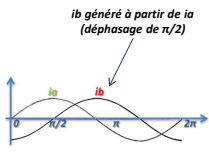
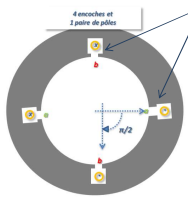
- Stator
- Champ tournant
- Technologies

2. Machines asynchrones

3. Machines synchrones

La règle à suivre afin de générer un champ magnétique tournant est d'assurer un déphasage angulaire des courants égal au déphasage spatial des enroulements (Théorème de Ferraris). Les machines asynchrones monophasés sont en fait des machines biphasés (machines à laver, compresseurs ...) :

i_b généré à partir de i_a (déphasage de $\pi/2$)

Les machines asynchrones monophasés utilisent en général des techniques moins coûteuses pour le déphasage spatial des enroulements (spires de Frager ...)

Claude Divoux

15

1. Introduction – Champ tournant

... à la découverte des machines électriques

1. Introduction

- Stator
- Champ tournant
- Technologies

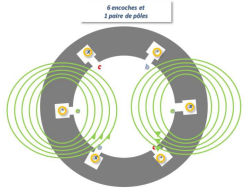
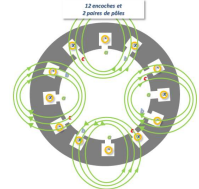
2. Machines asynchrones

3. Machines synchrones

En rajoutant des paires de pôles nous pouvons diminuer la vitesse de rotation du champ tournant à fréquence de travail donnée (principe réversible en génératrice). Systèmes à faible vitesse (éoliennes, marine-POD ...). Nous pouvons écrire :

$$\Omega_s = \omega_s / p = 2\pi \cdot N_s / 60$$

Vitesse de rotation du champ magnétique en rad/s Pulsation courants statoriques en rad/s Nombre de paires de pôles Vitesse de rotation du champ magnétique en tr/mn

Claude Divoux

16

1. Introduction – Solutions technologiques

... à la découverte des machines électriques

1. Introduction

- Stator
- Champ tournant
- Technologies

2. Machines asynchrones

3. Machines synchrones

Les astuces technologiques sont principalement là pour générer une **fmm** (force-magnétomotrice) et donc une excitation magnétique la plus sinusoïdale possible (atténuation des ondulations de couple – usures mécaniques) :

6 encoches et 1 paire de pôles

n_s conducteurs par phase au stator

$\xi_{\max} = n_s \cdot I_{\max}$

fmm en A.tr (force-magnétomotrice)

17

1. Introduction – Solutions technologiques

... à la découverte des machines électriques

1. Introduction

- Stator
- Champ tournant
- Technologies

2. Machines asynchrones

3. Machines synchrones

Une première solution consiste à distribuer les enroulement sur plusieurs encoches :

12 encoches et 1 paire de pôles

$n_s/2$ conducteurs par encoche au stator

$\xi_{\max} = n_s \cdot I_{\max}$

18

1. Introduction – Solutions technologiques

... à la découverte des machines électriques

1. Introduction

- Stator
- Champ tournant
- Technologies

2. Machines asynchrones

3. Machines synchrones

Les autres solutions, souvent en sus de la précédente :

- Raccourcissement

6 encoches et 1 paire de pôles

$n_s/2$ conducteurs par encoche par phase au stator

$\xi_{\max} = n_s \cdot I_{\max}$

- Inclinaison des encoches au rotor pour MAS. Limitation ondulations de couple (usure mécanique)

Inclinaison d'un pas d'encoche

19

1. Introduction – Solutions technologiques

... à la découverte des machines électriques

1. Introduction

- Stator
- Champ tournant
- Technologies

2. Machines asynchrones

3. Machines synchrones

Regardons un film sur la conception des machines électriques (Comment c'est fait ? - JRP) :

<https://www.youtube.com/watch?v=iP1rNnQ3Aow>

20

2. Machines Asynchrones

21

ENSICAEN
ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'INGÉNIEURS DE CAEN
CENTRE DE RECHERCHE

2. Machines Asynchrones

Machine Asynchrone

... à la découverte des machines électriques

1. Introduction
2. Machines asynchrones
 - Rotor
 - Principe de fonct.
 - Modélisation
 - Couples
 - Commandes
3. Machines synchrones

INDUCTION MOTOR

induction motors are the most commonly used electrical machines

0:04 / 4:43

<https://www.youtube.com/watch?v=LtJoJBUSE28>

22

ENSICAEN
ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'INGÉNIEURS DE CAEN
CENTRE DE RECHERCHE

2. Machines Asynchrones

Les distinctions entre les machines synchrones et asynchrones se font au niveau de leurs rotors. Rotor et stator possèdent le même nombre de paires de pôles. Il existe deux grandes techniques de conception des rotors pour les machines asynchrones :

... à la découverte des machines électriques

1. Introduction
2. Machines asynchrones
 - Rotor
 - Principe de fonct.
 - Modélisation
 - Couples
 - Commandes
3. Machines synchrones

- **Rotor à cage** (ou cage d'écurieuil). De très loin les machines asynchrones les plus rencontrées (machines à laver, compresseurs, ventilateurs, pompes, mélangeurs ...). **Très faible coût** lié à la technique de conception du rotor.
- **Rotor bobiné** (rotor à bagues). Machines très coûteuses plus rarement rencontrées. Application typique à la production en fortes puissances en fonctionnement MADA (éoliennes ...)

23

ENSICAEN
ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'INGÉNIEURS DE CAEN
CENTRE DE RECHERCHE

2. Machines Asynchrones – Rotor

Les MAS à cages possèdent deux avantages essentiels. Aucun contact entre stator et rotor (hormis les roulements) et très faibles coût de conception. Pour une machine à cage, le rotor est mis en Court-circuit et autorise des vitesses de rotation élevées :

... à la découverte des machines électriques

1. Introduction
2. Machines asynchrones
 - Rotor
 - Principe de fonct.
 - Modélisation
 - Couples
 - Commandes
3. Machines synchrones

Barres en alliages d'aluminium en général (poids réduit) :

- bon conducteur électrique

Matériaux ferromagnétiques :

- bon conducteur magnétique
- mauvais conducteur électrique (fesi 3% ...)

Encoches profondes (effet de peau)

Anneaux de court-circuit (soudés ou brasés)

24

2. Machines Asynchrones – Rotor

... à la découverte des machines électriques


1. Introduction

2. Machines asynchrones

- Rotor
- Principe de fonct.
- Modélisation
- Couples
- Commandes

3. Machines synchrones

Les **MAS à bagues (ou rotor bobiné)** sont plus coûteuses et possèdent à puissance donnée un poids plus important qu'une MAS à cage. Elles autorisent également des vitesses de rotation plus faibles (inertie des enroulements) que les machines à cages et certaines machines synchrones. Il a y également le problème d'usures des contacts entre rotor et stator:



3 bagues pour accéder aux enroulement rotoriques

Conception du rotor très proche de celle du stator

! MAS à bagues parfois utilisées pour la production car l'électronique de puissance est moins coûteuse (dimensionnée pour la puissance transportée au rotor) !

25

2. Machines Asynchrones – Principe de fonctionnement

... à la découverte des machines électriques

1. Introduction

2. Machines asynchrones

- Rotor
- Principe de fonct.
- Modélisation
- Couples
- Commandes

3. Machines synchrones

Découvrons le principe de fonctionnement des machines asynchrones en 4 étapes fondamentales :

- **Le stator est parcouru par un champ magnétique tournant** de pulsation égale à la pulsation des courants statoriques au nombre de paires de pôle près.
- **Les conducteurs électriques rotoriques** (bobines, barres d'alliages ...) subissent de fem (forces électromotrices) induites par les variations d'induction magnétique.

$$\text{rot } \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad \text{Fem induite} \quad \rightarrow e(t) = \frac{d \cdot \Phi(t)}{dt}$$

Equations de Maxwell, forme locale

Par intégration sur un contour

26

2. Machines Asynchrones – Principe de fonctionnement

... à la découverte des machines électriques

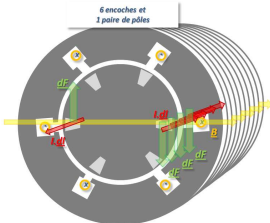
1. Introduction

2. Machines asynchrones

- Rotor
- Principe de fonct.
- Modélisation
- Couples
- Commandes

3. Machines synchrones

- Les fem induites au sein des conducteurs rotoriques induisent des **courants**
- Les courants induits dans les conducteurs sont brassés par le champ magnétique tournant et induisent des **forces de Laplace** (résultante macroscopique des forces de Lorentz).



6 encoches et 3 paires de pôles

$$d\vec{F} = I \cdot d\vec{l} \wedge \vec{B}$$

27

2. Machines Asynchrones – Principe de fonctionnement

... à la découverte des machines électriques

1. Introduction

2. Machines asynchrones

- Rotor
- Principe de fonct.
- Modélisation
- Couples
- Commandes

3. Machines synchrones

- Les forces de Laplace mettent en mouvement le rotor qui tourne dans le **même sens que le champ tournant** statorique.
- Cette rotation ne peut perdurer que si des courants sont induits ... donc que si il y a des variations de champ magnétique au rotor ... donc que si la vitesse de rotation du rotor est différente de la vitesse de rotation du champ tournant. **D'où le nom de ces machines ... Machines Asynchrones**

$$\Omega < \Omega_s \quad \text{avec :} \quad \Omega_s = \omega_s / p$$

Vitesse de rotation du rotor en rd/s (fonctionnement moteur)

Vitesse de rotation du champ tournant rd/s

Pulsation des courants statoriques (rd/s)

28

2. Machines Asynchrones – Principe de fonctionnement

Un paramètre essentiel concernant les machines asynchrones est le glissement (variation relative entre Ω et Ω_s). En fonctionnement nominal, le glissement est généralement $< 10\%$:

$$g = (\Omega_s - \Omega) / \Omega_s$$

Prenons quelques valeurs caractéristiques :

- $g < 1$: $\Omega > 0$ (fonctionnement moteur)
- $g = 1$: $\Omega = 0$ (arrêt et avant démarrage)
- $g = 0$: $\Omega = \Omega_s$ (impossible sans une aide mécanique. A vide, $\Omega \neq \Omega_s$)
- $g > 1$: $\Omega_s < 0$ (freinage magnétique fonctionnement génératrice)
- $g < 0$: $\Omega > \Omega_s$ (hypersynchrone - freinage)

29

2. Machines Asynchrones – Principe de fonctionnement

Au fonctionnement nominal, les courants rotoriques possèdent une pulsation " w_r " faible :

$$w_r / p = \Omega_s - \Omega$$

Les courants rotoriques génèrent également un champ magnétique tournant à la vitesse " Ω_r ", vu du rotor :

$$\Omega_r = w_r / p$$

En résumé (vu du stator), stator et rotor génèrent un champ magnétique tournant à la même vitesse :

$$\Omega_s = w_s / p$$

$$\Omega_s = \Omega_r + \Omega$$

30

2. Machines Asynchrones – Modélisation

Partons de l'étude réalisée autour des transformateurs et analysons le fonctionnement d'une MAS :

- Prenons MAS à bagues. 3 enroulements rotoriques bobinés, idem côté stator.
- Bloquons le rotor, injectons un système triphasé de tensions côté stator et récupérons via les bagues les tensions générées au rotor.
- **Nous venons de fabriquer un transformateur ... certes un peu cher. Le modèle d'une machine asynchrone sera donc très proche de celui d'un transformateur !**

31

2. Machines Asynchrones – Modélisation

La modélisation sera faite en régime permanent au 1^{er} harmonique. Le modèle étudié est un modèle à inductances couplées. Le rotor étant le plus souvent mis en court-circuit en fonctionnement moteur, voici le schéma équivalent par phase d'une MAS :

Inductance cyclique : inductance propre de l'enroulement (magnétisant + fuites) et mutuelle inductance entre enroulement statoriques

Inductance cyclique : inductance propre de l'enroulement (magnétisant + fuites) et mutuelle inductance entre enroulement rotoriques

Mutuelle inductance : inductance mutuelle entre enroulements statoriques et rotoriques (dépend de la position du rotor). Nous prenons la valeur MAX à $\theta=0 \pm 2\pi/3$!

Modélisation des pertes joule (idem transfo.)

Côté stator à la pulsation ω_s

Côté rotor à la pulsation $\omega_r = g \cdot \omega_s$

32

2. Machines Asynchrones – Modélisation

... à la découverte des machines électriques

1. Introduction

2. Machines asynchrones

- Rotor
- Principe de fonct.
- Modélisation
- Couples
- Commandes

3. Machines synchrones

Une inductance cyclique modélisent l'inductance propre de l'enroulement (magnétisant et fuites) ainsi que les couplages magnétiques (effet de mutuelle) entre enroulements d'un même côté (stator-stator ou rotor-rotor) en donnant l'illusion que le flux propre à cette phase ne dépend que du courant alimentant celle-ci :

Dans une machine, les fuites magnétiques sont principalement localisées dans les chignons et les encoches. Toutes lignes de champs non canalisées dans le circuit magnétique !

Les pertes Joule sont principalement amenées par la résistance propre aux conducteurs. Elles sont faible en forte puissance car les conducteurs possèdent une section relativement grande sous un niveau de tension élevé !

33

2. Machines Asynchrones – Modélisation

... à la découverte des machines électriques

1. Introduction

2. Machines asynchrones

- Rotor
- Principe de fonct.
- Modélisation
- Couples
- Commandes

3. Machines synchrones

Avançons dans l'étude du modèle et sa simplification afin d'obtenir un modèle facilement utilisable et identifiable :

Côté stator à la pulsation ω_s

Côté rotor à la pulsation ramenée à ω_s

$$V_s = (r_s + j \cdot \omega_s \cdot L_{ss}) \cdot \underline{i}_s + j \cdot \omega_s \cdot M_{rs} \cdot \underline{i}_r'$$

Courant fictif d'amplitude I_r et de pulsation ω_r

$$0 = \left(\frac{r_r}{g} + j \cdot \omega_s \cdot L_{rr}'\right) \cdot \underline{i}_r' + j \cdot \omega_s \cdot M_{rs} \cdot \underline{i}_s$$

Courant fictif d'amplitude I_s et de pulsation ω_r

34

2. Machines Asynchrones – Modélisation

... à la découverte des machines électriques

1. Introduction

2. Machines asynchrones

- Rotor
- Principe de fonct.
- Modélisation
- Couples
- Commandes

3. Machines synchrones

Afin d'obtenir un modèle facilement identifiable, nous devons ramener toutes les grandeurs au stator. Dans toute l'étude, le circuit magnétique est supposé homogène et non saturé (sans pertes pour le moment) :

Toutes les grandeurs avec un '<'>' sont des grandeurs fictives résultantes de transformations mathématiques et n'ont donc aucun sens physique !

Modélise la puissance électromécanique utile de la machine

Modélise les pertes Joule rotoriques ramenées au stator

$$L_{rs}' = L_{ss} \cdot \left(\frac{L_{ss} \cdot L_{rr}}{M_{rs}^2} - 1\right)$$

$$R_r' = r_r \cdot \left(\frac{L_{ss}^2}{M_{rs}^2}\right)$$

35

2. Machines Asynchrones – Modélisation

... à la découverte des machines électriques

1. Introduction

2. Machines asynchrones

- Rotor
- Principe de fonct.
- Modélisation
- Couples
- Commandes

3. Machines synchrones

Il est également possible de tenir compte des pertes fer même si un modèle résistif ne sera plus très rigoureux en vitesse variable. Tous les éléments de ce modèle sont alors identifiables via un essai au synchronisme (# à vide – g#1) et un essai à rotor bloqué (vitesse nulle – g=0) :

* Pertes par courants de Foucault : stator et rotor feuilletés avec tôles isolés électriquement. Matériaux à très forte résistivité (fesi 3%)

* Pertes par Hystérésis : Forte perméabilité (très bonne conduction magnétique) tout en ayant des propriétés de désaimantation faible (cycle étroit !)

36

2. Machines Asynchrones – Modélisation

Effectuons un rapide bilan de puissance en fonctionnement moteur :

... à la découverte des machines électriques

1. Introduction
2. Machines asynchrones
 - Rotor
 - Principe de fonct.
 - Modélisation
 - Couples
 - Commandes
3. Machines synchrones

37

2. Machines Asynchrones – Couples

En négligeant les pertes Joule statoriques (~2% d'erreur) ainsi que les pertes fer, nous pouvons obtenir l'expression du couple électromécanique (N.m) :

... à la découverte des machines électriques

1. Introduction
2. Machines asynchrones
 - Rotor
 - Principe de fonct.
 - Modélisation
 - Couples
 - Commandes
3. Machines synchrones

Modélise la puissance électromécanique utile de la machine

$$P_{em} = C_{em} \cdot \Omega = 3 \cdot R_r' \cdot \frac{1-g}{g} \cdot I_r^2$$

$$I_r^2 = \frac{V_s^2}{(L_{rs}' \cdot \omega_s)^2 + \left(\frac{R_r'}{g}\right)^2}$$

38

2. Machines Asynchrones – Couples

Nous pouvons alors facilement retrouver l'expression du couple électromécanique en fonction du glissement puis en fonction de la vitesse :

$$C_{em} = 2 \cdot C_{max} \cdot \frac{1}{\left(\frac{g_{max}}{g}\right)^2 + \left(\frac{g}{g_{max}}\right)^2}$$

$$C_{max} = \frac{3 \cdot p}{2 \cdot L_{rs}'} \cdot \left(\frac{V_s}{\omega_s}\right)^2 \quad g_{max} = \frac{R_r'^2}{L_{rs}' \cdot \omega_s}$$

Nous pouvons exprimer le couple en fonction de la vitesse en nous aidant de cette relation :

$$\Omega = (1-g) \cdot \frac{\omega_s}{p}$$

... à la découverte des machines électriques

1. Introduction
2. Machines asynchrones
 - Rotor
 - Principe de fonct.
 - Modélisation
 - Couples
 - Commandes
3. Machines synchrones

39

2. Machines Asynchrones – Couples

Interprétons maintenant l'évolution du couple électromécanique que peut fournir la machine en fonction de la vitesse :

... à la découverte des machines électriques

1. Introduction
2. Machines asynchrones
 - Rotor
 - Principe de fonct.
 - Modélisation
 - Couples
 - Commandes
3. Machines synchrones

Couple nul au synchronisme. Ne peut arriver que par une aide de la charge !

Zone de fonctionnement moteur de la machine

Génératrice asynchrone (freinage) à l'hypersynchronisme

40

2. Machines Asynchrones – Couples

... à la découverte des machines électriques

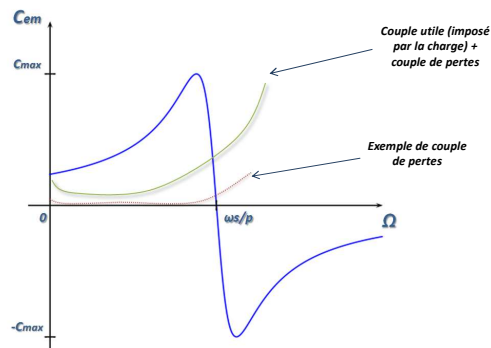
1. Introduction

2. Machines asynchrones

- Rotor
- Principe de fonct.
- Modélisation
- Couples
- Commandes

3. Machines synchrones

Observons maintenant un exemple de couple imposé par une charge :



2. Machines Asynchrones – Couples

... à la découverte des machines électriques

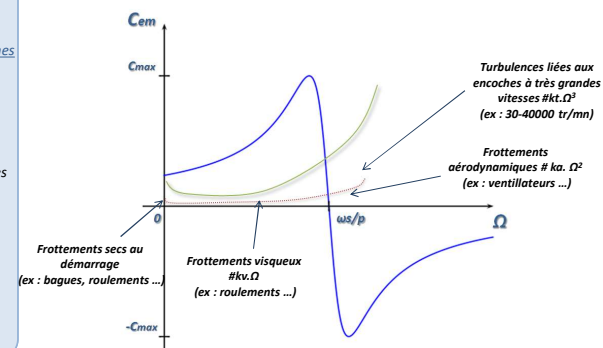
1. Introduction

2. Machines asynchrones

- Rotor
- Principe de fonct.
- Modélisation
- Couples
- Commandes

3. Machines synchrones

A quels phénomènes sont principalement dues les pertes mécaniques dans une conversion électromécanique :



2. Machines Asynchrones – Couples

... à la découverte des machines électriques

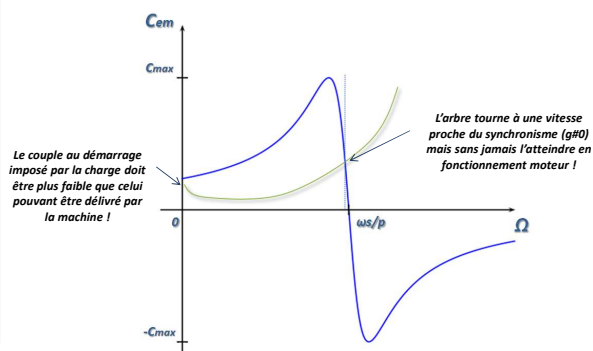
1. Introduction

2. Machines asynchrones

- Rotor
- Principe de fonct.
- Modélisation
- Couples
- Commandes

3. Machines synchrones

Observons maintenant un exemple de couple imposé par une charge :



2. Machines Asynchrones – Couples

... à la découverte des machines électriques

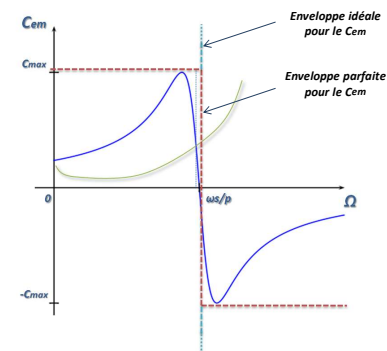
1. Introduction

2. Machines asynchrones

- Rotor
- Principe de fonct.
- Modélisation
- Couples
- Commandes

3. Machines synchrones

Si nous souhaitons travailler à vitesse constante, il nous faudrait idéalement un couple électromécanique tel que celui-ci :



ENSICAEN
ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'INGÉNIEURS DE CAEN
LE CENTRE DE RECHERCHE

2. Machines Asynchrones – Commandes

... à la découverte des machines électriques

1. Introduction
2. Machines asynchrones
 - Rotor
 - Principe de fonct.
 - Modélisation
 - Couples
 - Commandes
3. Machines synchrones

Il existe deux grands modes de fonctionnement et d'utilisation des machines :

- **Fonctionnement à vitesse fixe :**
démarrage direct, démarrage étoile/triangle ou démarrage via démarreur progressif électronique (compresseurs, pompes, broyeurs ...).
- **Fonctionnement à vitesse variable :**
Commandes scalaires et vectorielles via un variateur de vitesse (ferroviaire, machines outils, propulsion ...).

Altistar 48 – démarrage/arrêt (telemecanique)

Altivar 71 – variateur vectoriel (telemecanique)

45

ENSICAEN
ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'INGÉNIEURS DE CAEN
LE CENTRE DE RECHERCHE

2. Machines Asynchrones – Commandes

... à la découverte des machines électriques

1. Introduction
2. Machines asynchrones
 - Rotor
 - Principe de fonct.
 - Modélisation
 - Couples
 - Commandes
3. Machines synchrones

En 2010, la société **Schneider Electric** est leader mondiale dans les domaines de la variation de vitesse (variateurs-altivar, démarreurs-altistar ...). La filiale du groupe s'occupant de cette branche de la mécatronique se nomme **Telemecanique** :

46

ENSICAEN
ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'INGÉNIEURS DE CAEN
LE CENTRE DE RECHERCHE

2. Machines Asynchrones – Commandes

... à la découverte des machines électriques

1. Introduction
2. Machines asynchrones
 - Rotor
 - Principe de fonct.
 - Modélisation
 - Couples
 - Commandes
3. Machines synchrones

Concernant les commandes scalaires (action sur l'amplitude des grandeurs et la fréquence), observons les paramètres sur lesquels nous pouvons agir pour effectuer une variation de vitesse :

$$C_{em} = 2 \cdot C_{max} \cdot \frac{1}{\left(\frac{g_{max}}{g}\right)^2 + \left(\frac{g}{g_{max}}\right)^2}$$

$$R'_r = r_r \cdot \left(\frac{L_{ss}^2}{M_{rs}^2}\right)$$

$$C_{max} = \frac{3 \cdot p}{2 \cdot L'_{rs}} \cdot \left(\frac{V_s}{\omega_s}\right)^2 \quad g_{max} = \frac{R_r^2}{L'_{rs} \cdot \omega_s}$$

$$L'_{rs} = L_{ss} \cdot \left(\frac{L_{ss} \cdot L_{rr}}{M_{rs}^2} - 1\right)$$

Nous pouvons agir sur :

V_s ω_s r_r

47

ENSICAEN
ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'INGÉNIEURS DE CAEN
LE CENTRE DE RECHERCHE

2. Machines Asynchrones – Commandes

... à la découverte des machines électriques

1. Introduction
2. Machines asynchrones
 - Rotor
 - Principe de fonct.
 - Modélisation
 - Couples
 - Commandes
3. Machines synchrones

Il existe des solutions théoriques non implémentées en pratique agissant uniquement sur r_r ou encore V_s . La commande scalaire la plus répandue est la **commande scalaire en flux dîtes en U/f constant**. Le ratio U/f est homogène à un flux (1 WB = 1 V.s) :

$$C_{max} = \frac{3 \cdot p}{2 \cdot L'_{rs}} \cdot \left(\frac{V_s}{\omega_s}\right)^2$$

⚠ Cette solution permet de travailler à couple MAX constant dans les limites de la plage de fonctionnement de l'électronique de puissance.

48

2. Machines Asynchrones – Commandes

ENSICAEN
ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'INGÉNIEURS DE CAEN
LE CENTRE DE RECHERCHE

... à la découverte des machines électriques

1. Introduction

2. Machines asynchrones

- Rotor
- Principe de fonct.
- Modélisation
- Couples
- Commandes

3. Machines synchrones

Observons un exemple d'évolution du couple électromécanique en fonction de la vitesse :

49

2. Machines Asynchrones – Commandes

ENSICAEN
ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'INGÉNIEURS DE CAEN
LE CENTRE DE RECHERCHE

... à la découverte des machines électriques

1. Introduction

2. Machines asynchrones

- Rotor
- Principe de fonct.
- Modélisation
- Couples
- Commandes

3. Machines synchrones

Observons le schéma représentant l'implémentation en pratique d'une commande en fonctionnement moteur (réversibilité de l'électronique de puissance) :

Les lois de commande sont généralement implémentées sur MCU ou DSP

Deux capteurs de courant et un capteur de vitesse suffisent (commande avec capteur)

50

2. Machines Asynchrones – Commandes

ENSICAEN
ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'INGÉNIEURS DE CAEN
LE CENTRE DE RECHERCHE

... à la découverte des machines électriques

1. Introduction

2. Machines asynchrones

- Rotor
- Principe de fonct.
- Modélisation
- Couples
- Commandes

3. Machines synchrones

Que trouve-t-on dans un variateur de vitesse :

51

2. Machines Asynchrones – Commandes

ENSICAEN
ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'INGÉNIEURS DE CAEN
LE CENTRE DE RECHERCHE

... à la découverte des machines électriques

1. Introduction

2. Machines asynchrones

- Rotor
- Principe de fonct.
- Modélisation
- Couples
- Commandes

3. Machines synchrones

En fonctionnement génératrice, la principale utilisation de la MAS est la **MADA** (Machine Asynchrone à Double Alimentation). Nous retrouvons les MADA dans les éoliennes en forte puissance. Le principal avantage de cette technique de commande est que l'électronique de puissance est moins coûteuse et encombrante. Elle est en effet dimensionnée pour la puissance transportée au rotor (~25% de celle transitée au stator) :

52

ENSICAEN
ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'INGÉNIEURS DE CAEN
LE CENTRE DE RECHERCHE

2. Machines Asynchrones – Commandes

Les commandes vectorielles (action sur l'amplitude, la fréquence et la phase des grandeurs) reposent sur l'utilisation de transformations mathématiques permettant de passer de deux systèmes triphasés alternatifs de courants et de tensions en deux système biphasés de grandeurs continues (simplification du modèle dans une optique de commande) :

... à la découverte des machines électriques

1. Introduction
2. Machines asynchrones
 - Rotor
 - Principe de fonct.
 - Modélisation
 - Couples
 - Commandes
3. Machines synchrones

Simulation de commande

Carte dspace DS1104

53

3. Machines Synchrones

54

ENSICAEN
ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'INGÉNIEURS DE CAEN
LE CENTRE DE RECHERCHE

3. Machines Synchrones

Machine Synchrones

... à la découverte des machines électriques

1. Introduction
2. Machines asynchrones
 - Rotor
 - Principe de fonct.
 - Modélisation
 - Couples
 - Commandes
3. Machines synchrones

SYNCHRONOUS MOTORS

www.LearnEng...

0:03 / 4:13

<https://www.youtube.com/watch?v=VkJDXxZlIhs>

55

ENSICAEN
ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'INGÉNIEURS DE CAEN
LE CENTRE DE RECHERCHE

2. Machines Synchrones

Les machines synchrones sont très répandues dans les domaines de la **production** (centrales électriques, aéronautique, marine ...) ainsi que dans les grands domaines d'applications exigeant un **encombrement et un poids réduit** (aéronautique, automobile ...). Les gros alternateurs possèdent de plus un excellent rendement (~99% pour une MS de 1GW). Prenons quelques exemples d'applications :

... à la découverte des machines électriques

1. Introduction
2. Machines asynchrones
3. Machines synchrones
 - Rotor
 - Principe de fonct.
 - Modélisation
 - Couple
 - Commandes

AGV de Alstom (MS à aimants)

EX1 de Peugeot (MS à aimants)

Queen Mary 2 (MS à rotors bobinés - propulsion)

A380 de chez Airbus (MS – générateurs à fréquences variables VFG)

56

2. Machines Synchrones – Rotor

... à la découverte des machines électriques

1. Introduction
2. Machines asynchrones
3. Machines synchrones

- Rotor
- Principe de fonct.
- Modélisation
- Couple
- Commandes

Il existe deux grandes familles de rotors (ou roue polaire) chez les machines synchrones:

• **Rotor à électroaimants** (rotor bobiné).
Machines coûteuses très rencontrées dans les applications exigeant un fort couple et donc une très forte excitation (marine, production, soufflerie ...).

• **Rotor à aimants**. Machines restant encore coûteuses (vs MAS à cages), ceci étant principalement du au coût des aimants mais offrant néanmoins le rapport poids-encombrement-puissance le plus intéressant de toutes les machines tournantes en forte puissance.

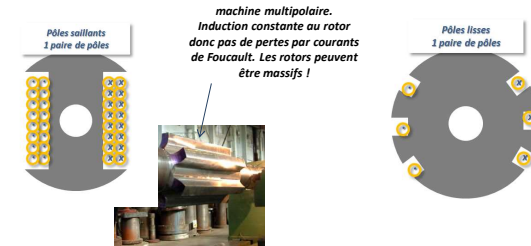
2. Machines Synchrones – Rotor

... à la découverte des machines électriques

1. Introduction
2. Machines asynchrones
3. Machines synchrones

- Rotor
- Principe de fonct.
- Modélisation
- Couple
- Commandes

Découvrons les MS à rotors bobinés à pôles lisses et pôles saillants. Comme pour les MAS à bagues ces machines sont relativement coûteuses et possèdent deux bagues assurant l'alimentation de l'inducteur (usure). Elles offrent néanmoins la possibilité de générer une très forte induction dans la machine :



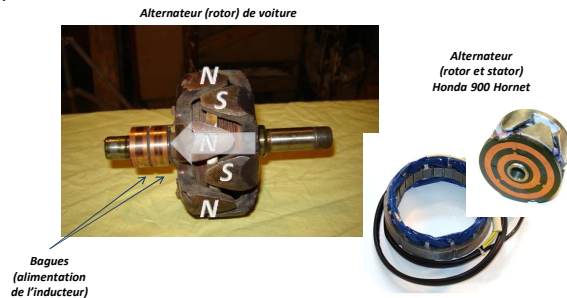
2. Machines Synchrones – Rotor

... à la découverte des machines électriques

1. Introduction
2. Machines asynchrones
3. Machines synchrones

- Rotor
- Principe de fonct.
- Modélisation
- Couple
- Commandes

Une machine synchrone connue, que tout le monde utilise au quotidien, est l'alternateur de voiture. Observons le rotor à griffes (bobiné) et la technique utilisée pour générer un grand nombre de paires de pôles :



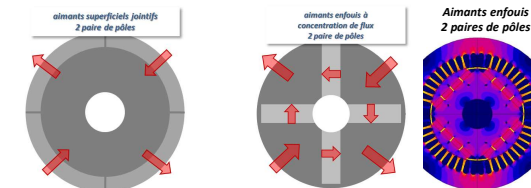
2. Machines Synchrones – Rotor

... à la découverte des machines électriques

1. Introduction
2. Machines asynchrones
3. Machines synchrones

- Rotor
- Principe de fonct.
- Modélisation
- Couple
- Commandes

Découvrons les MS à aimants permanents (MSAP). Leurs rotors offrent plusieurs avantages, notamment le fait d'offrir un très bon ratio poids-encombrement-puissance et aucunes pertes Joule côté rotor. Selon la technologie de conception (aimants enfouis, superficiels ...), ces machines peuvent tenir de très grandes vitesses de rotation. Prenons quelques exemples :



2. Machines Synchrones – Rotor

... à la découverte des machines électriques

1. Introduction
2. Machines asynchrones
3. Machines synchrones

- Rotor
- Principe de fonct.
- Modélisation
- Couple
- Commandes

Voici les principales familles de matériaux utilisés pour la réalisation d'aimants :

- **Ferrites (~0,4 T)** : solution économique
- **Sm Co (Samarium Cobalt - ~0,5 T)** : prix élevé du au Cobalt
- **Nd Fe B (Néodyme Fer Bore - ~1,3 T)** : prix élevé mais néanmoins en baisse (brevet). Sujet à l'oxydation
- **Al ni co (~1,2 T)** : se désaimante facilement mais est peu sensible à la température

61

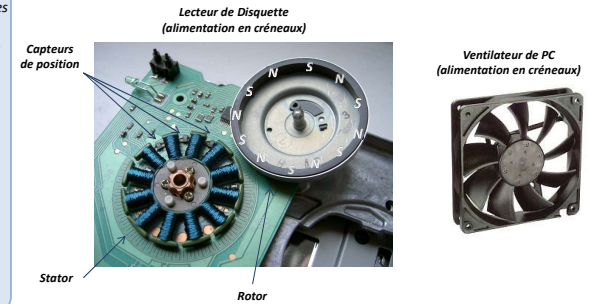
2. Machines Synchrones – Rotor

... à la découverte des machines électriques

1. Introduction
2. Machines asynchrones
3. Machines synchrones

- Rotor
- Principe de fonct.
- Modélisation
- Couple
- Commandes

Des célèbres machines synchrones à aimants à pôles lisses avec aimants superficiels jointifs, sont les "petites" machines tournantes utilisées dans les ventilateurs de PC, lecteurs CD ... (brushless DC motor) :



62

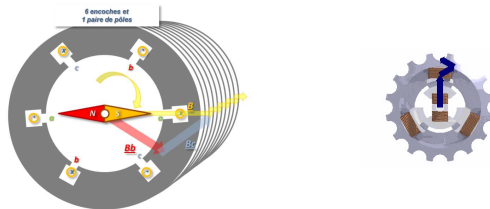
2. Machines Synchrones – Principe de fonctionnement

... à la découverte des machines électriques

1. Introduction
2. Machines asynchrones
3. Machines synchrones

- Rotor
- Principe de fonct.
- Modélisation
- Couple
- Commandes

Le principe de fonctionnement d'une machine synchrone est proche de celui d'une boussole baignant dans un champ magnétique tournant :



En fonctionnement normal (sans décrochage ...), une machine synchrone travaillera toujours au synchronisme (vitesse du champ tournant = vitesse du rotor) !

63

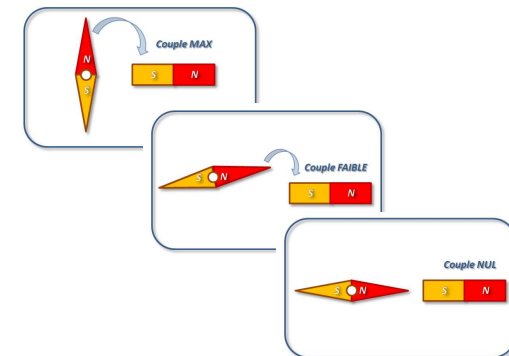
2. Machines Synchrones – Principe de fonctionnement

... à la découverte des machines électriques

1. Introduction
2. Machines asynchrones
3. Machines synchrones

- Rotor
- Principe de fonct.
- Modélisation
- Couple
- Commandes

De quoi dépend le couple électromécanique pouvant être délivré par la machine :



64

2. Machines Synchrones – Principe de fonctionnement

Le couple d'une MS est commandé en pilotant l'angle entre les champs statorique et rotorique. L'angle utilisé par la commande se nomme **angle d'autopilotage**. Le principe même de fonctionnement d'une MS impose donc des contraintes :

- Nous devons connaître la position exacte du rotor durant une commande (codeur incrémental avec top zéro ...). **Impossible de travailler avec un capteur de vitesse.**



... à la découverte des machines électriques

1. Introduction

2. Machines asynchrones

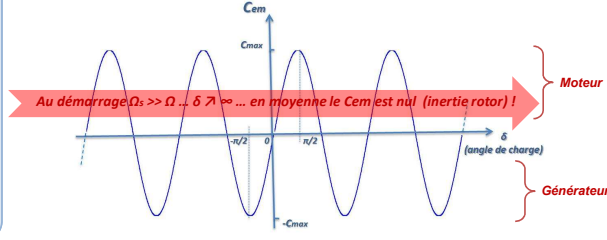
3. Machines synchrones

- Rotor
- Principe de fonct.
- Modélisation
- Couple
- Commandes

65

2. Machines Synchrones – Principe de fonctionnement

• Contrairement aux MAS, une MS ne peut pas démarrer par un couplage direct au réseau. Il y a donc obligation de **démarrer puis piloter une MS via une électronique de puissance (variateur...)**. En convention moteur, observons l'évolution du couple :



Au démarrage $\Omega_s \gg \Omega_r \dots \delta \nearrow \infty \dots$ en moyenne le C_{em} est nul (inertie rotor) !

Moteur

Générateur

... à la découverte des machines électriques

1. Introduction

2. Machines asynchrones

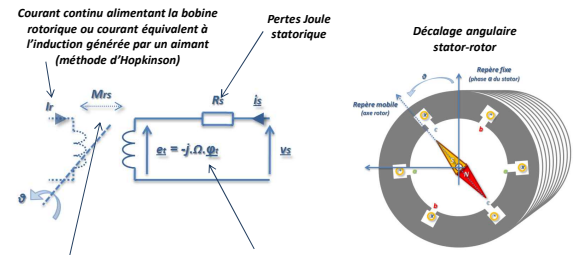
3. Machines synchrones

- Rotor
- Principe de fonct.
- Modélisation
- Couple
- Commandes

66

2. Machines Synchrones – Modélisation

Découvrons le modèle par phase d'une machine synchrone à pôles lisses en convention moteur (en régime permanent au 1^{er} harmonique et en régime non saturé) :



Courant continu alimentant la bobine rotorique ou courant équivalent à l'induction générée par un aimant (méthode d'Hopkinson)

Pertes Joule statorique

Décalage angulaire stator-rotor

Mutuelle inductance : $e_r = j \cdot \Omega_s \cdot \Phi_r$

Flux total embrassé par une phase statorique

Valeur MAX de l'inductance mutuelle entre enroulements statoriques et roue polaire.

... à la découverte des machines électriques

1. Introduction

2. Machines asynchrones

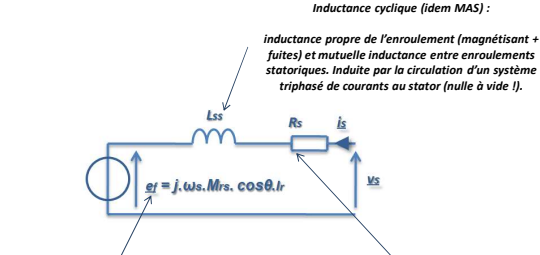
3. Machines synchrones

- Rotor
- Principe de fonct.
- Modélisation
- Couple
- Commandes

67

2. Machines Synchrones – Modélisation

Il existe plusieurs modèles de la MS en fonction des paramètres que nous souhaitons privilégier. L'un des plus répandu et identifiable est celui donné ci-dessous dit de **Behn-Eschenburg** :



Inductance cyclique (idem MAS) :

Inductance propre de l'enroulement (magnétisant + fuites) et mutuelle inductance entre enroulements statoriques. Induite par la circulation d'un système triphasé de courants au stator (nulle à vide I).

$e_r = j \cdot \omega_s \cdot M_{rs} \cdot \cos \theta \cdot i_r$

f_{cem} induite au stator par rotation de l'inducteur (nulle à rotor bloqué !)

Pour les gros alternateurs, $R_s \ll L_{ss} \cdot \omega_s$ (réactance synchrone = $L_{ss} \cdot \omega_s = X_s$) !

... à la découverte des machines électriques

1. Introduction

2. Machines asynchrones

3. Machines synchrones

- Rotor
- Principe de fonct.
- Modélisation
- Couple
- Commandes

68

2. Machines Synchrones – Modélisation

... à la découverte des machines électriques

1. Introduction

2. Machines asynchrones

3. Machines synchrones

- Rotor
- Principe de fonct.
- Modélisation
- Couple
- Commandes

Il est si nécessaire possible de tenir compte des **pertes fer**. Remarquons que les pertes par courants de Foucault sont souvent négligées au rotor (pas de variations d'induction). En fréquence variable, Les pertes fer modélisent quasiment uniquement les pertes par courants de Foucault :

69

2. Machines Synchrones – Couple

... à la découverte des machines électriques

1. Introduction

2. Machines asynchrones

3. Machines synchrones

- Rotor
- Principe de fonct.
- Modélisation
- Couple
- Commandes

Observons l'expression du couple électromécanique (pertes fer négligées). Cette représentation fait apparaître l'angle d'autopilotage Ψ représentant le déphasage entre ef et is :

Angle d'autopilotage. Proportionnel à $\pi/2$ près à l'angle entre les deux champs statorique et rotorique

$$P_{em} = 3 \cdot \langle ef \cdot is \rangle$$

$$C_{em} = \frac{P_{em}}{\Omega / p} = \frac{3 \cdot p \cdot E_f \cdot Is}{\Omega} \cdot \cos \Psi = 3 \cdot p \cdot \Psi_f \cdot Is \cdot \cos \Psi$$

70

2. Machines Synchrones – Couple

... à la découverte des machines électriques

1. Introduction

2. Machines asynchrones

3. Machines synchrones

- Rotor
- Principe de fonct.
- Modélisation
- Couple
- Commandes

Observons l'évolution du couple en fonction de l'angle d'autopilotage ψ (ψ_f et Is fixés) :

$$C_{em} = 3 \cdot p \cdot \Psi_f \cdot Is \cdot \cos \Psi = C_m \cdot \cos \Psi$$

71

2. Machines Synchrones – Couple

... à la découverte des machines électriques

1. Introduction

2. Machines asynchrones

3. Machines synchrones

- Rotor
- Principe de fonct.
- Modélisation
- Couple
- Commandes

Observons l'évolution du couple en fonction de la vitesse. Remarquons que ces deux grandeurs sont indépendantes. En effet, en travaillant avec une électronique de commande (variateur de vitesse) nous pouvons travailler jusqu'au couple MAX quelque soit la vitesse de travail (toujours au synchronisme) :

72

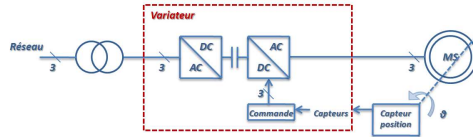
... à la découverte des machines électriques

1. Introduction
2. Machines asynchrones
3. Machines synchrones

- Rotor
- Principe de fonct.
- Modélisation
- Couple
- Commandes

Prenons un exemple de stratégie de commande. Une loi très répandue impose un **angle d'autopilotage** $\psi = 0$ (champs statorique et rotorique toujours en quadrature). En fonctionnement moteur, le couple électromécanique pouvant être fourni par la machine sera donc directement proportionnel à l'amplitude des courants absorbés :

$$C_{em} = 3 \cdot p \cdot \Psi_f \cdot I_s \cdot \cos \Psi = 3 \cdot p \cdot \Psi_f \cdot I_s$$

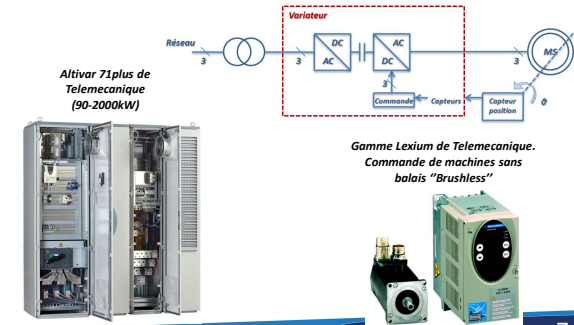


... à la découverte des machines électriques

1. Introduction
2. Machines asynchrones
3. Machines synchrones

- Rotor
- Principe de fonct.
- Modélisation
- Couple
- Commandes

L'électronique de puissance d'un variateur de vitesse pour une MS est la même que pour une MAS. **Seules les lois de commande diffèrent.** De plus une MS est forcément pilotée en utilisant un capteur de position :



Merci de
votre attention !

ELECTRONIQUE DE PUISSANCE



ENSICAEN
ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'INGÉNIEURS DE CAEN
LE CENTRE DE RECHERCHE

1. Introduction

En tant qu'Electronicien vous allez normalement être plus à l'aise avec ce qui suit. Il s'agit du domaine récent de **l'Electronique de Puissance** (~50ans). Les convertisseurs statiques travaillent autour de composants actifs faisant partie des familles des transistors, des thyristors et des diodes. Nous parlerons d'**interrupteur statique** :

- **Transistors (IGBT, MOSFET)**
- **Thyristors (IGCT, GTO, Thyristors)**
- **Diodes**

... à la découverte de l'Electronique de Puissance

1. Introduction
 - Applications
 - Technologie
 - Composants
 - Conversions
2. Redresseurs
 - Commandés
 - Non commandés
3. MLI
4. Hacheurs
 - Bras de pont
 - 4 quadrants
 - Hacheur série
 - Hacheur parallèle
 - Hacheur flyback
 - Hacheur forward
 - Hach. à résonance
5. Onduleurs

3

ENSICAEN
ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'INGÉNIEURS DE CAEN
LE CENTRE DE RECHERCHE

1. Introduction - Applications

Prenons quelques exemples d'applications travaillant autour d'IGBT :

- Applications
- Technologie
- Composants
- Conversions

2. Redresseurs
 - Commandés
 - Non commandés
3. MLI
4. Hacheurs
 - Bras de pont
 - 4 quadrants
 - Hacheur série
 - Hacheur parallèle
 - Hacheur flyback
 - Hacheur forward
 - Hach. à résonance
5. Onduleurs

Queen Mary 2 (POD)

Plaques à induction

AGV- Alstom

Toyota PRIUS

TGV Duplex - Alstom

Module IGBT AGV

4

1. Introduction - Applications

ENSICAEN
ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'INGÉNIEURS DE CAEN
LE CENTRE DE RECHERCHE

Prenons encore quelques exemples d'applications travaillant autour d'IGBT ou de MOSFET :

... à la découverte de l'Électronique de Puissance

1. Introduction

- Applications
- Technologie
- Composants
- Conversions

2. Redresseurs

- Commandés
- Non commandés

3. MLI

4. Hacheurs

- Bras de pont
- 4 quadrants
- Hacheur série
- Hacheur parallèle
- Hacheur flyback
- Hacheur forward
- Hach. à résonance

5. Onduleurs

Alimentation de PC portable

Alimentation de PC fixe

Alimentation XBOX 360 (MOSFET)

Variateur de vitesse Altivar 61 (IGBT)

5

1. Introduction - Applications

ENSICAEN
ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'INGÉNIEURS DE CAEN
LE CENTRE DE RECHERCHE

Prenons quelques exemples d'applications travaillant autour de thyristors (GTO, IGCT, TRIAC ...):

... à la découverte de l'Électronique de Puissance

1. Introduction

- Applications
- Technologie
- Composants
- Conversions

2. Redresseurs

- Commandés
- Non commandés

3. MLI

4. Hacheurs

- Bras de pont
- 4 quadrants
- Hacheur série
- Hacheur parallèle
- Hacheur flyback
- Hacheur forward
- Hach. à résonance

5. Onduleurs

IFA 2000 station de redressement HVDC France-Angleterre (Thyristors)

Chauffeur d'air de TATT (Thyristors)

Thalassa de (fremer) (Thyristors)

6

1. Introduction - Technologie

ENSICAEN
ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'INGÉNIEURS DE CAEN
LE CENTRE DE RECHERCHE

Voici les différents symboles associés aux interrupteurs statiques rencontrés en Electronique de puissance :

... à la découverte de l'Électronique de Puissance

1. Introduction

- Applications
- Technologie
- Composants
- Conversions

2. Redresseurs

- Commandés
- Non commandés

3. MLI

4. Hacheurs

- Bras de pont
- 4 quadrants
- Hacheur série
- Hacheur parallèle
- Hacheur flyback
- Hacheur forward
- Hach. à résonance

5. Onduleurs

• **MOSFET :**

Canal n

Canal p

• **IGBT (Transistor Bipolaire à Grille Isolée) :**

• **GTO (Gate Turn Off Thyristor) :**

• **Thyristor :**

7

1. Introduction - Technologie

ENSICAEN
ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'INGÉNIEURS DE CAEN
LE CENTRE DE RECHERCHE

En Electronique de puissance, les transistors ne sont utilisés qu'en commutation. En très forte puissance, ces composants sont dits à structures verticales :

... à la découverte de l'Électronique de Puissance

1. Introduction

- Applications
- Technologie
- Composants
- Conversions

2. Redresseurs

- Commandés
- Non commandés

3. MLI

4. Hacheurs

- Bras de pont
- 4 quadrants
- Hacheur série
- Hacheur parallèle
- Hacheur flyback
- Hacheur forward
- Hach. à résonance

5. Onduleurs

MOSFET 600V 20A

IGBT 3300V 1200A

GTO 6000V 6000A

Circulation verticale du courant

Le choix des transistors utilisés se fait essentiellement en fonction de la gamme de tension et de courant à couper ainsi que de la fréquence de travail

8

1. Introduction - Technologie

... à la découverte de l'Electronique de Puissance

1. Introduction

- Applications
- Technologie
- Composants
- Conversions

2. Redresseurs

- Commandés
- Non commandés

3. MLI

4. Hacheurs

- Bras de pont
- 4 quadrants
- Hacheur série
- Hacheur parallèle
- Hacheur flyback
- Hacheur forward
- Hach. à résonance

5. Onduleurs

Contrairement aux thyristors existants depuis plus de 30 ans, les IGBT sont de conception récente (~1990) et autorisent l'utilisation à fréquence élevée du principe de MLI. De part leurs polyvalences, les transistors IGBT sont les plus répandus en forte puissance :

| | MOSFET 600V | IGBT 600V | IGBT 1700V | IGBT 3300V | IGBT 6500V | GTO 6000V | Thyristor 16000V |
|-------------------|-------------|-----------|------------|------------|------------|-----------|------------------|
| Fréquence typique | 15-100KHz | 6-40KHz | 3-10KHz | 1-5KHz | 0,8-2KHz | 0,3-1KHz | 300Hz |

Tendances Générales (caractéristiques moyennes)

9

1. Introduction - Technologie

... à la découverte de l'Electronique de Puissance

1. Introduction

- Applications
- Technologie
- Composants
- Conversions

2. Redresseurs

- Commandés
- Non commandés

3. MLI

4. Hacheurs

- Bras de pont
- 4 quadrants
- Hacheur série
- Hacheur parallèle
- Hacheur flyback
- Hacheur forward
- Hach. à résonance

5. Onduleurs

Les IGBT sont en fait des transistors bipolaires attaqués par un MOSFET. Ils allient ainsi les avantages des deux familles de transistors :

• **Avantages liés à l'étage MOSFET :**

- commande en tension (V_{GE})
- consommation plus faible de la commande

• **Avantages liés à l'étage Bipolaire :**

- faibles pertes en conduction
- gammes plus élevées des tensions et courants de travail

10

1. Introduction - Composants

... à la découverte de l'Electronique de Puissance

1. Introduction

- Applications
- Technologie
- Composants
- Conversions

2. Redresseurs

- Commandés
- Non commandés

3. MLI

4. Hacheurs

- Bras de pont
- 4 quadrants
- Hacheur série
- Hacheur parallèle
- Hacheur flyback
- Hacheur forward
- Hach. à résonance

5. Onduleurs

Dans la suite de ce cours, les différents interrupteurs statiques seront supposés idéaux !

Commençons par la caractéristique idéale de la diode :

11

1. Introduction - Composants

... à la découverte de l'Electronique de Puissance

1. Introduction

- Applications
- Technologie
- Composants
- Conversions

2. Redresseurs

- Commandés
- Non commandés

3. MLI

4. Hacheurs

- Bras de pont
- 4 quadrants
- Hacheur série
- Hacheur parallèle
- Hacheur flyback
- Hacheur forward
- Hach. à résonance

5. Onduleurs

Continuons avec la caractéristique idéale des transistors (IGBT, MOSFET ...) :

12

1. Introduction - Composants

... à la découverte de l'Electronique de Puissance

1. Introduction

- Applications
- Technologie
- Composants
- Conversions

2. Redresseurs

- Commandés
- Non commandés

3. MLI

4. Hacheurs

- Bras de pont
- 4 quadrants
- Hacheur série
- Hacheur parallèle
- Hacheur flyback
- Hacheur forward
- Hach. à résonance

5. Onduleurs

Continuons avec la caractéristique idéale des thyristors (IGCT, GTO, SCR ...) :

Faute de temps, nous ne nous intéresserons qu'aux familles des diodes et des transistors. Les thyristors étant la chasse gardée des très fortes puissance, application chauffage, HVDC ...

13

1. Introduction - Conversion

... à la découverte de l'Electronique de Puissance

1. Introduction

- Applications
- Technologie
- Composants
- Conversions

2. Redresseurs

- Commandés
- Non commandés

3. MLI

4. Hacheurs

- Bras de pont
- 4 quadrants
- Hacheur série
- Hacheur parallèle
- Hacheur flyback
- Hacheur forward
- Hach. à résonance

5. Onduleurs

Nous allons dans la suite de ce cours nous atteler à découvrir les principales structures à base d'interrupteurs statiques (**redresseurs, hacheurs et onduleurs**). Toutes ces structures permettent de réaliser des conversions électrique/électrique :

14

1. Introduction - Conversion

... à la découverte de l'Electronique de Puissance

1. Introduction

- Applications
- Technologie
- Composants
- Conversions

2. Redresseurs

- Commandés
- Non commandés

3. MLI

4. Hacheurs

- Bras de pont
- 4 quadrants
- Hacheur série
- Hacheur parallèle
- Hacheur flyback
- Hacheur forward
- Hach. à résonance

5. Onduleurs

Faute de temps, nous ne découvrirons pas certaines structures travaillant autour de Thyristors (**gradataeur, cycloconvertisseur ...**). Rappelons que les thyristors sont principalement rencontrés dans les applications en forte puissance :

15

2. Redresseurs

16

2. Redresseurs

... à la découverte de l'Électronique de Puissance

1. Introduction

- Applications
- Technologie
- Composants
- Conversions

2. Redresseurs

- Non commandés
- Commandés

3. MLI

4. Hacheurs

- Bras de pont
- 4 quadrants
- Hacheur série
- Hacheur parallèle
- Hacheur flyback
- Hacheur forward
- Hach. à résonance

5. Onduleurs

Les redresseurs sont des convertisseurs alternatif vers continu. La source est généralement une source de tension. Ils sont classés en deux grandes familles :

• **Non commandés** : N'utilisent que des diodes. Aucune possibilité d'ajuster le niveau de tension en sortie sur le bus continu.

• **Commandés** : Ajout d'un hacheur pour ajuster le niveau de tension sur le bus continu. Ils sont souvent utilisés pour assurer une absorption sinusoïdale du courant en entrée. Des solutions à base de thyristors existent encore en forte puissance mais tendent à disparaître en faible et moyenne puissance.

2. Redresseurs - Non Commandé

... à la découverte de l'Électronique de Puissance

1. Introduction

- Applications
- Technologie
- Composants
- Conversions

2. Redresseurs

- Non commandés
- Commandés

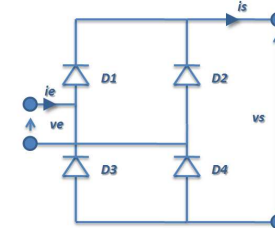
3. MLI

4. Hacheurs

- Bras de pont
- 4 quadrants
- Hacheur série
- Hacheur parallèle
- Hacheur flyback
- Hacheur forward
- Hach. à résonance

5. Onduleurs

La structure la plus rencontrée en Électronique de puissance est celle du **redresseur à double alternance** souvent appelé **pont de Graetz**. Voici ci-dessous le schéma correspondant en monophasé. Seul le monophasé sera étudié, le passage au triphasé étant guère plus complexe :



2. Redresseurs - Non Commandé

... à la découverte de l'Électronique de Puissance

1. Introduction

- Applications
- Technologie
- Composants
- Conversions

2. Redresseurs

- Non commandés
- Commandés

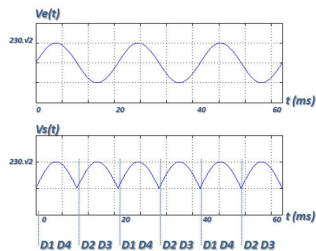
3. MLI

4. Hacheurs

- Bras de pont
- 4 quadrants
- Hacheur série
- Hacheur parallèle
- Hacheur flyback
- Hacheur forward
- Hach. à résonance

5. Onduleurs

Observons les formes d'ondes en sortie du redresseur lorsque celui-ci attaque une charge résistive :



2. Redresseurs - Non Commandé

... à la découverte de l'Électronique de Puissance

1. Introduction

- Applications
- Technologie
- Composants
- Conversions

2. Redresseurs

- Non commandés
- Commandés

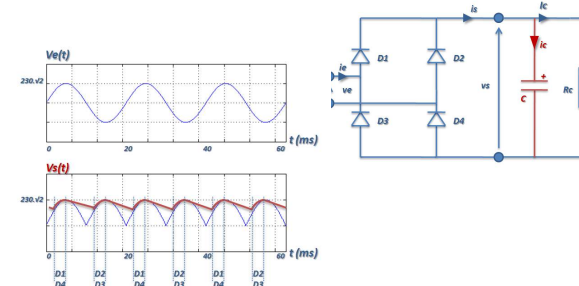
3. MLI

4. Hacheurs

- Bras de pont
- 4 quadrants
- Hacheur série
- Hacheur parallèle
- Hacheur flyback
- Hacheur forward
- Hach. à résonance

5. Onduleurs

Les redresseurs sont le plus souvent utilisés avec un condensateur de filtrage. Nous parlons alors de redresseur à "capa en tête". Observons les formes d'ondes en sortie du redresseur lorsque celui-ci attaque une charge résistive :



2. Redresseurs - Non Commandé

... à la découverte de l'Électronique de Puissance

1. Introduction

- Applications
- Technologie
- Composants
- Conversions

2. Redresseurs

- Non commandés
- Commandés

3. MLI

4. Hacheurs

- Bras de pont
- 4 quadrants
- Hacheur série
- Hacheur parallèle
- Hacheur flyback
- Hacheur forward
- Hach. à résonance

5. Onduleurs

L'ondulation de tension aux bornes de la charge dépend de la constante de temps $R_c \cdot C$, qui doit être supérieure à une demi période du réseau. Au fonctionnement nominal de la charge, en augmentant C nous diminuons l'ondulation de tension en sortie. Cependant l'encombrement et le coût de l'ensemble augmentent. Suite à quelques approximations (courant constant en sortie, décharge sur une demi période du réseau et linéarisation de l'expression de la décharge), l'expression de l'ondulation de tension peut s'écrire :

$$\Delta v_s = \frac{I_c}{2 \cdot C \cdot f}$$

2. Redresseurs - Non Commandé

... à la découverte de l'Électronique de Puissance

1. Introduction

- Applications
- Technologie
- Composants
- Conversions

2. Redresseurs

- Non commandés
- Commandés

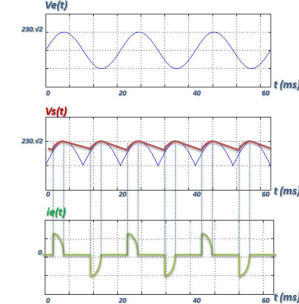
3. MLI

4. Hacheurs

- Bras de pont
- 4 quadrants
- Hacheur série
- Hacheur parallèle
- Hacheur flyback
- Hacheur forward
- Hach. à résonance

5. Onduleurs

L'énorme inconvénient de ce type de montage réside dans la forme d'onde du courant absorbé par le redresseur sur le réseau. Ce courant est pulsé et est donc très riche en harmoniques (puissance déformante):



2. Redresseurs - Commandé

... à la découverte de l'Électronique de Puissance

1. Introduction

- Applications
- Technologie
- Composants
- Conversions

2. Redresseurs

- Non commandés
- Commandés

3. MLI

4. Hacheurs

- Bras de pont
- 4 quadrants
- Hacheur série
- Hacheur parallèle
- Hacheur flyback
- Hacheur forward
- Hach. à résonance

5. Onduleurs



Afin de solutionner le problème précédemment rencontré (courant d'entrée riche en harmoniques), non avons recours à l'utilisation de redresseurs commandés !

- Contrairement à celle des redresseurs non commandés, l'étude des redresseurs commandé commence à être complexe et demande de solide base en Automatique (modélisation du système, design des régulateurs en analogique ou en numérique, implémentation ...).

- En effet, seule l'implémentation de lois de commande peuvent permettre l'absorption du courant sinusoïdal en entrée tout en régulant le niveau de tension sur le bus continu !

2. Redresseurs - Commandé

... à la découverte de l'Électronique de Puissance

1. Introduction

- Applications
- Technologie
- Composants
- Conversions

2. Redresseurs

- Non commandés
- Commandés

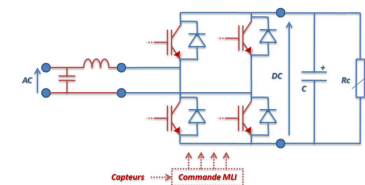
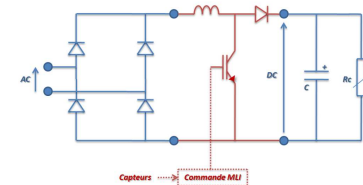
3. MLI

4. Hacheurs

- Bras de pont
- 4 quadrants
- Hacheur série
- Hacheur parallèle
- Hacheur flyback
- Hacheur forward
- Hach. à résonance

5. Onduleurs

Voici les deux principales structures rencontrées :



3. MLI (Modulation par Largeur d'Impulsion)

25

ENSICAEN
ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'INGÉNIEURS DE CAEN
LE CENTRE DE RECHERCHE

3. MLI - Modulation par Largeur d'Impulsions

... à la découverte de l'Electronique de Puissance

1. Introduction

- Applications
- Technologie
- Composants
- Conversions

2. Redresseurs

- Non commandés
- Commandés

3. MLI

4. Hacheurs

- Bras de pont
- 4 quadrants
- Hacheur série
- Hacheur parallèle
- Hacheur flyback
- Hacheur forward
- Hach. à résonance

5. Onduleurs

La **MLI** (Modulation par Largeur d'Impulsions) ou **PWM** (Pulse Width Modulation) est une technique très couramment rencontrée en Electronique de puissance afin de synthétiser des signaux analogiques à partir de signaux à états discrets. Les signaux de commandes TOR (Tout ou Rien) sont envoyés aux interrupteurs statiques.

⚠ Période fixe mais rapport cyclique variable !

26

ENSICAEN
ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'INGÉNIEURS DE CAEN
LE CENTRE DE RECHERCHE

3. MLI - Modulation par Largeur d'Impulsions

... à la découverte de l'Electronique de Puissance

1. Introduction

- Applications
- Technologie
- Composants
- Conversions

2. Redresseurs

- Non commandés
- Commandés

3. MLI

4. Hacheurs

- Bras de pont
- 4 quadrants
- Hacheur série
- Hacheur parallèle
- Hacheur flyback
- Hacheur forward
- Hach. à résonance

5. Onduleurs

Le type de modulation précédemment présentée est dite *intersective*. La porteuse est souvent réalisée à partir d'un signal triangulaire ou en dents de scie. Ce type de modulation peut aussi bien être analogique que numérique.

Observons un exemple de signal MLI. Le signal modulant est une sinusoïde à 50Hz et la porteuse un signal en dents de scie à 4KHz.

27

ENSICAEN
ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'INGÉNIEURS DE CAEN
LE CENTRE DE RECHERCHE

3. MLI - Modulation par Largeur d'Impulsions

... à la découverte de l'Electronique de Puissance

1. Introduction

- Applications
- Technologie
- Composants
- Conversions

2. Redresseurs

- Non commandés
- Commandés

3. MLI

4. Hacheurs

- Bras de pont
- 4 quadrants
- Hacheur série
- Hacheur parallèle
- Hacheur flyback
- Hacheur forward
- Hach. à résonance

5. Onduleurs

Observons l'allure du spectre du signal précédent avec une porteuse à 50KHz :

⚠ En travaillant à fréquence de découpage élevée, nous repoussons les raies parasites dans les hautes fréquences. Dans les limites technologiques (composants, CEM ...), nous chercherons le plus souvent à travailler à des fréquences de découpage élevées (IGBT - qq10KHz)

28

4. Hacheurs

29

ENSICAEN
ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'INGÉNIEURS DE CAEN
LE CENTRE DE RECHERCHE

4. Hacheurs

... à la découverte de l'Electronique de Puissance

1. Introduction
 - Applications
 - Technologie
 - Composants
 - Conversions
2. Redresseurs
 - Non commandés
 - Commandés
3. MLI
4. Hacheurs
 - Bras de pont
 - 4 quadrants
 - Hacheur série
 - Hacheur parallèle
 - Hacheur flyback
 - Hacheur forward
 - Hach. à résonance
5. Onduleurs

Cette partie n'a pas encore été rédigée faute de temps !!!

30

5. Onduleurs

31

ENSICAEN
ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'INGÉNIEURS DE CAEN
LE CENTRE DE RECHERCHE

5. Onduleurs

Un onduleur est en fait un hacheur 4 quadrants. Seule la loi de commande diffère. La référence de tension n'est plus une constante (comme pour un simple hacheur) mais une grandeur sinusoïdale.

1. Introduction
 - Applications
 - Technologie
 - Composants
 - Conversions
2. Redresseurs
 - Non commandés
 - Commandés
3. MLI
4. Hacheurs
 - Bras de pont
 - 4 quadrants
 - Hacheur série
 - Hacheur parallèle
 - Hacheur flyback
 - Hacheur forward
 - Hach. à résonance
5. Onduleurs

32



*Merci de
votre attention !*













