

**Électrotechnique
et normalisation**

Équipements de puissance

Henry Ney

Professeur agrégé d'électrotechnique

Noël Morel

Agrégé de Génie Électrique

Professeur au Lycée Carriat, Bourg-en-Bresse

**NATHAN
TECHNIQUE**

Édition : Patrick Gonidou
Coordination artistique : Isabelle Jalfre
Fabrication : Pascal Mégret
Iconographie : Véronique Brown
Maquette couverture : François Durkheim/Tagaro ! DDB & Co
Conception intérieure : Isabelle Jalfre
Composition : APS/Chromostyle
Schémas : APS/Chromostyle

Crédit photographique :

p. 7 : © EDF/Berenger ; © EDF/Charliat
p. 8 : © EDF/Brigaud
p. 9 : © EDF/Brigaud
p. 10 : © EDF/Ehermann
p. 12 : © EDF
p. 13 : © EDF Cieutat
p. 14 : © EDF
p. 15 : © EDF/De Seynes
p. 23 : © Schneider Electric
p. 25 : © France Transfo

p. 26 : © France Transfo
p. 27 : © Alsthom
p. 28 : © Alsthom
p. 29 haut : © France Transfo
p. 29 bas : © Schneider Electric
p. 30 gauche : © France Transfo
p. 30 droite : © Schneider Electric
p. 39 : © Schneider Electric
p. 45 : © Hoaqui/Zefa - Fritz, Guntmar
p. 56 : © Schneider Electric

p. 74 : © Schneider Electric
p. 75 : © Schneider Electric
p. 118 gauche : © Mazda
p. 118 droite : © Calor/Groupe SEB
p. 121 : © Leroy-Somer
p. 123 : © Leroy-Somer
p. 133 : © Leroy-Somer
p. 138 gauche : © Leroy-Somer
p. 138 droite : © Parvex
p. 140 : © Parvex

© Nathan/HER, 2000 - 9, rue Méchain - 75014 Paris,
pour la première édition
© Nathan/VUEF, 2001, pour la présente édition
ISBN : 2-09-178759-0



"Le photocopillage, c'est l'usage abusif et collectif de la photocopie sans autorisation des auteurs et des éditeurs. Largement répandu dans les établissements d'enseignement, le photocopillage menace l'avenir du livre, car il met en danger son équilibre économique. Il prive les auteurs d'une juste rémunération. En dehors de l'usage privé du copiste, toute reproduction totale ou partielle de cet ouvrage est interdite."

JP Conil
9, allée H. Daumier
42 100 ST ETIENNE
jp.conil@freeurf.fr

Avant-propos

L'étendue des connaissances étant de plus en plus importante, les bases de données, qu'elles soient informatiques ou sur support papier, sont devenues indispensables. La collection **Électrotechnique et normalisation** constitue une base de données facilement accessible, consultable à tout moment et en toutes circonstances.

L'ouvrage **Équipements de puissance** est le quatrième volet de la collection **Électrotechnique et normalisation** qui comporte par ailleurs trois autres parties : **Installations électriques**, **Schémas d'électricité** et **Éléments d'automatismes**.

Cette nouvelle édition a été complètement restructurée, et des mises à jours ont été réalisées sur : **la production, le transport, la distribution d'électricité**, ainsi que sur **l'alimentation en énergie, et la protection commande**. De nouvelles fiches ont été établies en **électronique de puissance** et pour **les machines tournantes**.

Les recherches dans l'ouvrage peuvent s'effectuer simplement :

- soit par thèmes (le classement en parties et en sous-parties est conforme au programme des classes de STI Génie électrotechnique),
- soit par mots clés, en se reportant à l'index alphabétique.

La présentation sous forme de fiches facilite la consultation. Pour chaque objet présenté, sont indiqués les fonctions réalisées, les modèles physiques utilisés, les éléments de construction, les caractéristiques techniques. Les fiches contiennent les différents éléments utiles au technicien : textes, formules, courbes, tableaux, figures, schémas, dessins et photos.

Cet ouvrage permettra aux futurs professionnels d'effectuer ou d'étudier des installations électriques qui soient conformes aux normes françaises de l'AFNOR (Association Française de Normalisation), établies en liaison avec la CEI (Commission Électrotechnique Internationale) et l'UTE (Union Technique de l'Électricité).

Nous espérons contribuer à la formation des futurs techniciens et professionnels, en mettant à leur disposition une nouvelle base de données couvrant les programmes d'enseignement des lycées d'enseignement technique et professionnel. Ces outils ont pour seule ambition d'apporter les contenus les mieux adaptés à leurs besoins.

Les auteurs

Sommaire



1. Production, transport et distribution de l'électricité

1. 1. Production de l'électricité

1. Production d'énergie électrique en France	6
2. Centrales hydrauliques de haute chute	7
3. Centrales hydrauliques de moyenne chute	8
4. Centrales hydrauliques de basse chute	9
5. Centrales thermiques à flamme	10
6. Centrales thermiques nucléaires	11
7. Centrales nucléaires à eau pressurisée	12

1. 2. Transport de l'électricité

8. Réseau d'interconnexion	13
9. Mouvements d'énergie électrique	15

1. 3. Distribution de l'électricité

10. Structure d'un réseau moyenne tension (5 à 30 kV)	16
11. Gestion de l'énergie	17
12. Tarification de l'énergie	19



2. Alimentation en énergie électrique

2. 1. Sources d'alimentation

13. Structure des postes de livraison	22
14. Cellules haute tension	24
15. Transformateurs de distribution	25
16. Construction des transformateurs	26
17. Couplages des transformateurs	31
18. Caractéristiques et symboles des transformateurs	33
19. Comptage de l'énergie	35
20. Schémas des liaisons à la terre	36
21. Compensation du facteur de puissance	37
22. Alimentation sans coupure	40
23. Alimentation normale-secours	41
24. Diverses sources d'énergie	42

2. 2. Installations de distribution

25. Structure des réseaux en basse tension	43
26. Canalisations aériennes	44
27. Canalisations souterraines	46
28. Canalisations préfabriquées	48
29. Résumé des règles relatives aux sections et protections	51
30. Calcul des courants de court-circuit	52
31. Sectionneurs et consignations	56



3. Protection et commande

3. 1. Protection des matériels

32. Section des conducteurs et choix des protections	58
33. Sélectivité des protections	63
34. Filiation de l'appareillage	65

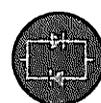
3. 2. Protection des personnes

35. Régimes de neutre	67
36. Neutre à la terre TT	68

37. Mise au neutre TN	69
38. Neutre isolé IT	72

3. 3. Commander la puissance

39. Départs moteurs	75
40. Choix d'un contacteur	76



4. Électronique de puissance

4. 1. Composants électroniques

41. Composants et fonctions de l'électronique de puissance	78
42. Diodes de redressement	79
43. Caractéristiques des thyristors	80
44. Diac et triac	83
45. Transistors bipolaires de puissance	85
46. Transistors MOS et IGBT	87
47. Amplificateur opérationnel	88

4. 2. Fonctions de l'électronique

48. Redressement par diodes	90
49. Redressement contrôlé	94
50. Hacheurs	97
51. Onduleurs	100
52. Gradateurs	103
53. Alimentations à découpage	105

4. 3. Vitesse variable

54. Rappels de mécanique	106
55. Asservissement et régulation	108
56. Variateur de vitesse pour machines à courant continu	110
57. Variateur pour moteurs asynchrones triphasés	112
58. Symboles en électronique de puissance	113



5. Conversion de l'énergie

5. 1. Chauffage industriel

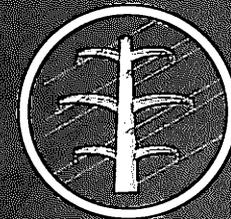
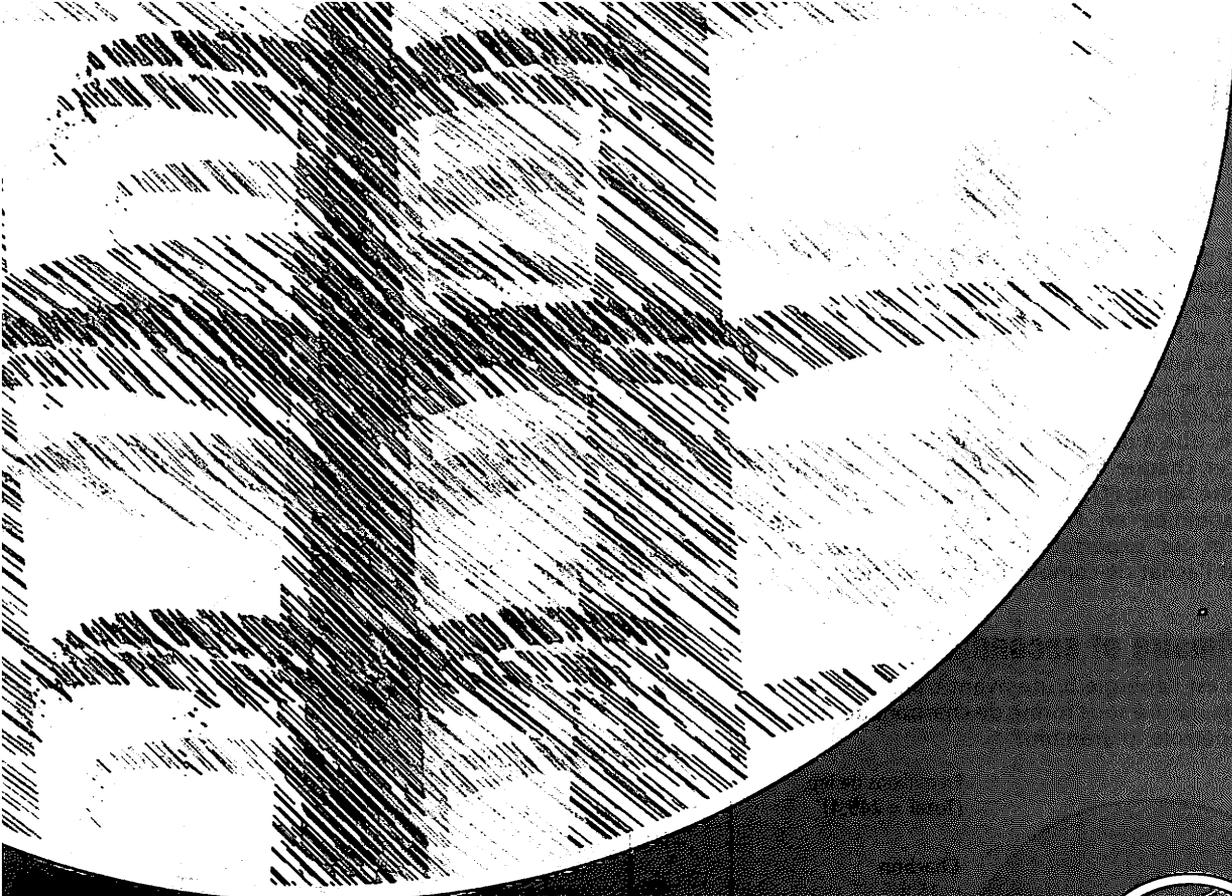
59. Chauffage par résistance	116
60. Fours et étuves industriels	117
61. Chauffage par infrarouge	118
62. Capteurs de température	119

5. 2. Machines tournantes

63. Construction des moteurs asynchrones triphasés	120
64. Caractéristiques des moteurs asynchrones triphasés	124
65. Démarreurs électroniques	125
66. Freinage des moteurs asynchrones	127
67. Choix d'un moteur asynchrone triphasé	128
68. Moteur monophasé - Moteur linéaire	132
69. Alternateur - Moteur synchrone	133
70. Moteur synchrone autopiloté	134
71. Construction des machines à courant continu	135
72. Caractéristiques des machines à courant continu	139
73. Moteurs universels - Moteurs à entrefer plan	140
74. Moteur pas à pas	141

Index alphabétique

143



1 - Production, transport et distribution de l'électricité

Sommaire

1 - 1 - Production de l'électricité

- 1. Production d'énergie électrique en France p. 6
- 2. Centrales hydrauliques de haute chute p. 7
- 3. Centrales hydrauliques de moyenne chute p. 8
- 4. Centrales hydrauliques de basse chute p. 9
- 5. Centrales thermiques à flamme..... p. 10
- 6. Centrales thermiques nucléaires p. 11
- 7. Centrales nucléaires à eau pressurisée p. 12

1 - 2 - Transport de l'électricité

- 8. Réseau d'interconnexion..... p. 13
- 9. Mouvements d'énergie électrique p. 15

1 - 3 - Distribution de l'électricité

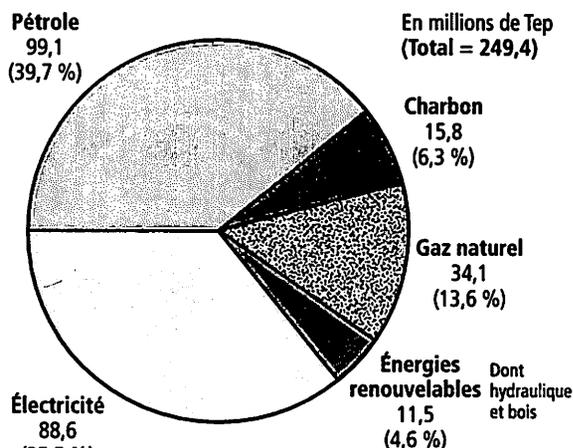
- 10. Structure d'un réseau moyenne tension (5 à 30 kV) p. 16
- 11. Gestion de l'énergie p. 17
- 12. Tarification de l'énergie p. 19

L'évolution rapide de notre mode de vie date du début du 19^e siècle, avec l'apparition de la machine à vapeur. Dès lors, pour s'éclairer, se déplacer, produire, l'homme a remplacé l'énergie animale par l'énergie mécanique.

Aux énergies naturelles directement utilisables (animaux, vents, chutes d'eau) se sont ajoutés le charbon, le pétrole, le gaz, et l'énergie nucléaire. Le souci de réduire notre dépendance énergétique, due à nos importations de pétrole, nous conduit à remplacer, chaque fois que cela est possible le fuel lourd par l'électricité. Ainsi, EDF, qui fournissait en 1970 25 % de l'énergie consommée en France, en distribue actuellement 41,4 %, et les exportations d'énergie électrique 57,4 TWh couvrent l'achat de combustible à l'étranger.

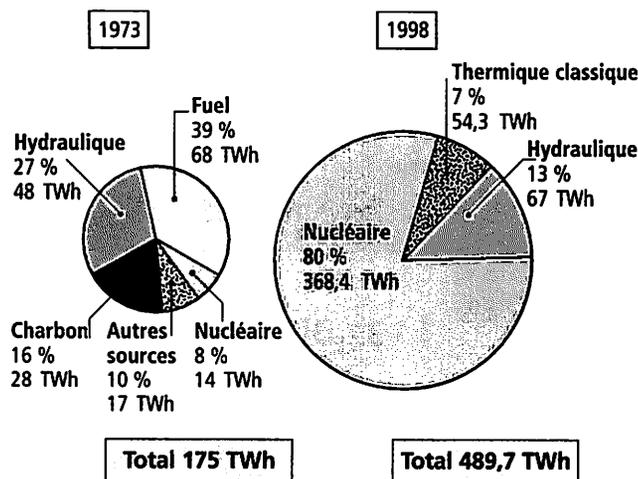
1. Énergie primaire et secondaire

L'énergie primaire est l'énergie brute avant transformation ; on la trouve dans la nature sous forme de charbon, de chutes d'eau, de gaz, de pétrole, d'uranium.



Consommation d'énergies primaires en France en 1998.

L'électricité (énergie secondaire) est obtenue principalement à partir du charbon, de l'énergie hydraulique et de l'énergie nucléaire.



Répartition des différentes sources énergétiques dans la production totale d'électricité.

2. Unités de mesure

L'unité de mesure la plus couramment employée est la Tep (Tonne équivalent pétrole). La consommation totale d'énergie en France en 1998, a été de 249,4 millions de Tep.

On emploie aussi la Tec (Tonne équivalent charbon).

- 1 tonne de combustible minéral = 1 Tec.
- 1 tonne de produit pétrolier = 1,5 Tec.
- 1 000 thermies de gaz naturel = 0,15 Tec.
- 1 000 kWh d'électricité = 0,33 Tec.

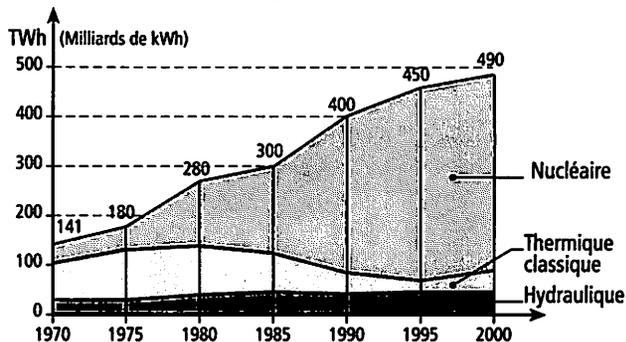
On sait que :

1 000 kW = 1 mégawatt = 1 360 chevaux-vapeur.

Les énergies renouvelables sont essentiellement l'hydraulique et, pour 10 %, le bois, les déchets du bois et les déchets urbains.

3. Évolution de la production d'énergie électrique

En 1960, l'énergie hydraulique et l'énergie thermique étaient à parts égales 50 % chacune, puis la part de l'énergie thermique a augmenté jusqu'aux années 1980. Depuis cette période, le nucléaire tend à remplacer le thermique classique alors que l'hydraulique augmente très faiblement.



4. Modes de production de l'énergie électrique

a) Les centrales hydrauliques

Elles sont réparties sur tout le territoire, plus spécialement en montagne, EDF dispose d'environ 500 centrales hydrauliques.

b) Les centrales thermiques nucléaires

Elles sont réparties sur 20 sites différents. Ces centrales sont à eau pressurisée par tranche de 900 MW ou de 1 300 MW.

c) Les centrales thermiques au charbon

Alimentées au charbon, puis au fuel lourd, elles le sont de nouveau au charbon ; elles sont de moins en moins utilisées.

Tableau comparatif des différentes centrales (1998).

Centrales	Puissance installée	Source d'énergie	Production en 1998 (milliards kWh)
Hydraulique	23 300 MW	Chute d'eau	67
Nucléaires	61 500 MW	Uranium à 3,5 %	368,4
Thermiques	17 200 MW	Charbon-Fuel	54,3

Répartition de la consommation.

Types de Tarifs	Tarif vert (B-C)	Tarif jaune + vert A	Tarif bleu
Nombre de clients	600	286 800	27,5 millions
Consommation (TWh)	101,1	134,1	148,5
Pourcentage des ventes	26 %	35 %	39 %

- Les abonnés au tarif vert sont livrés en haute tension au-delà de 60 kV ; ce sont de grosses entreprises, telles que aciéries, mines, SNCF, produits chimiques.

- Les abonnés au tarif jaune sont toutes les petites et moyennes entreprises qui sont livrées en 20 kV.

- Les abonnés au tarif bleu sont principalement les ménages, les artisans et les commerçants.

Dès l'Antiquité, on a utilisé la vitesse ou l'énergie gravitaire de l'eau pour entraîner des moulins. Il a fallu attendre le 19^e siècle pour que le français B. Fourneyron (1802-1867) utilise la pression de l'eau avec des turbines.

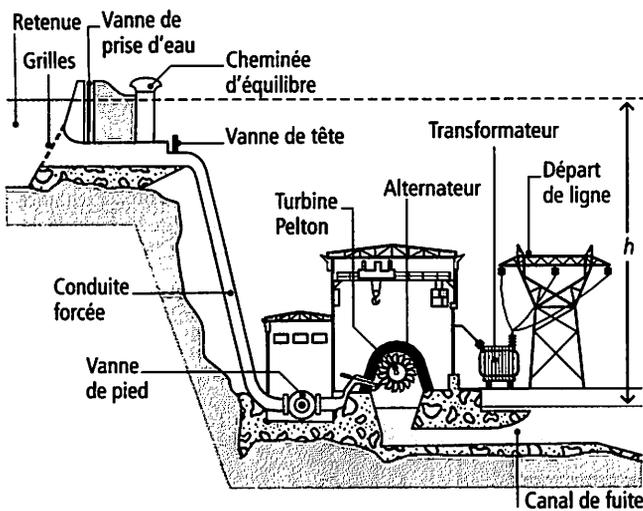
Le développement de la production de l'énergie électrique a été lié à celui des turbines dont le rendements et les puissances ont été considérablement augmentés.

On classe les centrales hydrauliques en 3 catégories :

- les hautes chutes $H > 200$ m
- les moyennes chutes $30 \text{ m} < H < 200$ m
- les basses chutes $H < 30$ m

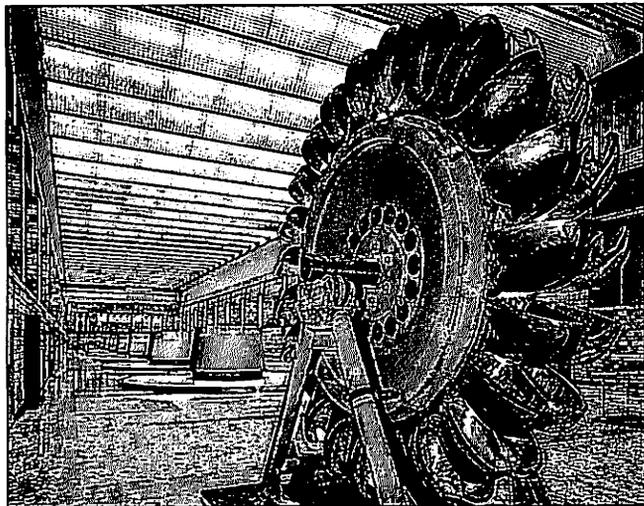
Les centrales de haute chute sont caractérisées par une forte hauteur de chute ($H > 200$ m). L'usine est toujours située à une distance importante de la prise d'eau (parfois plusieurs kilomètres).

1. Disposition



2. Turbine Pelton

Ce type de turbine convient très bien aux très hautes chutes (entre 200 et 2 000 m). La turbine Pelton est en général alimentée par des conduites forcées.



Turbine Pelton, centrale de Roselend-La Bathie (doc. EDF).

3. Alternateur

La fréquence du réseau étant de 50 Hz, sa construction est liée à la vitesse de la turbine.

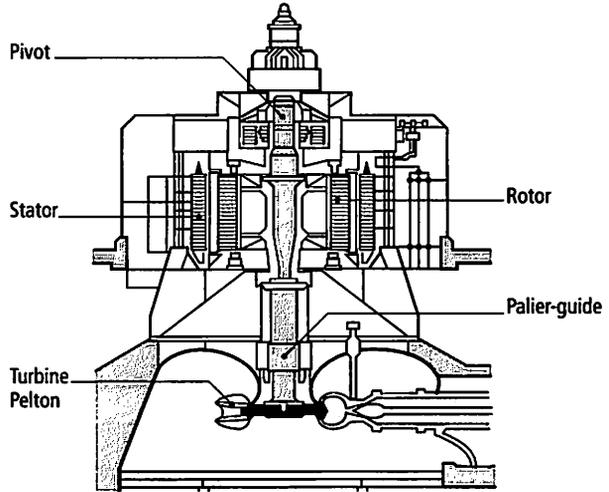
$$n = \frac{f}{p}$$

n : en tr/s
 f : en Hz
 p : nombre de paires de pôles.

Exemple :

Turbine tournant à 375 tours/min ; l'alternateur comportera :

$$p = \frac{50 \times 60}{375} = 8 \text{ soit } 8 \text{ paires de pôles.}$$



Disposition verticale d'un groupe turbo-alternateur.

4. Centrales de haute chute

4.1. La centrale de Villarodin

Alimentée par la retenue du Mont-Cenis, elle est conçue essentiellement pour fournir de la puissance aux heures de pointe. D'une puissance de 364 000 kW, elle est alimentée par une chute d'eau de 882 m ayant un débit de 51 m³/s.

a) Retenue d'eau du Mont-Cenis

- Capacité de la retenue : $270 \times 10^6 \text{ m}^3$.
- Barrage en terre et enrochement : hauteur 120 m ; longueur 1 400 m ; largeur à la base 460 m.

b) Usine électrique

- 2 groupes de turbine Pelton à 6 jets, puissance maximale de 200 000 kW.
- 2 alternateurs de chacun 195 MVA en 15,5 kV capables de fournir jusqu'à 215 MVA.
- Poste de transformation avec départ de 380 kV.

Cette centrale est située à la frontière entre la France et l'Italie, le long de la route nationale 6.



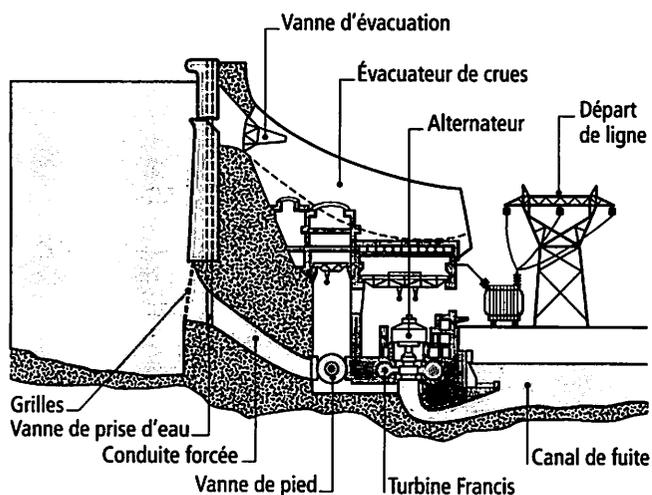
Barrage de Roselend (doc. EDF).

4.2. La centrale de Grand'Maison

Cette usine présente la particularité de pouvoir fournir de l'énergie aux heures de pointe avec 18 000 MW installés, et, aux heures creuses, d'utiliser de l'énergie électrique pour pomper de l'eau et la refouler dans la retenue principale, cette eau pouvant à nouveau être utilisée aux heures de pointe. Elle dispose de 8 groupes réversibles turbines-pompes de 150 MW.

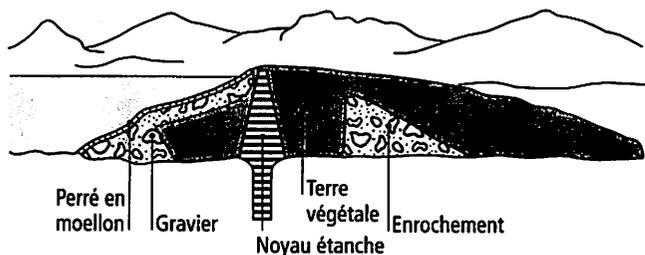
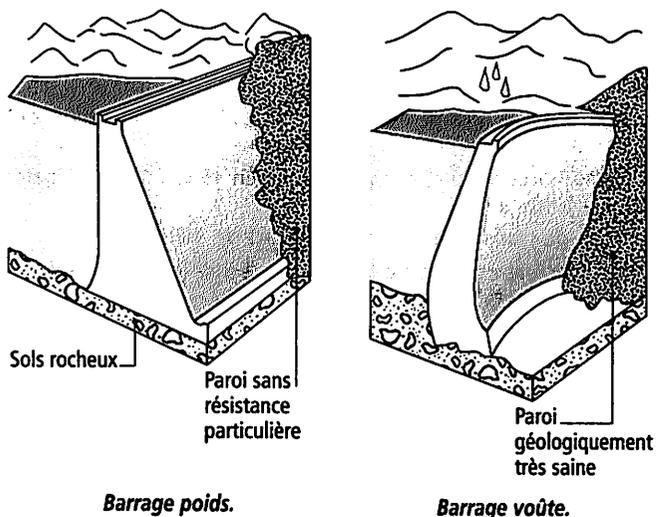
Les centrales de moyenne chute sont caractérisées par une hauteur de chute comprise entre 30 et 200 m. Le bâtiment de l'usine est soit distinct du barrage, soit dans le barrage.

1. Disposition



2. Différents types de barrages

Les barrages, en s'opposant à l'écoulement naturel de l'eau, constituent une réserve d'énergie potentielle.



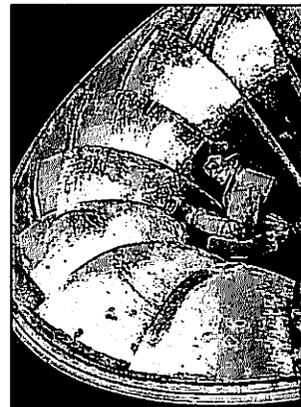
Barrage en terre. Empilement de terre et roches complété par un noyau en béton étanche.

3. Turbine Francis

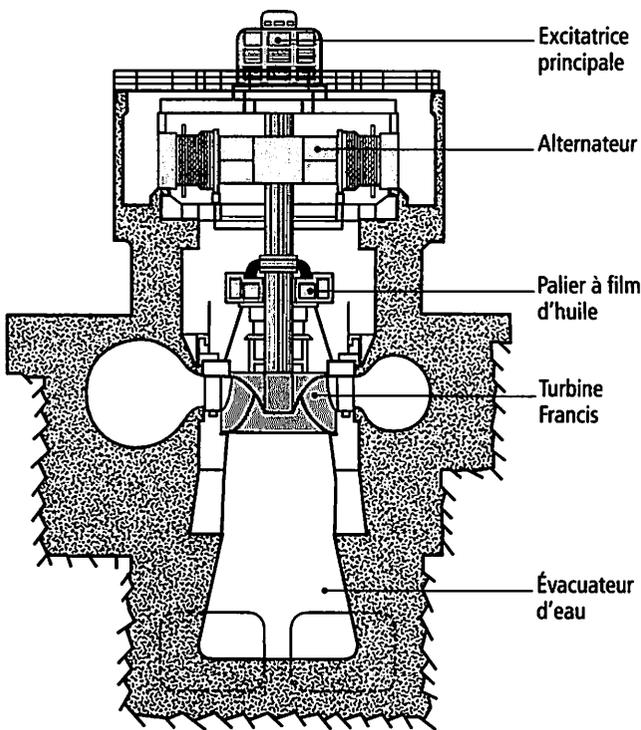
C'est une turbine à réaction, c'est-à-dire que le dispositif d'injection d'eau sur le rotor de la turbine et la forme de ce rotor sont réalisés de façon que, l'eau pénétrant dans la turbine à vitesse réduite, on utilise, à la fois, l'énergie cinétique due à la vitesse et l'énergie potentielle due à la pression de l'eau.

Cette turbine est très répandue dans les chutes comprises entre 20 et 350 m.

L'ensemble turbine-alternateur est disposé sur un axe vertical.



Turbine Francis en cours de rechargement des pales (doc. EDF).



Exemple :

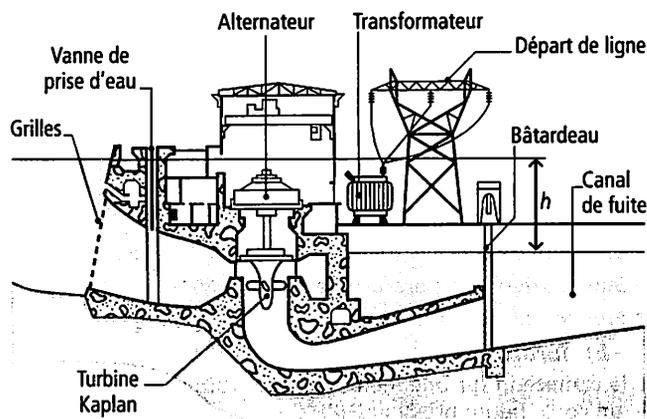
La centrale de Serre-Ponçon, située au confluent de l'Ubaye et de la Durance :

- capacité de la retenue : $1\,270 \times 10^6 \text{ m}^3$;
- barrage en terre : hauteur 123 m, longueur 790 m, largeur maxi à la base 650 m ;
- la hauteur de chute maximale est de 128 m, et la hauteur minimale de 65 m ;
- deux galeries d'aménée d'eau ; diamètre 9,3 m, longueur 900 m, débit $1\,200 \text{ m}^3/\text{s}$;
- 4 turbines Francis à axe vertical ; diamètre d'arrivée 4,40 m, débit $75 \text{ m}^3/\text{s}$;
- 4 alternateurs : puissance 90 000 kVA - 214 tr/min.

L'usine est équipée de 4 transformateurs triphasés de 90 000 kVA, tension primaire 10,3 kV et secondaire 150 ou 225 kV.

On les appelle aussi centrales au fil de l'eau. Elles peuvent être construites sur un canal de dérivation ou dans le lit d'un cours d'eau. Elles sont caractérisées par un débit très important mais avec une faible hauteur de chute.

1. Disposition



2. Turbine Kaplan

C'est une roue en forme d'hélice, avec des pales orientables, pour améliorer le rendement. Elle convient aux très basses chutes (de 5 à 30 m).

Exemple :

La centrale de Rhinau sur le Rhin.

L'aménagement comprend :

- 1 barrage usine ;
- 1 canal de dérivation ;
- 2 écluses.

Le barrage comporte 7 passes de 20 m de largeur pouvant évacuer sur 6 passes 5 000 m³/s, soit les plus fortes crues du Rhin.

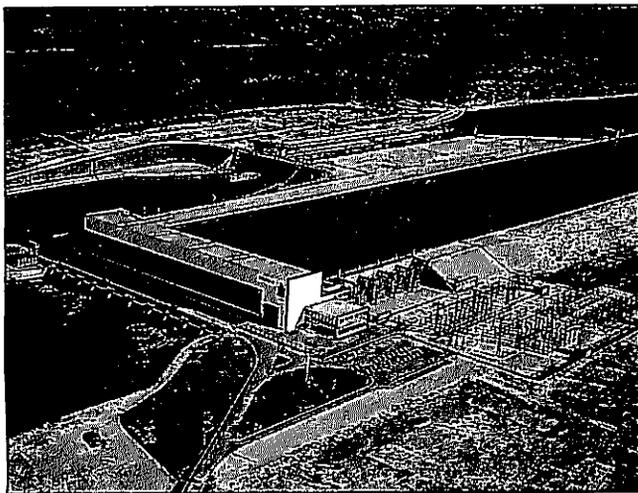
L'usine hydro-électrique a les dimensions suivantes :

- longueur : 170 m ;
- largeur : 70 m ;
- hauteur : 50 m.

Elle comporte 4 groupes de 42 000 kVA chacun.

Vitesse : 75 tr/min avec turbines Kaplan à axe vertical.

Débit : 350 m³/s.

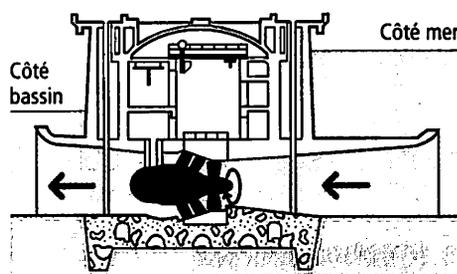


Centrale de basse chute : Rhinau (doc. EDF).

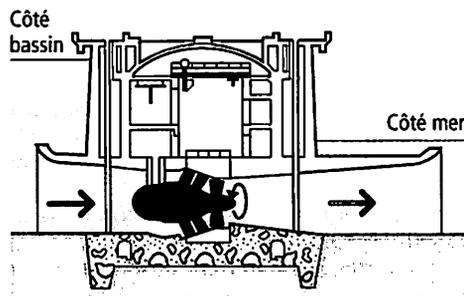
3. Usine marémotrice

Elle utilise l'énergie des marées. Un barrage situé à l'entrée d'un estuaire de rivière laisse passer l'eau à marée montante puis est fermé pendant la marée descendante et retient l'eau en amont. En fin de marée basse, on dispose d'une hauteur d'eau qui peut aller jusqu'à 13 m aux fortes marées.

Marée montante

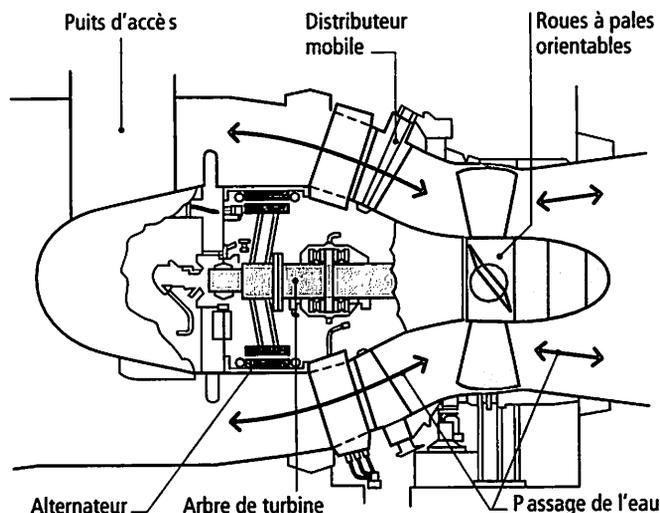


Marée descendante



L'utilisation d'un groupe bulbe permet de turbiner dans les deux sens d'écoulement de l'eau.

Le groupe bulbe comporte dans une même coque, immergée dans un conduit hydraulique, l'alternateur et la turbine.



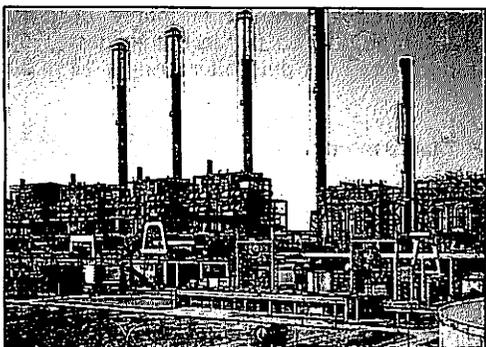
Exemple :

L'usine de la Rance :

- barrage de longueur : 750 m ;
- retenue : 184 × 10⁶ m³ utiles ;
- 24 groupes bulbes de puissance 10 MW - 3 500 V ;
- turbine Kaplan 4 pales : 93,75 tr/min ;
- débit : 275 m³/s.

Un des intérêts de la centrale marémotrice de la Rance, c'est d'avoir permis la mise au point des groupes bulbes qui sont maintenant installés dans les centrales de basses chutes.

La centrale thermique produit l'énergie électrique à partir de l'énergie calorifique obtenue en brûlant un combustible tel que charbon, gaz ou fuel.



Centrale thermique du Bec d'Ambès près de Bordeaux (doc. EDF).

1. Schéma de fonctionnement

a) Générateur de vapeur

L'eau circule dans les tubes tapissant les parois de la chambre de combustion et se transforme en vapeur sous l'action de la chaleur dégagée par le combustible.

b) Gaz de combustion

La chaleur dégagée par les gaz de combustion sert pour :

- surchauffer la vapeur à la sortie du générateur de vapeur ;
- resurchauffer la vapeur ayant déjà accompli un certain travail dans la turbine ;
- réchauffer l'eau revenant du condenseur au générateur de vapeur ;
- réchauffer l'air extérieur destiné à la combustion.

Cet ensemble permet d'améliorer le rendement de la centrale thermique.

c) Circuit eau-vapeur

L'eau chimiquement pure circule sous forte pression dans les tubes du générateur de vapeur (163 bars) et se transforme en vapeur à une température de 565 °C.

Cette vapeur surchauffée et à haute pression se détend dans la turbine haute pression puis elle retourne dans un réchauffeur pour aller ensuite dans les turbines moyenne et basse pression où elle se détend et sa pression devient très faible.

À la sortie des turbines, la vapeur à très basse pression se condense pour se retrouver à l'état liquide dans les condenseurs, qui sont à eau ou à air. Cette eau, extraite par les pompes, est réchauffée par des soutirages de vapeur des corps de turbine et par la chaleur des gaz de combustion. Elle est injectée ensuite dans le réservoir du générateur de vapeur et le cycle recommence toujours avec la même eau.

2. Caractéristiques d'une unité de 600 MW

a) Générateur de vapeur

- Capacité de production : 1 800 t/h de vapeur.
- Chambre de combustion à circulation naturelle.
- Surchauffeur température de sortie : 565 °C.
- Pression de sortie : 163 bars.

b) Turbine

Elle comprend sur une même ligne d'arbre :

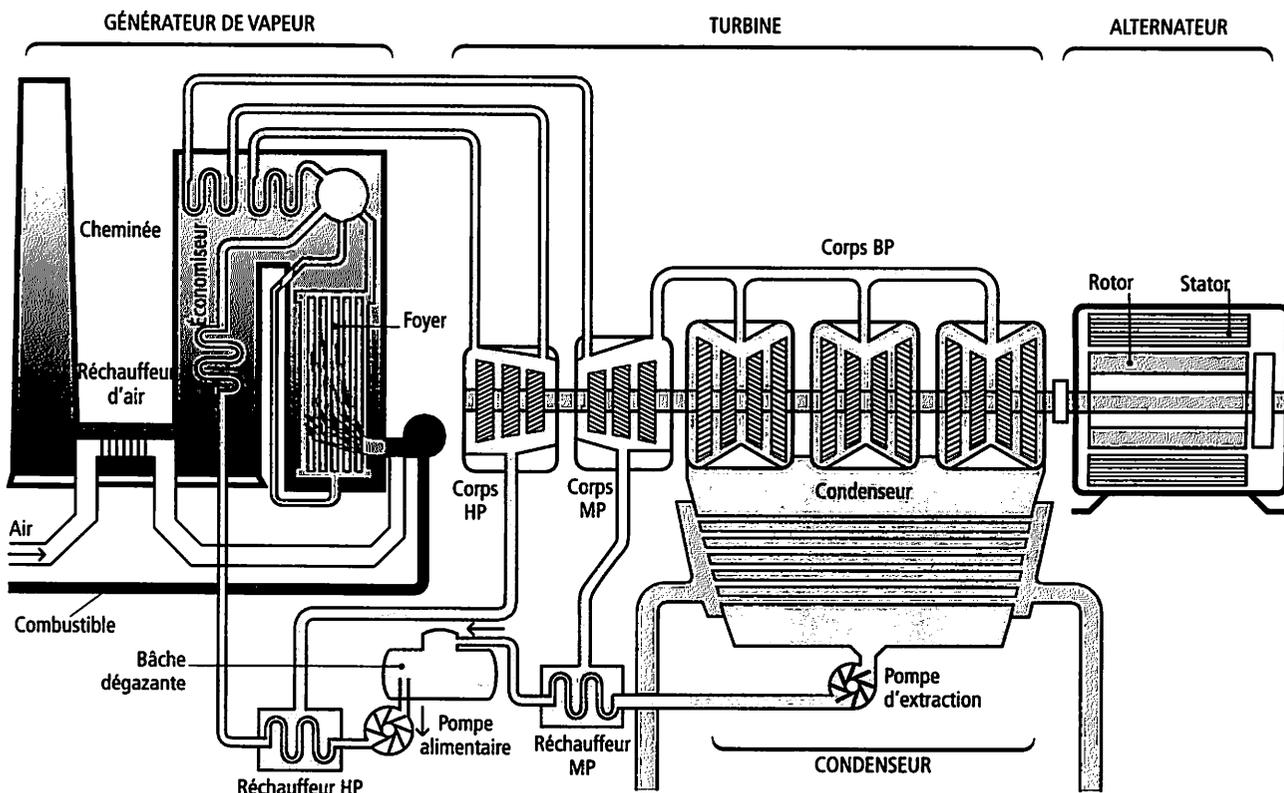
- un corps haute pression (HP) ;
- pression d'admission : 163 bars ; température : 565 °C ;
- un corps moyenne pression (MP) ;
- pression d'admission : 36 bars ; température : 565 °C ;
- un corps basse pression.

Il s'agit de 3 corps de 12 étages chacun avec une section d'échappement de 50 m².

c) Alternateur

- Puissance : 600 MW ; tension 20 kV triphasée.
- Vitesse : 3 000 tr/min ; Courant nominal : 19 000 A.
- Refroidissement par hydrogène à la pression de 4 bars.

Les centrales thermiques possèdent un grand nombre d'auxiliaires qui sont indispensables pour un fonctionnement optimal de la centrale thermique et dont la consommation d'énergie est loin d'être négligeable.

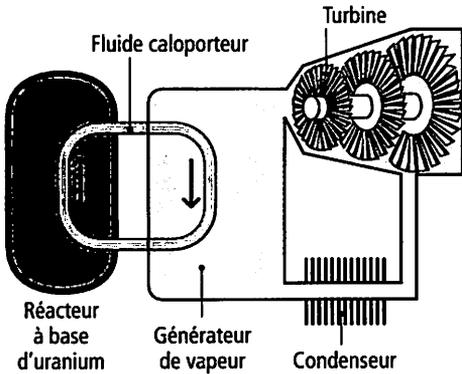


Fonctionnement d'une centrale thermique.

Les progrès réalisés dans la connaissance de la structure de la matière, la demande importante en énergie, la limitation des sources françaises en énergie primaire, ont contribué au développement de l'énergie nucléaire en France.

1. Principe d'une centrale nucléaire

Dans une centrale nucléaire, on a remplacé les brûleurs de combustibles, charbon ou fuel-oil, par un réacteur.



À l'intérieur du réacteur, l'uranium 235 est le siège d'une réaction nucléaire qui produit une grande quantité de chaleur. Cette chaleur est continuellement évacuée hors du réacteur vers un échangeur de chaleur, grâce à un fluide dit caloporteur.

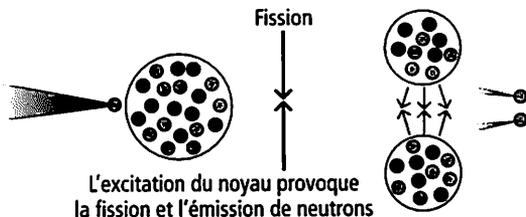
L'échangeur transfère la chaleur qui lui vient du réacteur à un circuit eau-vapeur analogue à celui d'une centrale thermique classique. La vapeur produite sous forte pression entraîne un groupe turbo-alternateur, puis se condense dans un condenseur et est ensuite réinjectée dans l'échangeur.

2. Réaction nucléaire

La production de chaleur dans une centrale thermique nucléaire est réalisée par fission nucléaire de l'uranium 235.

a) Principe

Lorsqu'un neutron entre en collision avec le noyau d'un atome d'uranium, ce noyau s'étire puis se rompt brutalement en libérant plusieurs neutrons qui, à leur tour, peuvent provoquer de nouvelles fissions. C'est ce qu'on appelle une réaction en chaîne.

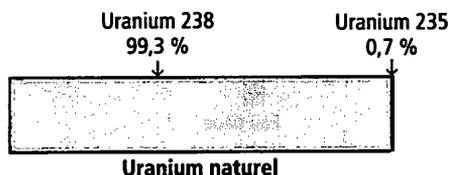


b) L'uranium

L'uranium 235 et l'uranium 238 sont des isotopes qui composent l'uranium naturel ; ce dernier se compose de :

- 0,7 % d'uranium 235 ;
- 99,3 % d'uranium 238.

Seul l'uranium 235 est fissile.

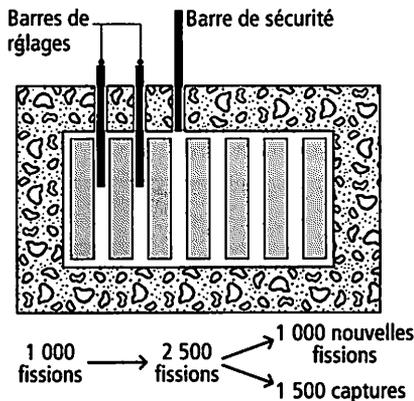


L'atome d'uranium comporte un noyau formé de protons (charge +) et de neutrons électriquement neutres ; un ensemble d'électrons gravitent autour du noyau.

Uranium 235 =	92 protons	Uranium 238 =	92 protons
	143 neutrons		146 neutrons
	235		238

c) Contrôle de la réaction

Chaque fission s'accompagne d'un dégagement important de chaleur. Le contrôle de la réaction de fission s'effectue à l'aide de barres de contrôle, en bore ou en cadmium qui sont des matériaux avides de neutrons.



Lorsque les barres sont enfoncées, elles absorbent tous les neutrons ; si l'on relève les barres, la réaction en chaîne s'amorce et se maintient. Au démarrage de la réaction, il faut provoquer la radioactivité du cœur du réacteur avec du béryllium, pour obtenir un flux de neutrons suffisant.

Un corps radioactif est caractérisé par la nature de son rayonnement (α , β , γ) et par sa période de désintégration ; pour l'uranium, la période est de l'ordre de 700 ans. Selon les matériaux, la période varie de quelques secondes à 14 milliards d'années.

3. Différentes centrales nucléaires

Quel que soit le modèle de la centrale, on trouve toujours :

- un combustible (uranium ou plutonium) ;
- un modérateur ;
- un fluide caloporteur.

Cet ensemble de trois éléments constitue une filière. Les principales filières utilisées sont données dans le tableau ci-dessous.

Filières	Combustible	Modérateur	Fluide caloporteur
Graphite-gaz	Uranium naturel 0,7 %	Graphite	Gaz carbonique
Eau lourde	Uranium naturel 0,7 %	Eau lourde	Eau lourde
Eau sous pression	Uranium enrichi 3,2 %	Bore	Eau ordinaire
Surgénérateur	Plutonium 15 % + Uranium	Bore ou Cadmium	Sodium

En France, la filière graphite-gaz, mise en œuvre à Saint-Laurent-des-Eaux et à Bugey 1, a été abandonnée.

Toutes les autres centrales nucléaires sont du type à eau pressurisée type PWR. La centrale de type surgénérateur de Creys-Malville utilise des réacteurs à neutrons rapides. Elle emploie du plutonium qui est un résidu obtenu dans les centrales PWR. Ce type de réacteur permet d'obtenir 50 fois plus d'énergie que dans un réacteur classique.

L'arrêt de ce modèle est très regrettable pour le retraitement des déchets.

1 - Production, transport et distribution de l'électricité

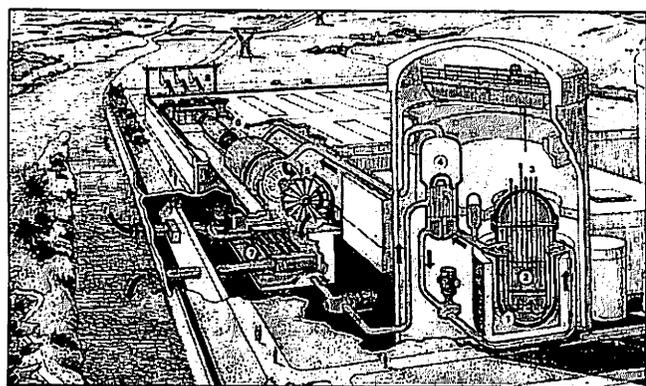
Les centrales à uranium enrichi du type PWR ont été développées aux États-Unis à partir des années 1960. Elles utilisent de l'uranium enrichi à 3 %.

PWR : *Pressurized Water Reactor* - Réacteur à eau sous pression.

1. Principe de fonctionnement

Le fluide caloporteur est de l'eau bouillante sous forte pression qui refroidit le réacteur et transmet sa chaleur dans l'échangeur (circuit en bleu foncé). L'échangeur reçoit de l'eau réchauffée qui, transformée en vapeur, entraîne les turbines. Dans ce type de réacteur, l'eau ordinaire sert à la fois comme modérateur et fluide de refroidissement.

Il existe une variante de PWR qui est BWR (*Boiling Water Reactor*, Réacteur à eau bouillante). Dans cette dernière version, l'eau du fluide caloporteur se vaporise dans la cuve et la vapeur actionne directement les turbines. Le cycle ne comporte pas d'échangeur, il est direct.



Maquette du réacteur de la centrale de Fessenheim (doc. EDF).

2. Intérêt des centrales nucléaires

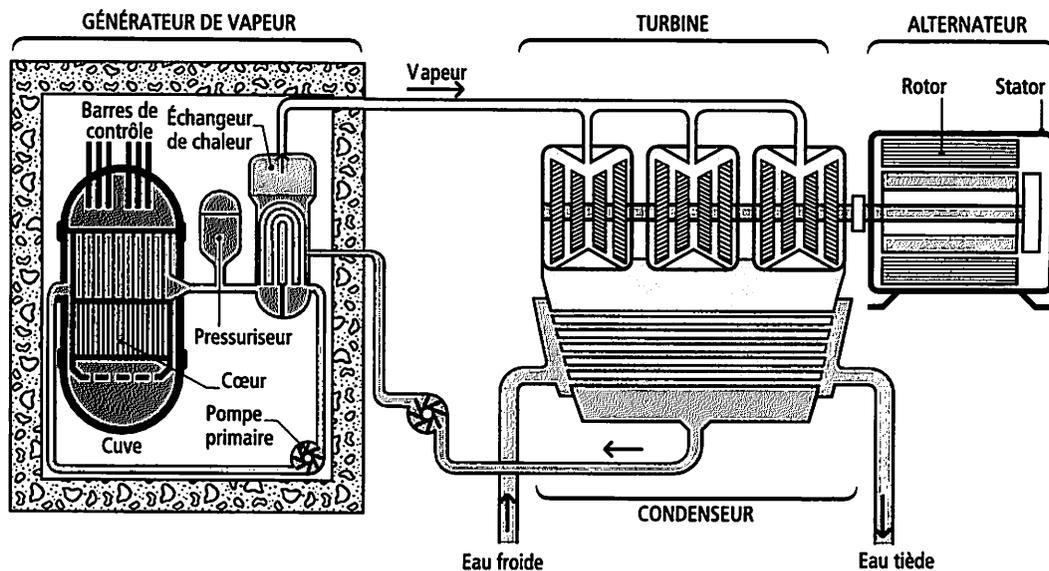
La réalisation du programme nucléaire français a été pour l'industrie française l'occasion d'acquérir une expérience et un savoir-faire qui favorisent une ouverture vers les marchés internationaux.

Le prix de l'électricité est indépendant du prix du pétrole, et doit permettre des usages concurrentiels de l'électricité avec d'autres sources d'énergie. À l'heure actuelle, l'exportation d'énergie électrique vers les pays européens voisins assure à EDF un bilan exportateur très positif, source de devises pour le pays.

3. Caractéristiques d'une unité PWR

Ces unités ou tranches réalisées par EDF ont une puissance de 900 MW ou de 1 300 MW.

	900 MW	1 300 MW
Réacteur		
Puissance thermique nominale	2 775 MW	3 800 MW
Pression nominale en bars	155	155
Débit nominal	68 000 m ³ /h	93 000 m ³ /h
Température normale :		
entrée de cuve	286 °C	293 °C
sortie de cuve	323 °C	328 °C
Cœur du réacteur : hauteur	3,66	4,26
diamètre	3,04	3,37
Diamètre de la cuve	3,98 m	4,40 m
Épaisseur minimale de la cuve	200 mm	219 mm
Hauteur totale de la cuve	13,17 m	13,56 m
Poids total de la cuve	339,4 T	418 T
Pompes primaires		
Nombre	3	4
Débit nominal	21 500 m ³ /h	23 325 m ³ /h
Vitesse de rotation	1 485 tr/min	1 485 tr/min
Puissance absorbée à chaud	4 850 KW	5 950 kW
Masse pompe + moteur	90 T	107 T
Générateur de vapeur		
Puissance nominale	928 MW	1 354 MW
Hauteur totale	20,64 m	22 m
Diamètre extérieur	4,46 m	5 m
Poids en fonctionnement	410 T	690 T
Température entrée eau alimentation	219 °C	230 °C
Température sortie vapeur	273 °C	287 °C
Pression de vapeur (bars)	57,7	71
Turbines		
Vitesse de rotation	1 500 tr/min	1 500 tr/min
Longueur du groupe	64 m	73,5 m
Masse totale	4 200 T	4 900 T
Pression admission corps HP	55 bars	69,5 bars
Pression d'échappement	46 m bars	46 m bars
Alternateur		
Puissance nominale	900 MW	1 300 MW
Tension de sortie	24 kV	20 kV
Refroidissement rotor	hydrogène	hydrogène
Refroidissement stator	Eau	Eau
Vitesse	1 500 tr/min	1 500 tr/min
Masse totale	600 T	755 T



Fonctionnement d'une centrale PWR.

Chaque fois que l'on allume une lampe électrique, ou que l'on démarre un moteur, il faut simultanément produire et transporter l'énergie au lieu d'utilisation : l'électricité ne peut pas être stockée.

L'une des raisons principales du succès de l'électricité tient à ce qu'elle est très facilement transportable.

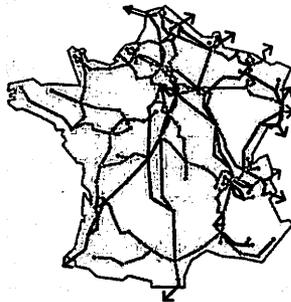
1. Problème du transport de l'énergie

Les centrales qui produisent de l'énergie électrique sont implantées selon des conditions géographiques (centrales hydrauliques), ou selon des contraintes d'approvisionnement en combustibles (centrales thermiques), ou d'alimentation en eau de refroidissement (centrales thermiques nucléaires).

Quant aux consommateurs d'énergie, ils sont répartis sur tout le territoire, et souvent éloignés des grands centres de production d'énergie.

Le réseau de transport et d'interconnexion assure en permanence une liaison entre les centrales de production et les lieux de consommation, sachant que l'électricité ne se stocke pas.

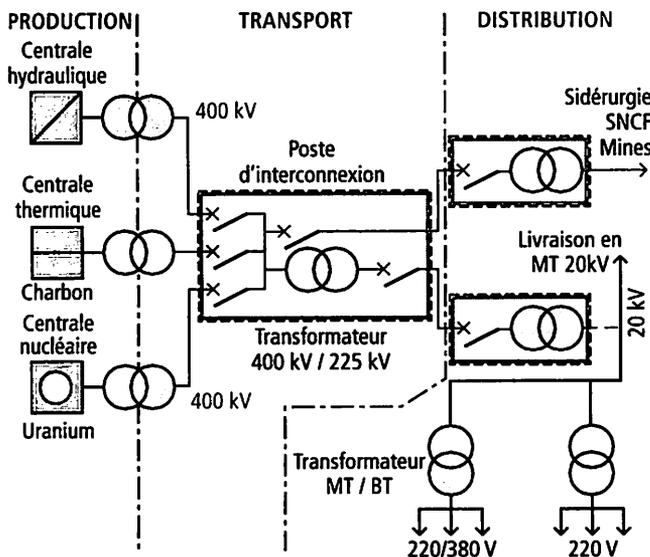
Structure du réseau d'interconnexion 400 000 volts



Structure du réseau d'interconnexion 400 000 V (voir page 14).

2. Interconnexion

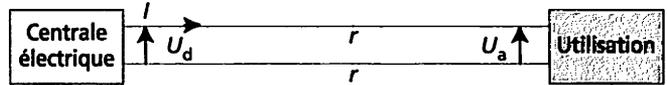
Toutes les lignes à très haute tension sont interconnectées, c'est-à-dire qu'elles sont reliées par des postes de transformation assurant la continuité entre les lignes de différents niveaux de tension.



- L'interconnexion permet :
- des échanges d'énergie entre les régions ;
 - en cas de défaut sur une ligne ou dans une centrale, l'alimentation par une autre ligne ;
 - des échanges vers les pays voisins (exportation d'énergie).

3. Nécessité de la haute tension

L'un des grands intérêts de l'énergie électrique est de se transporter seule et sans bruit ; toutefois, une partie de l'énergie transportée se dissipe en chaleur, par effet Joule, dans la résistance de la ligne.



Problème : Soit à transporter l'énergie électrique fournie par une centrale thermique de 1 200 MW soit $1\,200 \times 10^6$ W soit en 20 kV, soit en 400 kV.

a) Calcul de l'intensité en ligne

Relation	en 20 kV	en 400 kV
$I = \frac{P}{U}$	$I = \frac{1\,200 \times 10^6}{20 \times 10^3} = 60\,000$ A	$I = \frac{1\,200 \times 10^6}{400 \times 10^3} = 3\,000$ A

Une intensité très élevée entraîne une très grosse section de ligne et des pertes importantes par effet Joule.

b) Calcul des pertes en ligne

$p = r_t \times I^2$

p : pertes en ligne (en watts)
 r_t : résistance totale de la ligne (en ohms)
 I : intensité en ligne (en ampères).

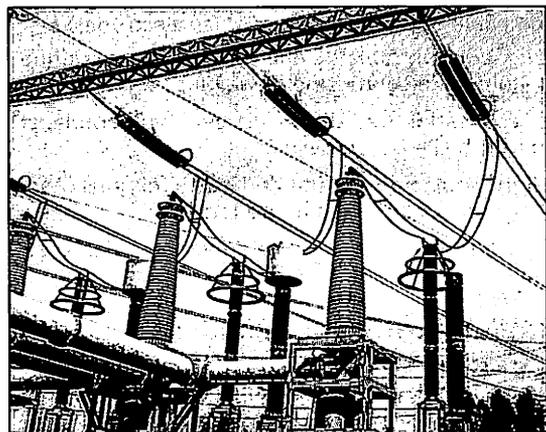
En remplaçant I par sa valeur $I = P/U$, on obtient :

$p = r_t \times \frac{P^2}{U^2}$

P : puissance transportée
 U : tension au départ de la ligne

Pour une puissance transportée donnée, les pertes en ligne sont inversement proportionnelles au carré de la tension, ce qui explique l'intérêt de la très haute tension (THT) 400 kV en France et 750 kV au Canada.

Tension	Longueur totale des lignes de transport d'énergie (au 01.01.1997)
400 kV	21 000 km
225 kV	26 000 km
63 et 90 kV	53 000 km
MT 20 kV	596 000 km
BT 230/240 V	640 000 km



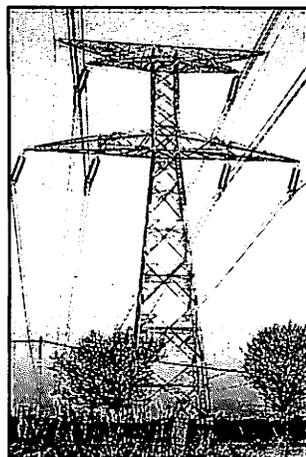
Poste de départ blindé (doc. EDF).

Pour transporter une puissance de 2 000 MW, il faut 1 ligne 400 kV à 2 circuits, ou 3 lignes 225 kV à 3 circuits ou 20 lignes 90 kV à 2 circuits. Le choix de la tension de 400 kV pour le réseau de grand transport et d'interconnexion permet de réduire considérablement le nombre de lignes électriques.

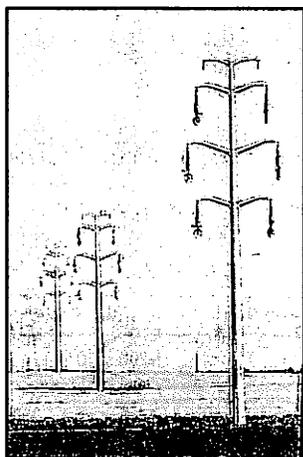
1 - Production, transport et distribution de l'électricité

4. Les lignes THT

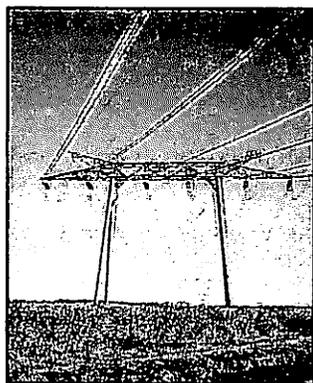
Les lignes électriques sont composées de câbles et de supports ; elles transportent essentiellement du courant alternatif triphasé. On regroupe en général deux circuits sur une seule ligne, la tension est actuellement de 400 kV pour toutes les lignes en construction.



Pylône « Beaubourg ».



Pylône type « Muguet ».



Pylône type « Trianon »
(2 circuits de 400 kV).

Pour des raisons d'esthétique, on serait tenté de remplacer les lignes aériennes par des câbles souterrains, mais cela pose de sérieux problèmes :

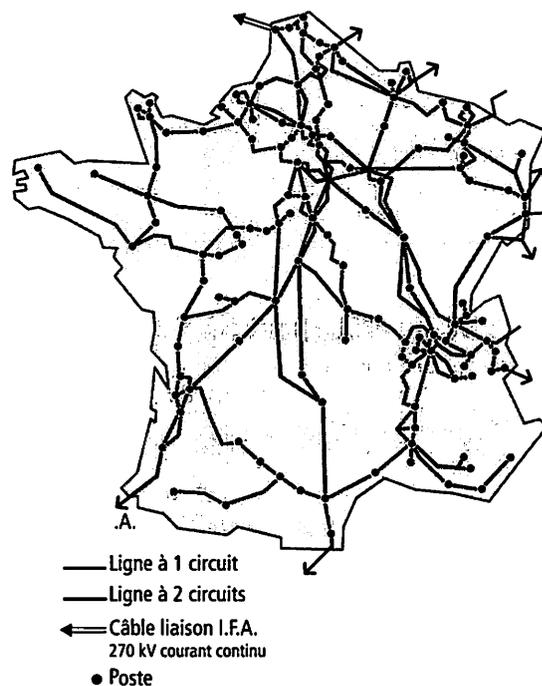
- Un câble souterrain se comporte comme un condensateur, (âme du câble et armature en sont les électrodes) ;
Exemple : pour un câble de 400 kV, la distance critique est de 45 km, au-delà le courant ne passe plus ;
- Une canalisation souterraine est assez vulnérable, et beaucoup plus difficile à localiser ;
- Une ligne souterraine coûte de 12 à 15 fois plus cher qu'une ligne aérienne pour la très haute tension ;
- L'emprise au sol est plus faible en aérien qu'en souterrain.

5. Implantation des lignes THT

Le transport de l'énergie prévu en 63 kV puis en 150 kV et 225 kV est remplacé par des lignes en 400 kV, très souvent avec deux circuits.

Le réseau de transport est aérien, l'emploi de câbles souterrains à isolation gazeuse ou cryogénique n'est pas envisageable actuellement. La tension de 750 kV n'a pas été retenue, compte tenu des longueurs de lignes.

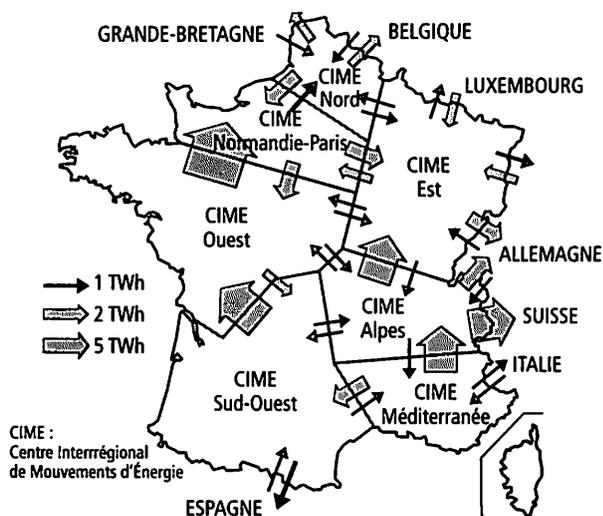
Les lignes aériennes doivent permettre à chaque centre de consommation important de recevoir l'énergie dont il a besoin d'une distance de moins de 200 km.



Réseau de grand transport et d'interconnexion à 400 kV (d'après EDF).

6. L'interconnexion

Chacune des régions de France présente un besoin en consommation d'énergie qu'elle peut alimenter soit par sa production locale soit par l'intermédiaire du réseau d'interconnexion.



Échanges interrégionaux d'énergie électrique et échanges avec l'étranger (d'après EDF).

Le réseau français est interconnecté aux réseaux des pays voisins, ce qui permet des échanges d'énergie. Les heures de pointe, et les jours fériés n'étant pas partout les mêmes, la capacité de régulation est ainsi accrue.

7. Pertes d'énergie dans les lignes

Le tableau ci-dessous donne les pertes d'énergie transportée par rapport à la puissance transportée.

Années	1960	1970	1980	1998
Énergie transportée TWh*	57,8	126,5	243,9	460
Pertes en TWh	3,49	4,1	6	30,6
Pertes en %	6 %	3,2 %	2,46 %	6,65 %

* 1 TWh = 1 milliard de kWh.

Compte tenu des quantités d'énergie transportées, les pertes dans les lignes sont assez faibles.

Il faut qu'à chaque instant la puissance demandée par 25 millions d'abonnés soit égale à la puissance fournie par EDF.

C'est la demande de la clientèle qui commande la production des centrales. Il faut à chaque instant que l'énergie livrée soit :

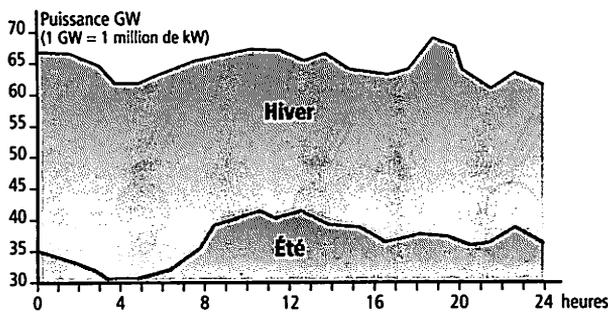
- à une tension précise ;
- à une fréquence fixe ;
- à une puissance variable.

Pour cela, EDF doit tenir compte des contraintes des positions respectives des centrales et des lieux de consommation d'énergie, ainsi que des moyens de transport fournis par le réseau d'énergie.

1. Variations de la demande

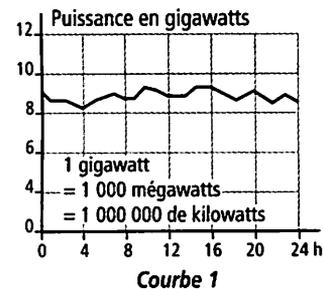
Les variations de la demande sont surtout fonction :

- des heures de la journée (mini à 4 h, maxi à 10 h-11 h) ;
- des jours de la semaine (le jeudi et le mardi) ;
- des saisons (maxi en janvier, mini en août).



Courbes de consommation d'une journée d'hiver et d'une journée d'été (d'après EDF).

La demande de la clientèle se répartit en trois grandes catégories.

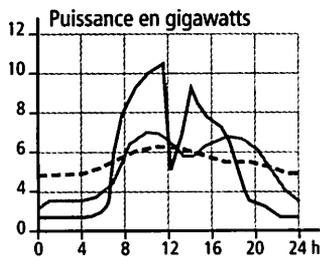


Courbe 1

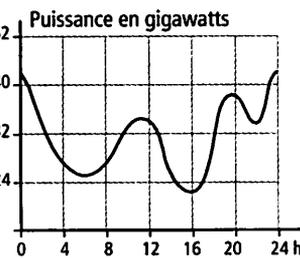
- 560 gros clients industriels alimentés en THT de 63 kV à 225 kV : peu de variation de charge (Courbe 1) ;

- 154 600 clients moyenne tension 15 ou 20 kV (industriels, commerces, services publics) : de très grandes variations de charge (Courbe 2) ;

- 24,4 millions de clients basse-tension dont 21 millions de clients domestiques : grosse augmentation d'énergie consommée en heures creuses avec le chauffage électrique (Courbe 3).



Courbe 2



Courbe 3

2. Variations de la production

L'emploi des moyens de production est directement lié au coût du kilowattheure produit et à la disponibilité de l'énergie, c'est ainsi que l'on utilise dans l'ordre :

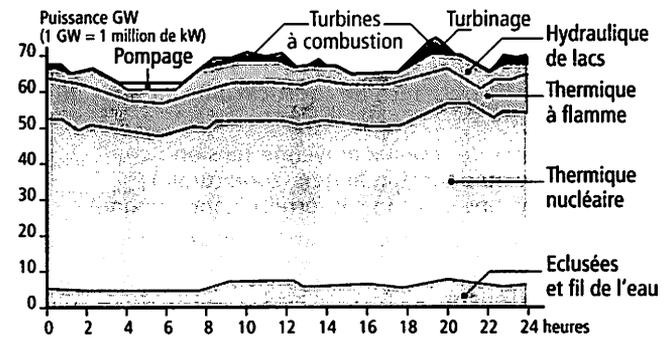
- les centrales hydrauliques au fil de l'eau : utilisation optimale de l'énergie, ces centrales n'ont pas de réserve ;

- les centrales thermiques nucléaires, elles sont utilisées à 90 % de leur capacité : prix du kWh faible, peu de souplesse pour les variations de charge ;

- les centrales hydrauliques de montage selon leur disponibilité en réserve d'eau ;

- les centrales de pompage et les turbines à gaz.

Les centrales nucléaires fournissent une puissance à peu près constante ; les centrales thermiques classiques et hydrauliques sont surtout utilisées aux heures de pointe.



Courbes de production d'une journée type en hiver (d'après EDF).

3. Les dispatchings

Ce sont des centres de coordination d'exploitation. Les mouvements d'énergie sont réglés 24 h sur 24 par un centre national de coordination installé à Paris et sept centres régionaux situés à Paris, Lille, Nancy, Lyon, Marseille, Toulouse, Nantes. Ce sont les centres nerveux du système production-transport-livraison d'énergie.

Les dispatchings assurent les fonctions suivantes :

- établissement des programmes de production des centrales ;
- contrôle des échanges avec les fournisseurs d'énergie autre qu'EDF ;
- surveillance et commandement de fonctionnement du réseau dans les limites géographiques de leur responsabilité ;
- transmission des informations de démarrage ou d'arrêt des centrales ;
- gestion d'un certain nombre d'usines hydrauliques.

Les dispatchings travaillent sur des prévisions annuelles, hebdomadaires et journalières. Ils établissent, à partir des consommations de l'année précédente, la courbe des charges prévisionnelles, heure par heure, pour le lendemain.

Cette gestion d'énergie est effectuée par un ordinateur central qui communique avec des terminaux régionaux afin d'optimiser en permanence l'exploitation du réseau national.



Centre de dispatching de Nantes (doc. EDF).

Il est important de connaître les particularités de chaque type de réseau moyenne tension, car cela a une influence sur la conception et l'exploitation des postes de transformation MT/BT, surtout en ce qui concerne :

- les dispositifs de protection ;
- les prises de terre ;
- le régime de neutre ;
- le choix de l'appareillage.

EDF distribue l'énergie en moyenne tension généralement sous 20 kV, mais il existe encore des réseaux en 5, 10 ou 15 kV, parfois en 24 ou 30 kV.

Le courant de court-circuit au point de livraison est indiquée par EDF. Il peut varier entre 7 kA à 12,5 kA. Les valeurs correspondantes de puissance de court-circuit sont alors de 250 MVA ou 500 MVA.

Il y a deux types de réseaux moyenne tension :

- réseau moyenne tension aérien (zone rurale) ;
- réseau moyenne tension souterrain (zone urbaine).

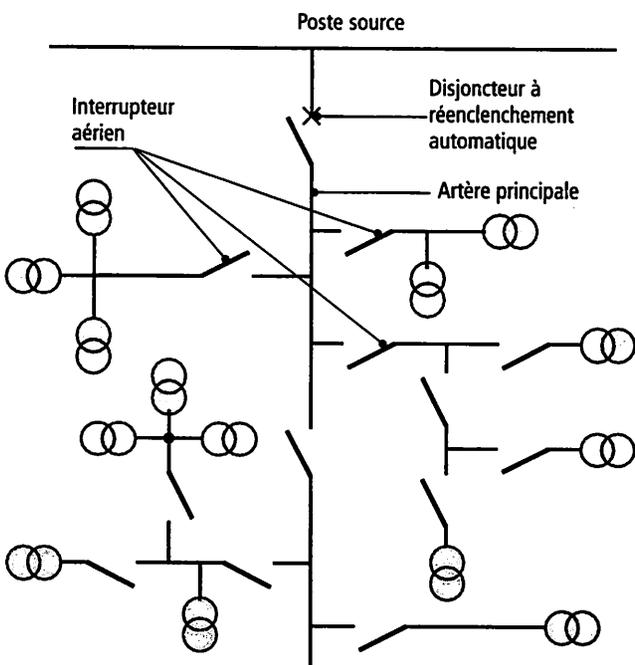
Ces réseaux peuvent alimenter différents types de postes de transformation :

- Postes d'extérieur :
 - postes sur poteau ;
 - postes sous enveloppe préfabriquée ;
 - postes en maçonnerie ;
- Postes d'intérieur :
 - postes ouverts ;
 - postes en cellules préfabriquées.

Dès que la puissance installée dépasse 66 kVA, soit environ une centaine d'ampères, il est nécessaire de prévoir une alimentation en moyenne tension, soit 20 kV avec un poste de transformation 20 kV/400 V.

1. Alimentation en simple dérivation

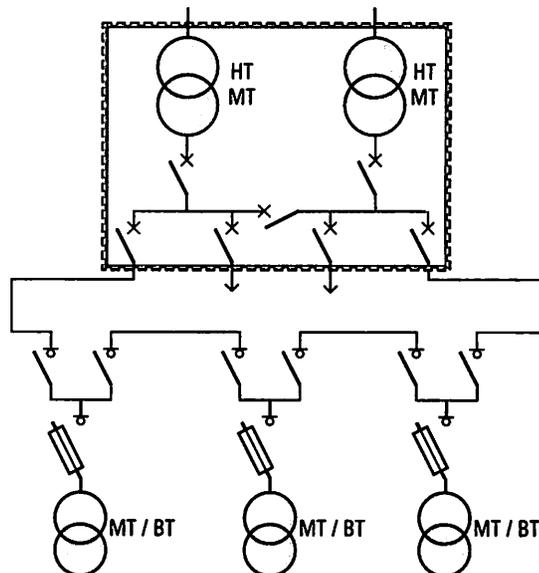
Chaque poste de transformation est alimenté en « simple dérivation » sur une artère principale ou secondaire. Ce type d'alimentation est surtout utilisé en distribution rurale ou aux alentours des grandes villes, et en aérien.



La seule protection étant le disjoncteur de départ du poste source, tout défaut sur le réseau provoque la coupure de tous les abonnés concernés par le départ du poste source.

2. Alimentation en coupure d'artère

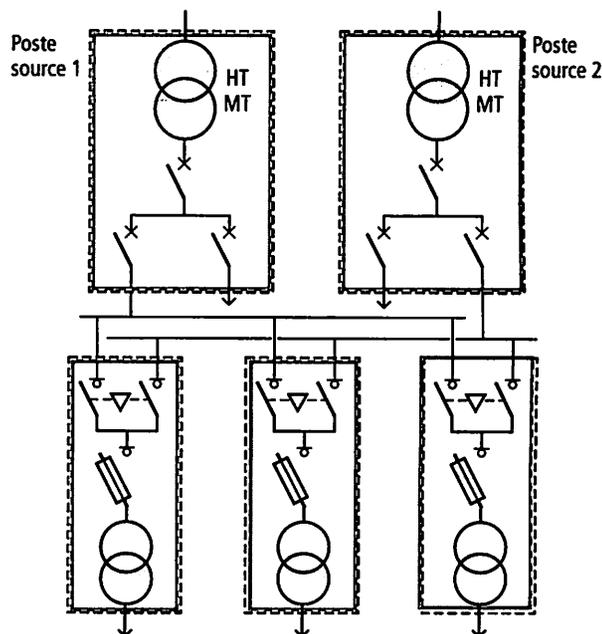
Tous les postes MT/BT sont branchés en dérivation sur une boucle ouverte en un point (dit point de coupure) proche de son milieu. Tous les appareils de coupure de l'artère, sauf un, sont donc fermés.



Ce type de réseau est surtout réalisé en souterrain et, en général, en milieu urbain. En cas de défaut sur une partie de la boucle, on peut toujours alimenter tous les postes en ouvrant la boucle à l'endroit du défaut.

3. Alimentation en double dérivation

Chaque poste est alimenté par deux câbles avec permutation automatique en cas de manque de tension sur l'une des deux arrivées.



Cette disposition est utilisée en région parisienne et dans quelques grandes villes.

Les dispositions en coupure d'artère et en double dérivation sont employées pour les réseaux souterrains qui ont une continuité bien meilleure que les réseaux aériens.

1. Principes de gestion de l'énergie

1.1. Principe d'économie

Il faut réduire les besoins énergétiques des installations en améliorant le rendement énergétique des équipements et en réduisant les pertes.

Exemples :

- Utilisation des fours à induction, à micro-ondes.
- Diminution des pertes dans le transport d'énergie (énergie réactive), isolation des immeubles.

1.2. Principe du moindre coût

Il faut choisir l'énergie la moins coûteuse pour un emploi déterminé.

Exemple :

Chauffage au gaz ou au fuel aux heures de pointe, à la place du chauffage électrique.

1.3. Principe d'adaptation des besoins

Il faut adapter les besoins en énergie électrique aux périodes où le prix de cette énergie est le plus bas.

L'énergie électrique ne se stocke pas ; par contre, on peut utiliser l'inertie thermique de certains récepteurs tels que les chauffe-eau, les chambres froides, etc.

2. Fonctions de la gestion de l'énergie

2.1. Délestage - Relestage

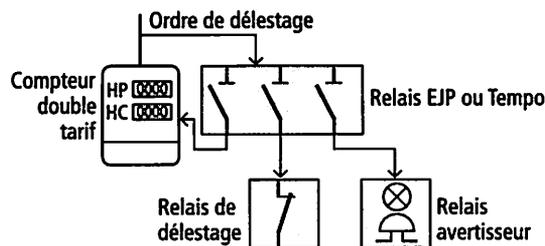
Cette fonction permet de décharger temporairement une installation électrique. L'appel de puissance reste ainsi inférieur à la puissance souscrite.

a) Délestage sur ordre

Un ordre extérieur venant du réseau EDF provoque la coupure des départs choisis comme non prioritaires.

Exemples :

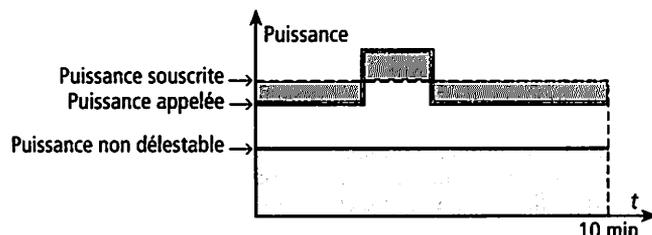
Ordre « heures de pointe » - ordre « EJP » (Effacement Jours de Pointe), - ordre Tempo.



b) Délestage sur comptage d'énergie

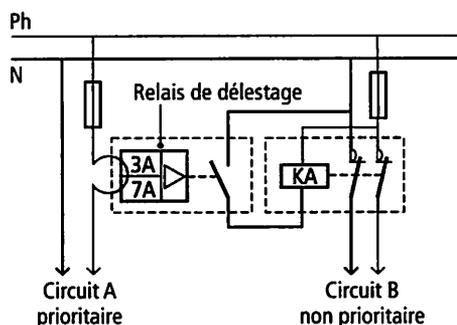
En tarif vert, les appels de puissance ne sont pas enregistrés de manière instantanée. La puissance est intégrée par période de 10 min ; l'énergie consommée pendant cette période est comparée à la puissance souscrite.

Il est possible d'absorber au cours d'une période de 10 min une puissance supérieure à la puissance souscrite, à condition d'avoir une compensation à l'intérieur de cette même période.



c) Délestage sur seuil de puissance ou de courant

Dès que le seuil de courant ou de puissance est dépassé, un relais de délestage coupe les départs non prioritaires



- Le délesteur, placé en série avec le circuit prioritaire A, mesure l'intensité consommée I . Il compare I avec la valeur de consigne (3 à 7A). Si la valeur I est supérieure à la consigne, il enclenche un contacteur à ouverture KA qui coupe l'alimentation du circuit non prioritaire B.
- Il peut y avoir deux seuils de délestage (hiérarchisé).
- On utilise aussi des relais à délestage tournant sur trois circuits différents.

2.2. Gestion des alimentations

La gestion des alimentations répond à deux préoccupations :
- assurer la continuité des alimentations ;
- optimiser le prix de l'énergie, en choisissant la source d'énergie la moins chère.

Exemples :

- Coupure possible de chauffage, ou de chambres froides, durant quelques heures ;
- Emploi d'un groupe électrogène aux heures de pointe, emploi d'une chaudière au gaz ou au fuel.

2.3. Décalage des consommations

On interdit aux heures de pointe, le fonctionnement de certains récepteurs qui peuvent fonctionner aux heures creuses.

Exemples :

- Chauffe-eau à accumulation ;
- Radiateur à accumulation.

On réalise une économie sur la prime fixe d'abonnement et sur le prix des kWh.

2.4. Amélioration du $\cos \varphi$

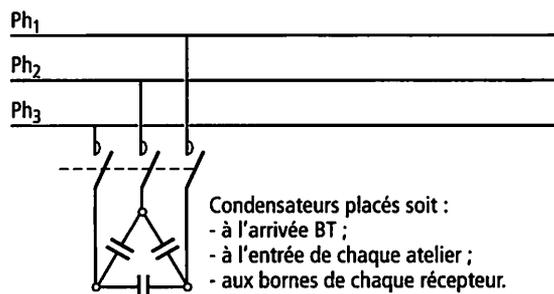
De nombreux récepteurs consomment de l'énergie réactive.

Exemples :

- Éclairage fluorescent non compensé : $\cos \varphi = 0,6$.
- Moteurs asynchrones à vide : $\cos \varphi = 0,3$.

Un mauvais $\cos \varphi$ d'une installation conduit à :

- des pertes en ligne importante ;
- une facturation de l'énergie réactive par le distributeur.



1 - Production, transport et distribution de l'électricité

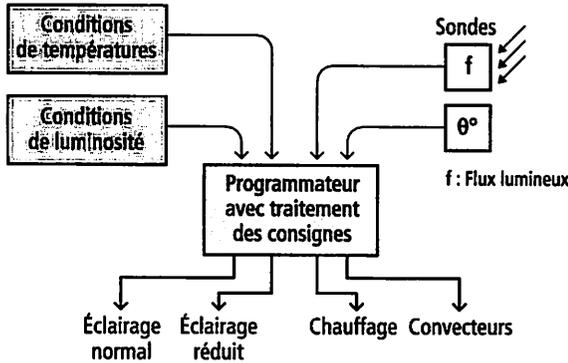
2.5. Programmation temporelle

Elle est surtout utilisée pour établir des circuits en fonction de l'occupation des locaux.

La programmation peut être journalière, hebdomadaire, mensuelle.

Cette programmation permet, par exemple :

- d'anticiper le fonctionnement du chauffage ;
- de couper le circuit d'éclairage au-delà d'une certaine heure.



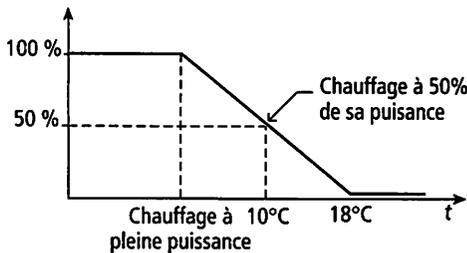
2.6. Régulation

La régulation est, le plus souvent, destinée à piloter une installation de chauffage ou de climatisation. Elle permet de maintenir des conditions optimales.

Elle peut être à :

- régulation du chauffage sur la température intérieure ;
- régulation du chauffage sur la température extérieure ;
- régulation du chauffage sur la température intérieure et extérieure.

Différentes allures peuvent être programmées : arrêt, hors gel, réduit, confort, accéléré.



3. La cogénération

3.1. Définition

La cogénération est la production simultanée d'énergie thermique et mécanique à partir d'un même combustible. Ce combustible est généralement du gaz, du fuel ou un produit de récupération comme les ordures ménagères, les déchets industriels ou les gaz fatals.

L'énergie thermique est utilisée pour la production de vapeur ou d'eau chaude nécessaire à un procédé industriel ou pour le chauffage.

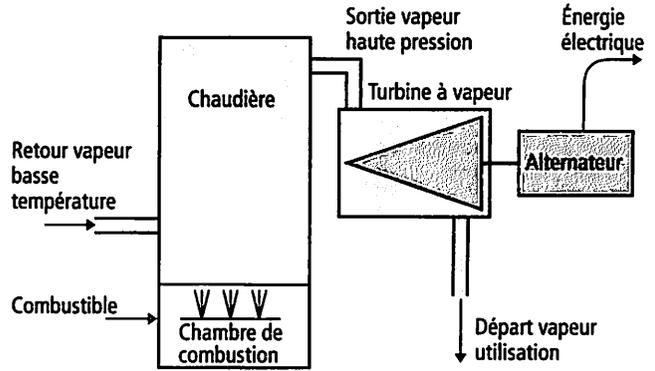
L'énergie mécanique est utilisée pour entraîner un alternateur qui sert à la production d'électricité.

Le rendement global d'un système de cogénération est nettement supérieur à celui de deux systèmes indépendants dont l'un produirait de la chaleur et l'autre de l'électricité.

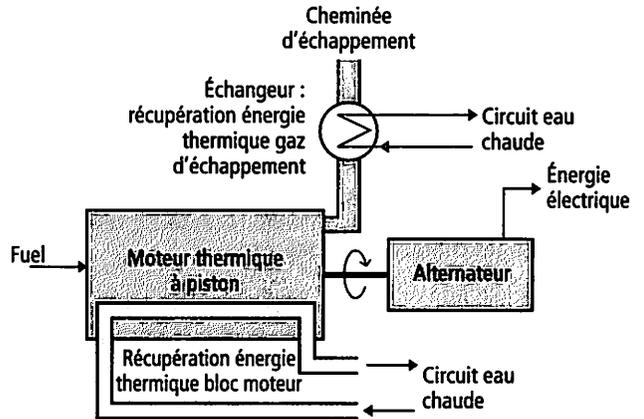
3.2. Principe de fonctionnement

Les systèmes de cogénération utilisent pour la production d'énergie mécanique un moteur à combustion interne (turbine à gaz ou à vapeur) ou un moteur thermique (moteur à pistons). L'énergie thermique est tirée de la combustion par l'intermédiaire d'un échangeur de chaleur.

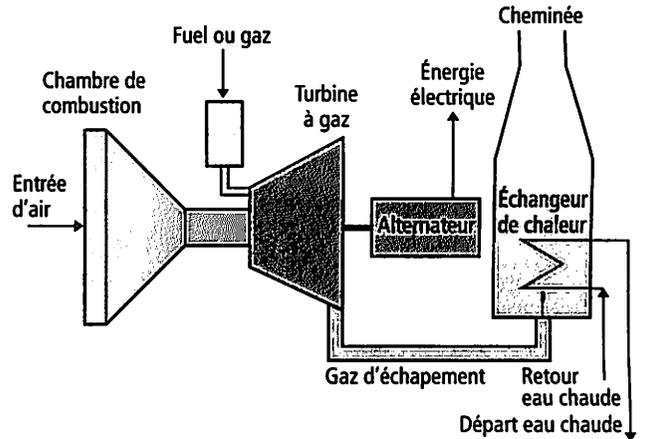
• Cogénération avec turbine à vapeur :



• Cogénération avec moteur thermique :



• Cogénération avec turbine à gaz :



3.3. Avantages et inconvénients de la cogénération

• Les principaux avantages sont :

- Rendement global élevé (supérieur à 80 % alors qu'un système traditionnel ne dépasse pas 60 %).
- Diminution de la pollution atmosphérique par l'amélioration du rendement et l'utilisation du gaz propre.
- La cogénération permet d'avoir une source d'énergie électrique même en l'absence du réseau EDF (réseau secours).
- Coût de l'ensemble énergie thermique-électrique plus faible pendant les périodes hivernales.

• Les inconvénients sont :

- Coût de l'installation élevé (difficile à rentabiliser).
- Vente du surplus d'énergie électrique à EDF non rentable pendant les périodes chaudes.
- Risques techniques pour l'entreprise en cas de défaillance.
- Risque financier si l'entreprise ne peut pas honorer son contrat de fourniture d'énergie électrique à EDF.

La demande d'électricité a considérablement évolué, du fait des changements intervenus dans les modes de vie, et dans les conditions d'utilisation de l'énergie.

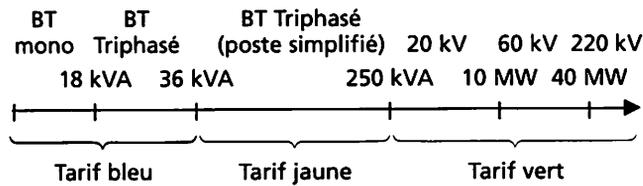
La tarification de l'énergie est liée à la loi de l'offre et de la demande.

Elle comporte essentiellement :

- une prime fixe qui traduit les coûts de mise à disposition permanente de la puissance souscrite ;
- des prix de kWh liés à la consommation d'énergie.

Il existe trois types de tarifs, basés sur le niveau de puissance :

- tarif bleu : utilisation domestique (de 6 à 36 kVA) ;
 - tarif jaune : puissance de 36 à 250 kVA, livraison en basse tension ;
 - tarif vert : puissance souscrite > 250 kVA, livraison en moyenne ou haute tension ;
- et en option, « EJP » (Effacement Jours de Pointe), qui peut s'appliquer à chacun des tarifs.



1. Tarif bleu

Il comprend d'une part une prime fixe mensuelle qui dépend de la puissance souscrite, d'autre part un montant du kWh consommé selon deux tarifs :
 - tarif simple (option de base) ;
 - tarif heures creuses.

Puissance souscrite en kVA	OPTION BASE		OPTION HEURES CREUSES	
	Abonnement mensuel en francs	Prix du kWh en centimes	Abonnement mensuel en francs	Prix du kWh en centimes
3	10,75	51,85		
6	27,32		48,10	Heures* creuses
9	54,87		86,35	31,78
12	78,78		124,60	
15	102,69		162,85	Heures pleines
18	126,60		201,10	51,85
24	211,20		336,28	
30	295,80		471,46	
36	380,40		606,64	

Prix au 01.05.1999 - * Heures creuses : 8 heures par jour (les horaires sont indiqués sur les factures).

2. Option Tempo

Avec cette option, le prix du kWh dépend du moment de la journée (heure pleine ou heure creuse), et du jour de l'année :
 - jours bleus (300 jours par an) ;
 - jours blancs (43 jours par an) ;
 - jours rouges (22 jours par an compris entre le 1^{er} novembre et le 31 mars).

Puissance souscrite en kVA	OPTION TEMPO (prix au 01.05.1999)			
	Abonnement mensuel en francs	Prix du kWh en centimes		
		Jours bleus	Jours blancs	Jours rouges
9	74,14	Heures creuses	Heures creuses	Heures creuses
12-18	101,56	21,99	44,28	81,38
24-30	187,37	Heures pleines	Heures pleines	Heures pleines
36	251,69	27,18	52,41	226,76

Cette option est intéressante pour les abonnés qui réduisent fortement leur consommation durant les heures chargées (en utilisant, par exemple, une autre source d'énergie).

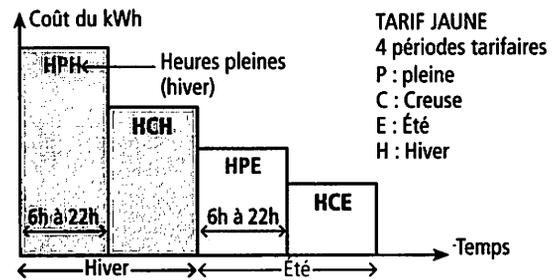
3. Tarif jaune

Il s'adresse essentiellement aux abonnés dont la puissance souscrite est comprise entre 36 kVA et 250 kVA ; l'énergie est livrée en basse tension après paiement d'un forfait (ticket d'accès).

Le montant du ticket d'accès représente une partie de l'investissement du poste de transformation.

Le tarif jaune ne comporte que 4 prix du kWh.

Il comporte deux saisons (été, hiver), des heures pleines et des heures creuses.



VERSIONS	TARIF JAUNE - OPTION BASE (Prix au 01.05.1998)				
	Prix annuelle fixe en francs par kVA	Prix du kWh en centimes			
		HPC	HCH	HPE	HCE
Utilisation longue	310,56	54,70	38,19	19,54	15,02
Utilisation moyenne	103,92	78,01	51,60	20,51	15,80
Dépassement en francs par heure	70,98				

HPH : heures pleines d'hiver ; HCP : heures creuses d'hiver ; HPE : heures pleines d'été ; HCE : heures creuses d'été.

On constate un très grand étalement des prix du kWh qui incite aux économies d'énergie aux heures de pointe. Le prix du kWh varie alors, en effet, de 15,02 à 54,70 c/kWh en utilisation longue, soit dans le rapport de 1 à 3,6.

4. Tarif vert

Ce tarif est appliqué aux installations alimentées en moyenne tension et haute tension par un poste privé.

Ce tarif est établi sur la base de :

- cinq périodes tarifaires : P1 à P5 (P1 : heures de pointe, P2 : HPH, P3 : HCH, P4 : HPE, P5 : HCE) ;
- quatre modes d'utilisation de l'énergie : très longue utilisation, longue utilisation, tarif général, courte utilisation.

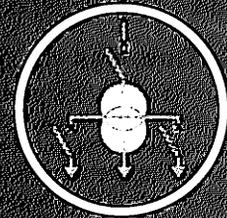
Dans le cas du tarif vert, une étude très détaillée de toutes les options tarifaires permet d'établir le contrat le mieux adapté aux besoins de l'utilisateur, tout en respectant les contraintes du réseau de distribution.

Pour bien gérer l'énergie électrique, l'abonné doit :

- souscrire une puissance nécessaire et suffisante ;
- adapter sa consommation en fonction des périodes tarifaires, car il ne faut pas oublier que l'énergie électrique ne se stocke pas.



2 - Alimentation en énergie électrique



Sommaire

2 - 1 - Sources d'alimentation

- 13. Structure des postes de livraison p. 22
- 14. Cellules haute tension..... p. 24
- 15. Transformateurs de distribution p. 25
- 16. Construction des transformateurs..... p. 26
- 17. Couplages des transformateurs..... p. 31
- 18. Caractéristiques et symboles
des transformateurs p. 33
- 19. Comptage de l'énergie p. 35
- 20. Schémas des liaisons à la terre p. 36
- 21. Compensation du facteur
de puissance p. 37
- 22. Alimentation sans coupure p. 40
- 23. Alimentation normale-secours..... p. 41
- 24. Diverses sources d'énergie p. 42

2 - 2 - Installations de distribution

- 25. Structure des réseaux
en basse tension p. 43
- 26. Canalisations aériennes..... p. 44
- 27. Canalisations souterraines p. 46
- 28. Canalisations préfabriquées p. 48
- 29. Résumé des règles relatives
aux sections et protections p. 51
- 30. Calcul des courants
de court-circuit p. 52
- 31. Sectionneurs et consignations..... p. 56

L'alimentation d'une installation électrique est à prévoir avec un poste de transformation dès que la puissance atteint 50 kVA. L'abonné qui est livré en énergie électrique HT peut choisir son régime de neutre, n'est pas limité en puissance, et il bénéficie d'une tarification plus économique.

Le poste de transformation s'appelle poste de livraison.

1. Cahiers des charges d'un poste de livraison

C'est l'ensemble des documents qui permettent à l'installateur d'établir un poste de transformation entre le réseau HT du distributeur (EDF, réseau de 5 à 20 kV) et l'abonné utilisateur d'énergie électrique.

1.1. Données de l'utilisateur

- **Besoin en puissance** : bilan des puissances, récepteurs à alimenter.
- **Position du poste** : le poste de distribution doit être central mais doit aussi être accessible au distributeur d'énergie (EDF).
- **Continuité d'alimentation souhaitée** : étude des conséquences des coupures sur les arrêts de production, les pertes de denrées, les arrêts de chauffage, la sécurité.

1.2. Données du distributeur

- Le distributeur doit préciser :
- la nature du réseau (aérien ou souterrain) ;
 - la puissance de court-circuit ;
 - la tension de service (de 5 kV à 20 kV) ;
 - les variations de tension possibles ($\pm 7\%$ en HT) ;
 - le type d'alimentation : simple dérivation, double dérivation, coupure d'artère ;
 - les frais de raccordement au réseau HT ;
 - la tarification de l'énergie.

1.3. Données de l'installateur

- L'installateur doit présenter à EDF (distributeur) une demande d'approbation comportant :
- la position du poste ;
 - le schéma du poste et des circuits de terre ;
 - la nomenclature des matériels électriques et leurs caractéristiques ;
 - le plan du poste avec comptage d'énergie ;
 - les dispositions prévues pour réduire l'énergie réactive consommée et la tarification d'énergie envisagée.

2. Différents types de postes de livraison

Notre étude se limite aux postes à comptage en BT.

2.1. Postes d'extérieur

- **Poste sur poteau** : puissance 25 - 50 - 100 kVA.
- **Postes préfabriqués** :
 - en bas de poteau : de 100 à 250 kVA ;
 - poste compact : de 160 à 1 250 kVA.
- **Poste maçonné traditionnel** : de 160 à 1 250 kVA.

2.2. Postes d'intérieur

- **Postes ouverts** maçonnés ou préfabriqués.
 - **Postes en cellules** préfabriquées métalliques.
- Les puissances sont comprises entre 100 et 1 250 kVA.

Le comptage BT doit être remplacé par un comptage HT dès que l'installation dépasse 2 000 A, ou s'il existe plusieurs transformateurs.

Remarques :

- Le poste de livraison est alimenté par EDF dont le réseau a une tension normalisée de 20 kV ; dans certaines régions, cette tension peut être de 5, 10, 15 ou 30 kV.

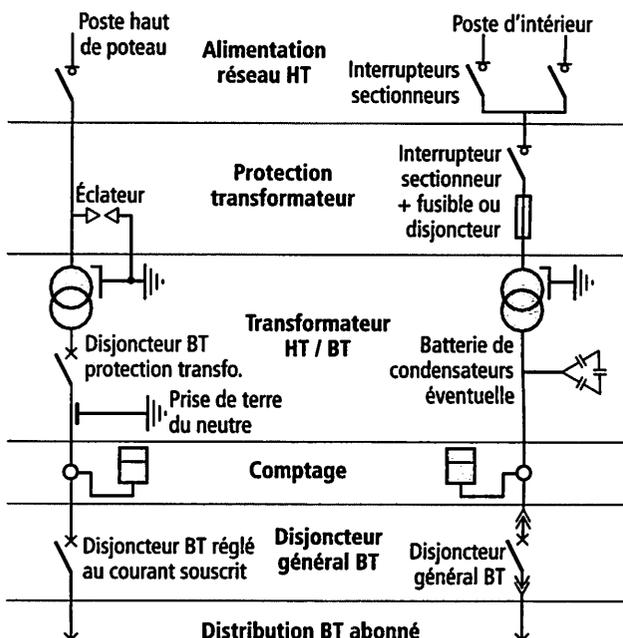
- L'alimentation peut être aérienne ou souterraine ; selon les cas, elle s'effectue en simple dérivation, en boucle, en coupure d'artère, en double dérivation.
- Pour les puissances inférieures à 1 250 kVA, on aura souvent intérêt à choisir un poste avec comptage en basse tension, moins onéreux.

3. Conception générale d'un poste de livraison

Le poste de livraison comporte essentiellement de l'appareillage et un ou plusieurs transformateurs afin d'assurer les fonctions suivantes :

- dérivation du courant sur le réseau ;
- protection du transformateur côté HT ;
- transformation HT/BT ;
- protection du transformateur côté BT ;
- comptage d'énergie.

Toutes les masses métalliques du poste sont reliées à la terre. Pour l'intervention dans le poste, les arrivées doivent être sectionnées et les câbles reliés entre eux mis à la terre.

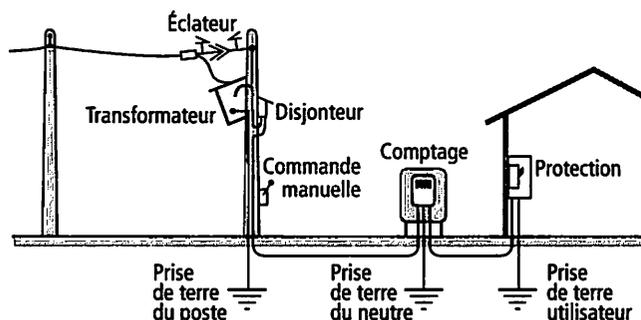


4. Postes en haut de poteau

Le transformateur et l'appareillage sont fixés sur le poteau, l'alimentation est aérienne, le départ s'effectue en aérien ou en souterrain.

a) Protection

- **Côté haute tension**, protection contre la foudre par éclateur.
- **Côté basse tension**, un disjoncteur protège le transformateur contre les surintensités.

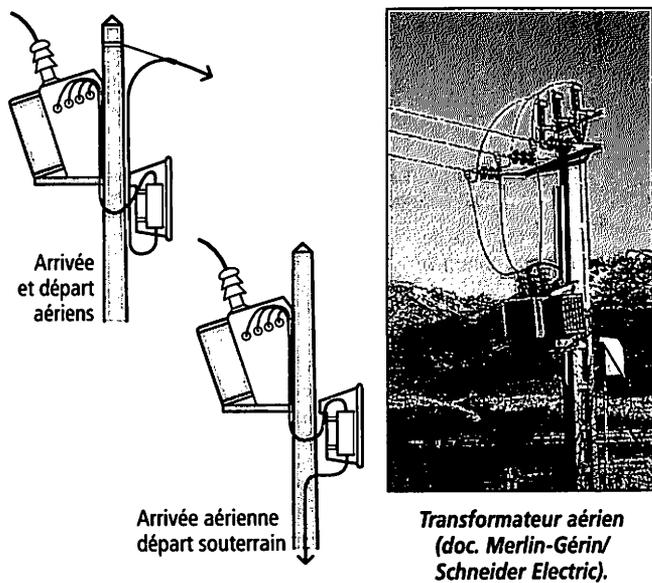


b) Transformateurs utilisés

Puissances (230 ou 400 V) (en kVA)		25	50	100	160
Pertes à vide (en W)		115	190	320	460
Pertes dues à la charge à 75 °C (en W)		700	1 100	1 750	2 350
Courant à vide (%)		3,3	2,9	2,5	2,3
Tension de court-circuit (%)		4	4	4	4
Chute de tension à pleine charge (%)	cos φ = 1	2,84	2,26	1,81	1,54
	cos φ = 0,8	3,98	3,77	3,57	4,43
Rendement à pleine charge (%)	cos φ = 1	96,84	97,48	97,97	98,27
	cos φ = 0,8	96,08	96,88	97,48	97,85

c) Raccordement

Le transformateur est alimenté en aérien, le départ BT s'effectue soit en aérien, soit en souterrain.



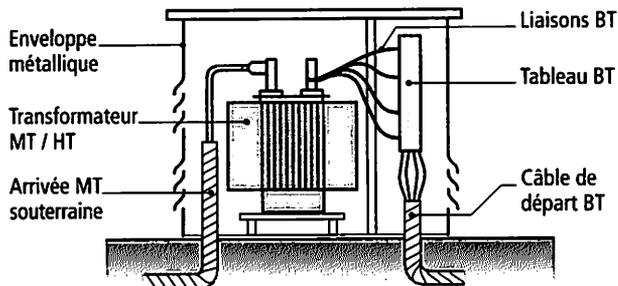
5. Postes préfabriqués monobloc

Ces postes peuvent être soit en bas de poteau, soit sur une plate-forme extérieure. Le raccordement s'effectue par câble soit au réseau aérien, soit au réseau souterrain.

5.1. Constitution

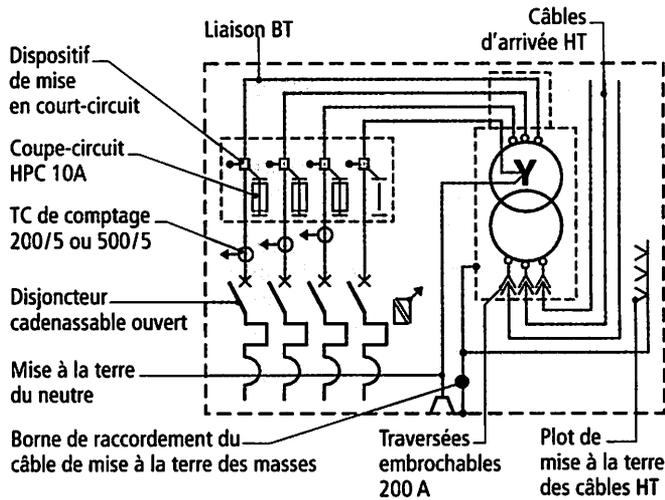
Le tableau BT comporte un interrupteur avec fusibles ou un disjoncteur avec coupure visible.

La puissance du transformateur est comprise entre 100 kVA et 1 000 kVA.



5.2. Schéma interne

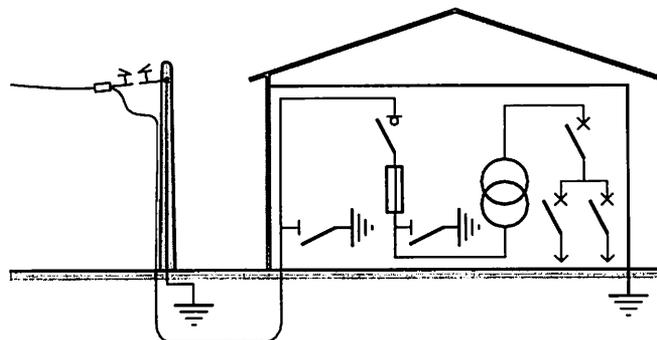
Ces postes sont très compacts et leur mise en place est très rapide ; il en existe une grande variété selon le milieu (urbain ou rural), selon les puissances installées, ou le type d'alimentation (en aérien ou en souterrain).



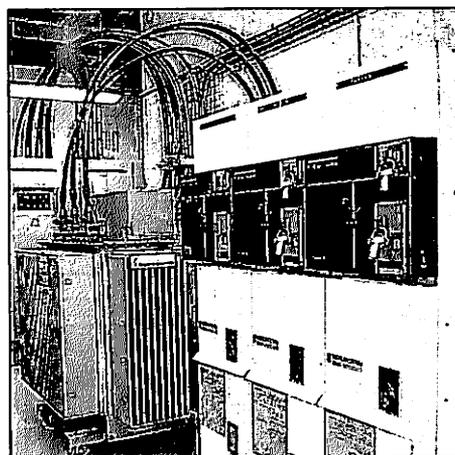
6. Postes d'intérieur

L'installation d'un poste de livraison en intérieur se justifie lorsqu'on doit protéger l'appareillage HT et BT du poste contre les fortes variations de température, ou dans le cas de puissances importantes.

On distingue les postes dont l'appareillage HT est sous enveloppe métallique, des postes équipés d'appareillage HT sans enveloppe ; le matériel, dans ce dernier cas, est dit « ouvert ». Ces postes maçonnés sont de plus en plus remplacés par des cellules préfabriquées.



Les postes avec cellules préfabriquées métalliques sont étudiés page suivante.



Poste d'intérieur HT/BT à comptage BT pour réseau 20 kV (doc. Schneider Electric).

Les postes avec cellules préfabriquées métalliques ont pratiquement remplacé tous les postes maçonnés avec appareillage ouvert ; ils présentent l'avantage d'une meilleure sécurité, et d'une mise en place rapide.

2 - Alimentation en énergie électrique

1. Raccordement au réseau haute tension (HT)

Les entreprises industrielles ou tertiaires, grandes consommatrices d'énergie, sont alimentées en haute tension 20 kV (HTA). L'étendue de leur site fait qu'elles sont amenées à réaliser un réseau interne HT. Une distribution basse tension n'est pas possible car elle engendrerait la pose de câbles de très grosses sections et de grandes longueurs. Les transformateurs HT/BT sont donc disposés au plus près des éléments consommateurs d'énergie.

Plusieurs schémas de raccordement des postes de transformation sont possibles :

- schéma en antenne, ou simple dérivation ;
- schéma en boucle ;
- schéma en double dérivation (voir page 16).

2. Cellules fonctionnelles

Les postes avec cellules préfabriquées métalliques sont réalisés avec des cellules remplissant chacune une fonction.

Exemples :

- cellule d'arrivée ;
- cellule de protection HT ;
- cellule de protection BT (fusible + interrupteur) ;
- cellule de protection BT (disjoncteur).

Ces cellules sont juxtaposées à la demande et permettent de réaliser n'importe quelle disposition de poste de livraison.

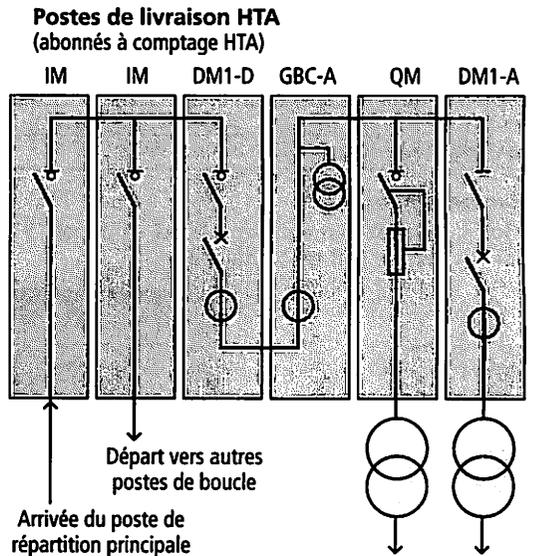
Fonctions Raccordement au réseau		
Arrivée ou départ par interrupteur (IM)	Avec interrupteur et TC (IMC)	Arrivée en double dérivation (DDM)
Fonction protection		Comptage
Avec interrupteur et fusibles (QM)	Disjoncteur et sectionneur (DM1)	Transformateur de tension (CM)

Exemples de cellules HTA (Schneider Electric)

3. Association des cellules HTA

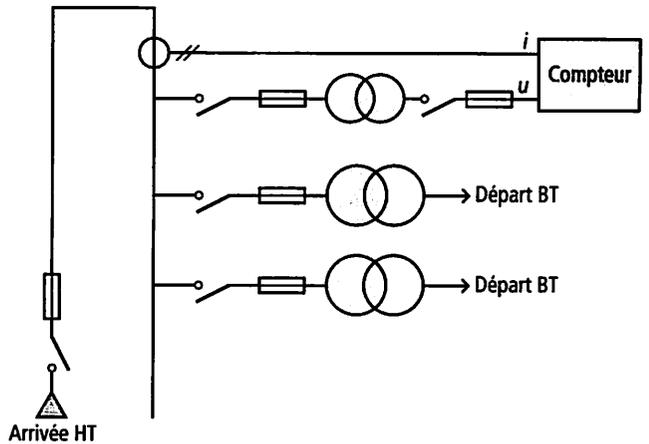
Les appareils haute tension sont répartis en cellules individuelles qui par association permettent de réaliser de multiples schémas.

Ce système modulaire permet la construction de postes de répartition HT et de livraison avec une très grande souplesse.



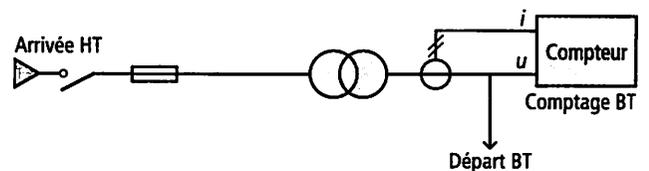
4. Le comptage

Pour un abonné ayant plusieurs transformateurs HT/BT, le comptage est effectué au point de livraison HT.



Le comptage se fait sur chaque phase par l'intermédiaire de transformateurs de tension et de courant.

Si l'abonné possède un seul transformateur, le comptage peut s'effectuer en BT.



Le comptage s'effectue côté basse tension lorsque le poste ne comporte qu'un transformateur et que sa puissance est au maximum de 630 kVA.

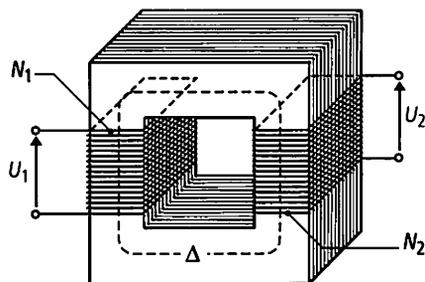
Afin d'éviter les pertes par effet Joule dans les lignes électriques, on doit élever la tension avec les transformateurs; ceci est facilement résolu en courant alternatif.

D'une façon générale, chaque fois que l'on doit adapter une tension ou un courant alternatif, on fait appel au transformateur qui a un excellent rendement, surtout pour les fortes puissances.

1. Rappels d'électrotechnique

1.1. Principe

Sur un circuit magnétique on réalise deux enroulements, l'un appelé primaire de N_1 spires, l'autre secondaire de N_2 spires.



Lorsque l'enroulement primaire est relié à une source alternative de tension U_1 , il crée un flux alternatif. Ce flux variable induit dans l'enroulement secondaire une fém. Si on relie ce secondaire à un récepteur, un courant alternatif parcourt le circuit. La puissance électrique passe du primaire au secondaire par l'intermédiaire des variations de flux.

1.2. Rapport de transformation

Il est indépendant de la charge. Il dépend du rapport des nombres de spires.

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{N_2}{N_1} = m$$

U_1 : tension primaire
 U_2 : tension secondaire
 N_1 : nombre de spires primaire
 N_2 : nombre de spires secondaire.

1.3. Formule de Boucherot

\hat{B} : Induction maximale dans le fer en teslas (T)

N_1 : Nombre de spires primaire

S : Section du circuit magnétique en mètres-carrés (m^2)

f : Fréquence du courant en hertz (Hz)

$$U_1 = 4,44 \hat{B} S N_1 f$$

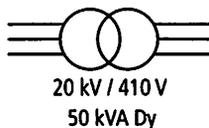
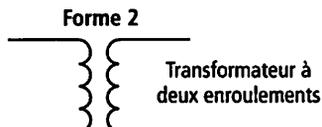
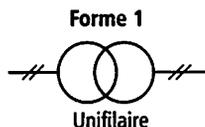
1.4. Caractéristiques et symbole

Les transformateurs se définissent essentiellement par les valeurs suivantes :

- tension primaire (en volt ou en kV) ;
- tension secondaire (en volt ou en kV) ;
- puissance apparente (en kVA ou en VA) ;
- fréquence de fonctionnement (en général 50 Hz).

Sur la plaque signalétique d'un transformateur, on peut encore trouver la chute de tension en charge, le couplage des enroulements, la classe de température, les courants primaires et secondaires, etc.

• **Normalisation** : la norme française NF C 52.100 définit les niveaux d'isolement, les conditions de service, les limites d'échauffement, les essais avant livraison.



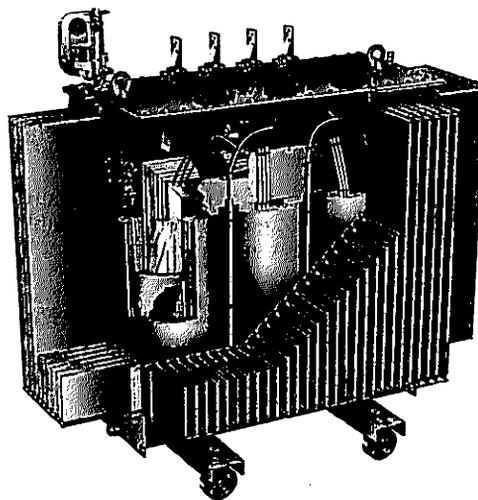
Transformateur triphasé
 20 kV au primaire
 410 V au secondaire
 Couplage : primaire triangle
 secondaire étoile

2. Dispositions générales

Le transformateur est une machine d'induction qui comporte principalement :

- un circuit magnétique comprenant des colonnes, une culasse supérieure et une culasse inférieure ;
- un circuit électrique comprenant 2 bobines, l'une formant enroulement primaire, l'autre enroulement secondaire ;
- des organes mécaniques assurant les fonctions telles que : support, protection, manutention, refroidissement.

2.1. Constitution



Transformateur triphasé (doc. France Transfo).

2.2. Classification des transformateurs

- Petits transformateurs : $P < 1$ kVA
 $1 \text{ kVA} < P < 25$ kVA.
- Transformateurs de distribution : $25 \text{ kVA} < P < 2\,000$ kVA.
- Transformateurs pour le transport d'énergie :
 $P > 2\,000$ kVA jusqu'à $1\,000$ MVA

Notre étude des transformateurs portera surtout sur les transformateurs de puissance utilisés en distribution d'énergie et dont la puissance se situe entre 25 kVA et 2 000 kVA, les plus courants étant de 630 kVA.

2.3. Utilisation des transformateurs

a) En monophasé

- Transformateurs de sécurité 230/24 V.
- Transformateurs pour circuits électroniques.
- Transformateurs pour soudure à l'arc.

b) En triphasé

- Transport d'énergie : de 20 kV à 400 kV.
- Distribution d'énergie : 20 kV/230/410 V.

c) Applications spéciales

Ces applications concernent les cas où l'on est conduit à modifier une tension alternative : fours à induction, transformateurs de mesure.

2 - Alimentation en énergie électrique

1. Circuit magnétique

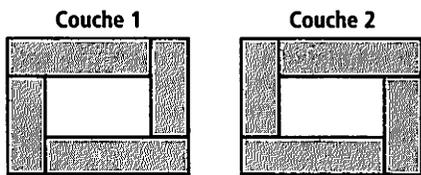
Son rôle essentiel est de canaliser le flux et de présenter le minimum de pertes par hystérésis et courant de Foucault.

1.1. Différentes formes

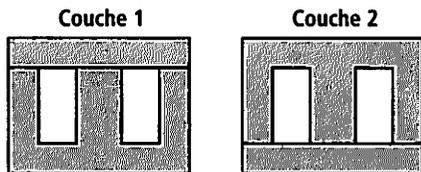
a) Transformateur monophasé

Il peut être :

- soit à 2 colonnes formées par un empilage de tôles découpées : couche 1, couche 2 ;



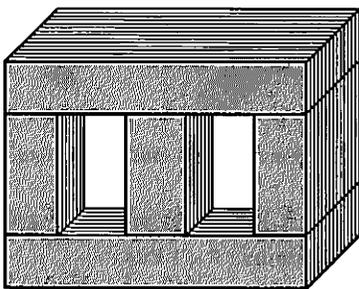
- soit de forme cuirassée, c'est-à-dire que les enroulements sont placés sur une colonne centrale et le flux se referme par chacun des côtés qui forment cuirasse.



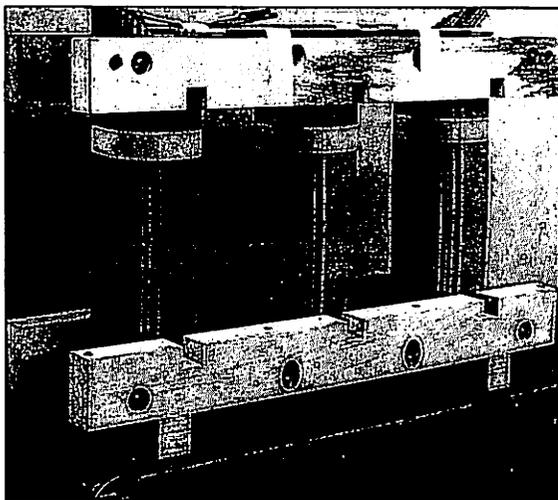
La forme des tôles, selon les dimensions du circuit magnétique, peut être en E, en U, en L ou en I, l'assemblage s'effectuant toujours en croisant les joints.

b) Transformateur triphasé

Le circuit comporte 3 colonnes placées dans un même plan et fermées par deux culasses horizontales.



Le serrage des culasses et l'assemblage des noyaux sont obtenus par des matériaux non magnétiques.

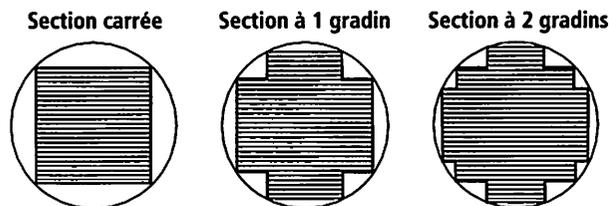


Circuit magnétique à trois colonnes en cours de montage. (doc. France-Transfo).

1.2. Section des colonnes

Si, pour les faibles puissances, les sections sont carrées, on réalise des sections circulaires pour les grosses puissances. En effet, les bobinages sont à section circulaire pour des raisons de résistance aux efforts électrodynamiques entre spires en cas de court-circuit et pour une réalisation plus facile.

Pour avoir une meilleure utilisation du fer, on doit donc se rapprocher de la section circulaire : on y parvient en réalisant des gradins.

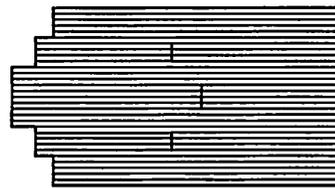


1.3. Assemblage colonne cuirasse

La réalisation de joints magnétiques qui réduisent le plus possible l'entrefer dans un circuit magnétique permet d'obtenir la réluctance minimale du circuit, donc des pertes faibles.

a) Joints enchevêtrés

Les extrémités des tôles des colonnes et de la culasse sont enchevêtrées les unes avec les autres.



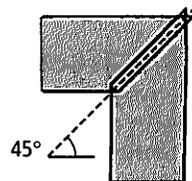
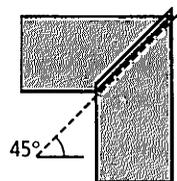
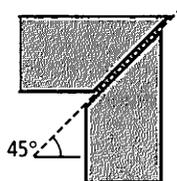
b) Joints à coupe oblique

Dans le cas de tôles à cristaux orientés qui favorisent le passage du flux dans le sens du laminage, le joint doit être de 45°. Dans ces conditions, il faut un faible recouvrement, obtenu en décalant le joint.

Premier assemblage

Deuxième assemblage

Les deux assemblages superposés



Le serrage des tôles est effectué par des tiges filetées régulièrement réparties et isolées du circuit magnétique.

Des canaux de refroidissement peuvent être aménagés pour les gros circuits magnétiques.

1.4. Matériaux employés

- Tôles d'acier au silicium, pertes 1 à 1,6 W/kg à l'induction de 1 tesla.

- Tôles à cristaux orientés, pertes 0,55 W/kg à 1 tesla.

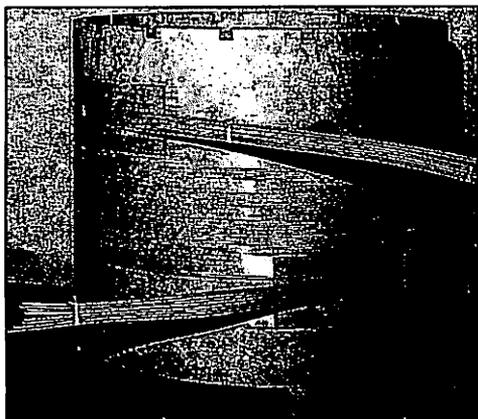
Ces tôles ont une épaisseur de 0,35 mm et sont isolées sur une face par oxydation superficielle.

2. Circuit électrique

Il est constitué par les enroulements primaire et secondaire et leur isolement.

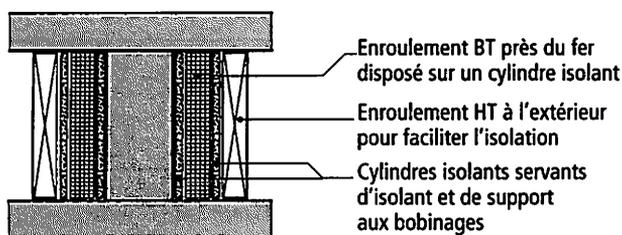
2.1. Disposition des enroulements

Technologiquement, dans tout transformateur, on distingue l'enroulement HT (haute tension) de l'enroulement BT (basse tension) que ce transformateur soit élévateur ou abaisseur de tension.



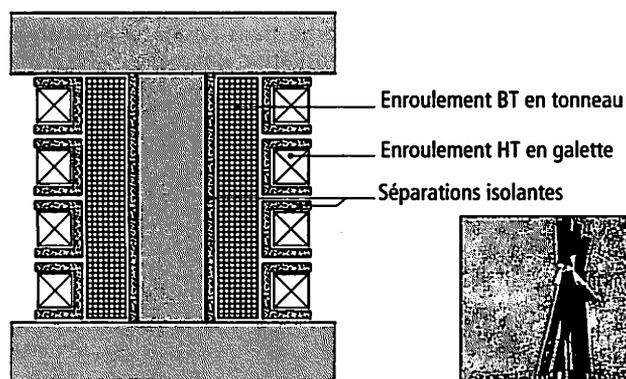
Bobinage BT à plusieurs conducteurs en parallèle réalisé en tonneau (doc. Alsthom).

a) Bobinage concentrique



Ce type de bobinage est très utilisé dans les petits transformateurs ; il est dit « en tonneau ».

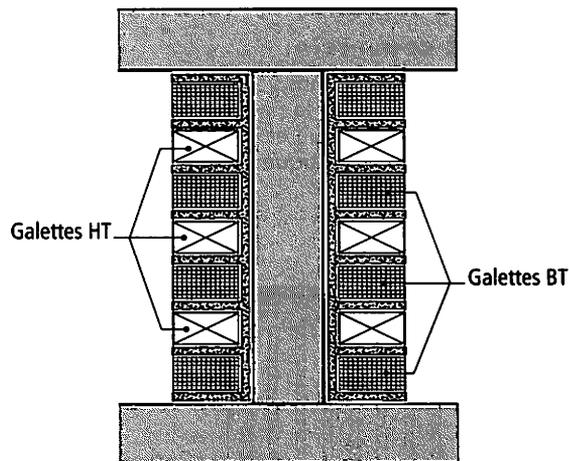
b) Bobinage mixte



Bobinage moyenne tension 20 kV réalisé en galette (doc. Alsthom).

Pour éviter les très fortes ddp entre les spires d'extrémité de deux couches successives, on réalise des bobines plates (galettes) qui sont montées en série les unes avec les autres. Utilisation en HT et THT.

c) Bobinage alterné en galettes



Les galettes HT et BT sont alternées, l'empilage est terminé par les galettes BT plus faciles à isoler du circuit magnétique.

2.2. Problèmes d'isolement

Il est nécessaire de bien isoler les enroulements entre eux et par rapport à la masse.

a) Écrans

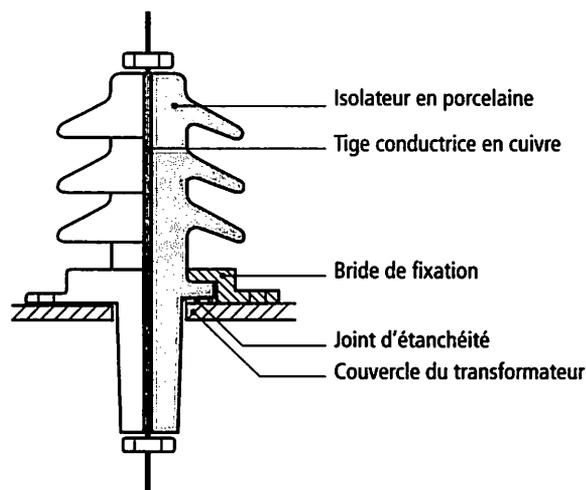
- L'écran isolant est placé entre la masse et les bobinages ou entre les bobinages HT et BT.
- L'écran de sécurité est une spire ouverte d'une bande de cuivre reliée à la masse, placée entre HT et BT. Cet écran peut jouer le rôle d'écran électrostatique et empêcher la transmission des parasites de la HT vers la BT. Il doit être relié à la terre.

b) Protection contre les surtensions

En cas de coup de foudre sur une ligne, une onde de choc peut produire une très forte surtension sur les enroulements HT d'un transformateur et provoquer un claquage des isolants entre spires. Pour éviter cet inconvénient, on réalise, du côté HT une galette dite bobine de choc de 10 à 20 spires et comportant un isolement renforcé.

2.3. Traversées isolantes

Elles assurent la liaison électrique entre les enroulements et les circuits électriques extérieurs.



C'est une borne isolante qui doit permettre :
– l'isolement de la liaison par rapport au couvercle ;
– d'assurer l'étanchéité ;
– d'obtenir une résistance suffisante.

Pour les gros transformateurs, les traversées sont remplies d'huile.



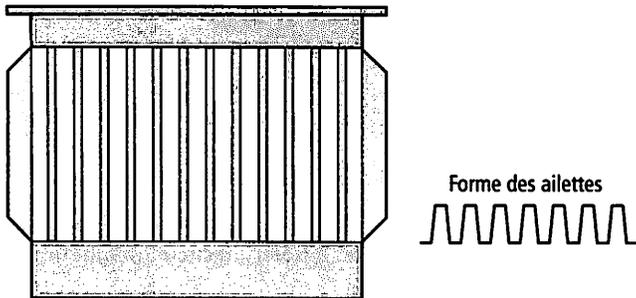
2 - Alimentation en énergie électrique

3. Organes mécaniques

3.1. Cuve et couvercle

Ils assurent plusieurs fonctions :

- protection mécanique de la partie active ;
- contenance du diélectrique et son refroidissement ;
- support du circuit magnétique ;
- fixation des traversées ;
- manutention.



Les cuves et couvercles sont en tôle d'acier soudé et doivent posséder les qualités de résistance, de rigidité et d'étanchéité suffisantes pour remplir les fonctions précédentes.

3.2. Refroidissement

Les pertes dans le circuit magnétique (hystérésis et courants de Foucault) et par effet Joule dans les enroulements provoquent des échauffements. Pour éviter la détérioration des isolants, on refroidit les transformateurs ce qui permet, en plus, une meilleure utilisation des matériaux.

a) Refroidissement dans l'air

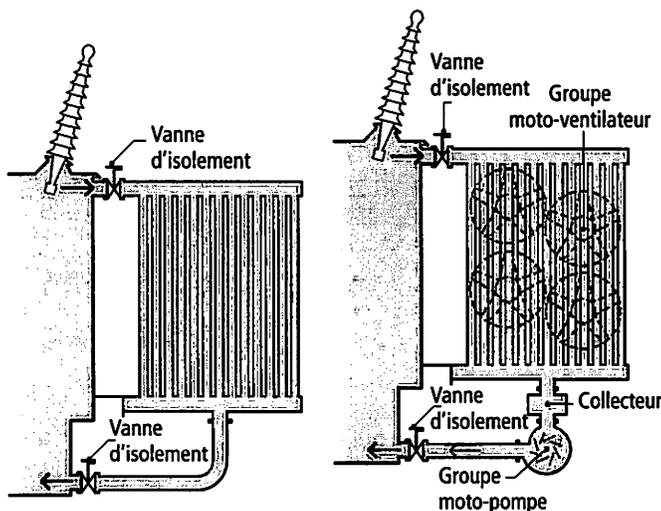
Le transformateur est mis dans une enceinte grillagée, la ventilation peut être naturelle ou forcée.

b) Refroidissement naturel dans l'huile

La cuve renfermant le transformateur est munie d'ailettes : l'huile se refroidit au contact des parois.

c) Refroidissement par radiateur d'huile

L'huile circule naturellement dans un radiateur séparé de la cuve. Ce radiateur peut être ventilé et la circulation d'huile forcée par une pompe qui accélère le passage de l'huile.

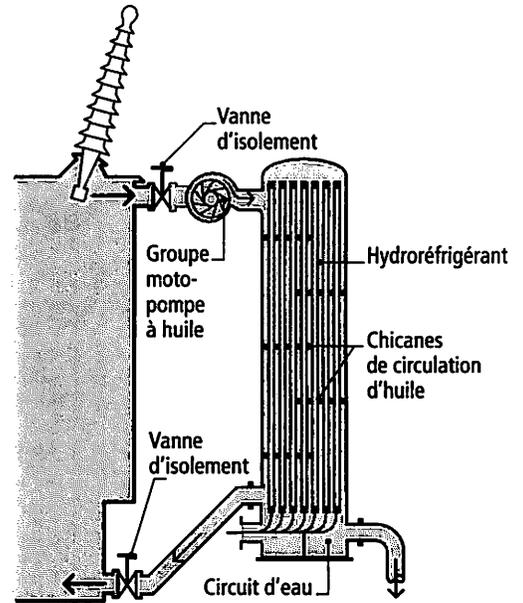


Refroidissement par radiateur d'huile

Refroidissement par circulation d'huile forcée

d) Refroidissement avec hydroréfrigérant

La circulation de l'huile s'effectue dans une cuve contenant des tubes à l'intérieur desquels circule de l'eau froide.



Refroidissement par hydroréfrigérant

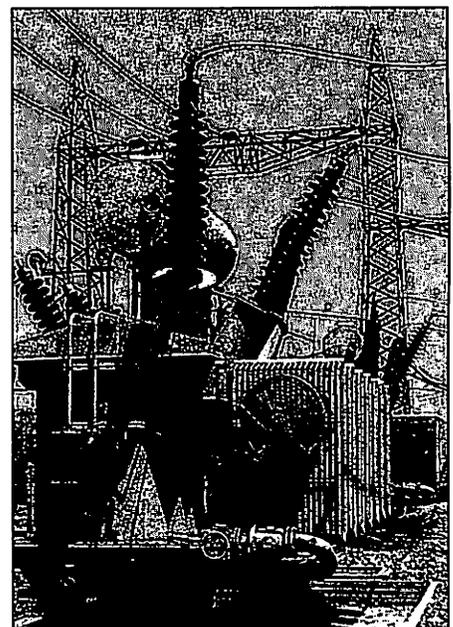
e) Symboles pour le refroidissement

Un groupe de 4 lettres permet de définir le mode de refroidissement.

1 ^{re} lettre	2 ^e lettre	3 ^e lettre	4 ^e lettre
Nature du diélectrique	Mode de circulation du diélectrique	Fluide de refroidissement	Mode de circulation du fluide
O Huile minérale	N Naturel	O Symboles de la première lettre	N Symboles de la deuxième lettre
L Diélectrique chloré	F Forcée	L de la première lettre	F de la deuxième lettre
G Gaz	D Forcée et dirigée dans les enroulements	G lettre	D lettre
A Air		A	
S Isolant solide		S	

Exemple :

ONAN : Transformateur immergé dans l'huile, à circulation naturelle, refroidi par air, à ventilation naturelle.



Transformateur avec refroidissement par circulation forcée de l'air type ONAN (doc. Alsthom).

3.3. Diélectriques

Selon les tensions appliquées aux enroulements, l'isolement général peut être assuré par :

- de l'air, c'est le cas des petits transformateurs en BT ;
- de l'huile, très employée dans tous les transformateurs de puissance, mais elle présente des risques d'incendie et d'explosion ;
- du quartz, c'est un sable qui étouffe les flammes mais rend le refroidissement plus difficile.

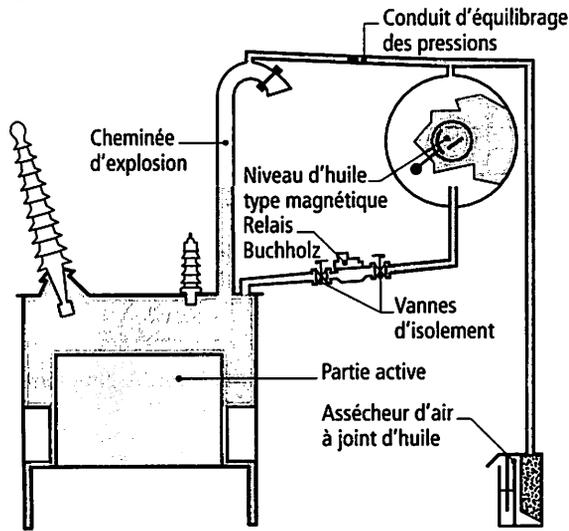
Ces diélectriques assurent à la fois l'isolement et le refroidissement des transformateurs.

L'utilisation des diélectriques chlorés (pyralène) est interdite car, en cas d'incendie, ces diélectriques incombustibles se décomposent et produisent de la dioxine, qui est un gaz très toxique. Ils sont remplacés soit par de l'huile minérale, soit par un enrobage de résine avec refroidissement par l'air.

3.4. Accessoires et protection

Un circuit permet de compenser les dilatations du liquide de refroidissement et d'éviter l'oxydation de l'huile au contact de l'air.

a) Préservation de l'huile



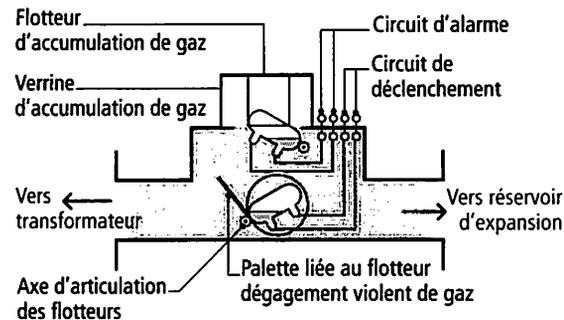
Le réservoir d'expansion en est l'élément essentiel. Il est en contact avec l'air par l'intermédiaire d'un assécheur d'huile.

Un thermomètre à contact et un contrôleur de niveau complètent l'équipement.

b) Relais Buchholz

En cas de défaut diélectrique à l'intérieur du transformateur, il détecte le dégagement gazeux.

Deux contacts : l'un, d'alarme, intervient en cas de dégagement lent ; l'autre, de déclenchement, intervient lors d'un dégagement violent.

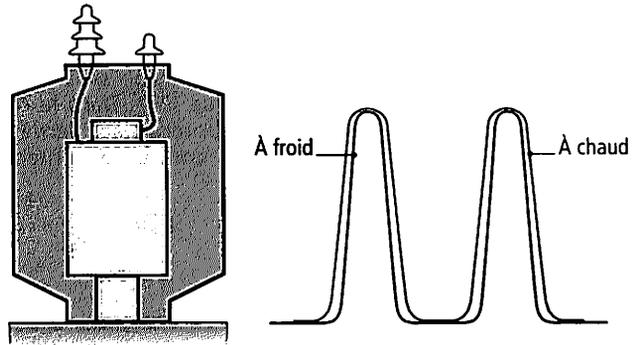


Ils permettent d'assurer la protection électrique interne du transformateur.

Enfin, en cas d'accident grave, la cheminée d'explosion munie d'un diaphragme en verre permet d'évacuer les surpressions dangereuses pour la cuve.

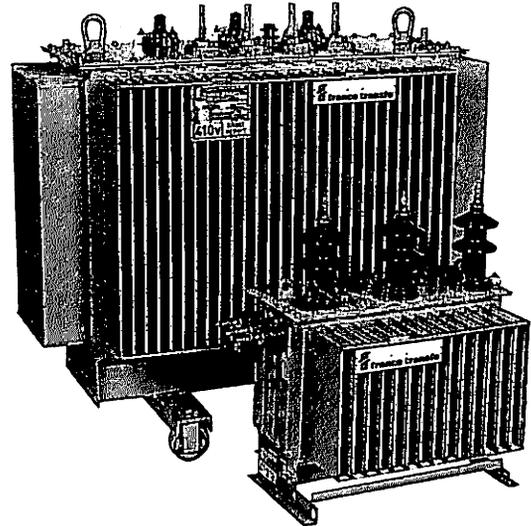
c) Transformateur étanche

Pour les transformateurs de distribution, la tendance est à la réalisation de cuves élastiques à remplissage intégral qui compensent la dilatation du diélectrique en se déformant légèrement.



Les avantages sont nombreux :

- aucun contact du diélectrique avec l'air ambiant ;
- entretien très réduit ;
- plus de conservateur ni d'assécheur d'air.



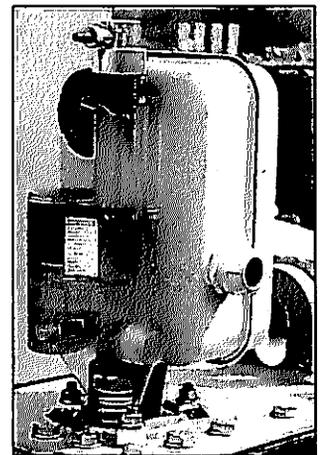
Transformateurs de distribution à cuve étanche et refroidissement naturel (doc. France-Transfo).

d) Bloc de protection intégré

Le bloc relais DGPT2 (Détection de Gaz, Pression, Température à 2 niveaux) protège les transformateurs immergés étanches à remplissage total contre les défauts internes et les surintensités.

Ils assurent les fonctions de surveillance de :

- dégagement gazeux et baisse du niveau du liquide de refroidissement ;
- élévation de la pression dans la cuve (seuil réglé à 0,2 bar) ;
- augmentation de la température (seuil à 90 °C qui donne l'alarme et deuxième seuil à 100 °C pour la mise hors tension du transformateur).



Bloc de protection DGPT2 (doc. Schneider Electric).

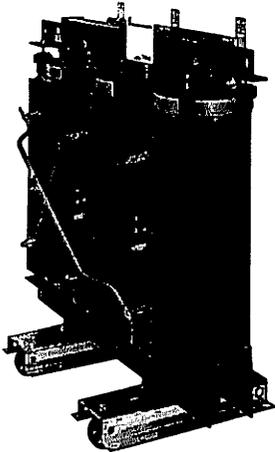


2 - Alimentation en énergie électrique

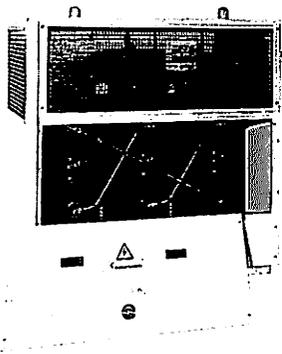
5.5. Les transformateurs de type sec enrobé

a) Présentation

Ces transformateurs ne sont pas placés dans une cuve, mais laissés à l'air libre. L'absence de diélectrique liquide limite les risques d'incendie et fait qu'ils sont particulièrement adaptés aux locaux à risques. Les enroulements sont enrobés sous vide d'air dans une résine époxyde ignifugée, le refroidissement se fait avec de l'air à circulation naturelle ou forcée. Ces transformateurs sont disponibles en version sans enveloppe IP00 ou sous enveloppe métallique IP31. Dans le cas d'absence d'enveloppe, le transformateur sera placé derrière un écran pour assurer une protection contre les contacts directs.



Transformateur Trihal de 4 000 kVA, 20 kV/5,5 kV sans enveloppe (doc. France Transfo).

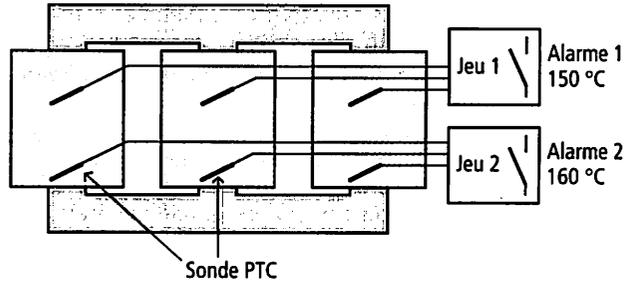


Transformateur Trihal (France Transfo) de 630 kVA, 20 kV/410 V avec enveloppe métallique (IP31). (doc. Schneider Electric).

b) Protection thermique des transformateurs secs

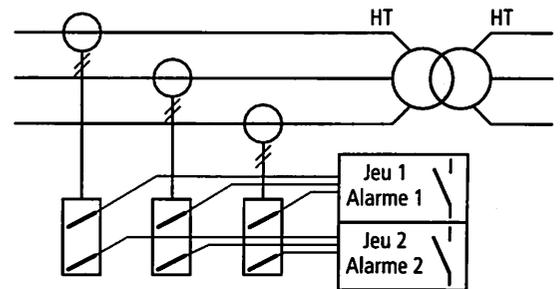
La protection thermique est réalisée à partir de la mesure de la température des enroulements. La mesure peut être directe dans les transformateurs HT/BT ou indirecte dans les transformateurs HT/HT.

• Principe de la mesure directe :



Deux jeux de sondes PTC sont disposés dans les enroulements. Un convertisseur de mesure associé à chaque jeu détermine la température et active une alarme en cas de dépassement.

• Principe de la mesure indirecte :



L'alimentation HT des enroulements interdit l'implantation directe des sondes PTC. Des transformateurs d'intensité alimentent des résistances avec un courant proportionnel à celui du transformateur HT/HT. L'image de la température est prise sur ces résistances à l'aide de sondes PTC. Des convertisseurs de mesures donnent comme pour la mesure directe 2 seuils d'alarme.

Caractéristiques électriques (d'après Merlin Gérin)

Puissance assignée (kVA) (1) (*)	160	250	400	630	800	1 000	1 250	1 600	2 000
Tension primaire assignée (1)	20 kV								
Niveau d'isolement assigné au primaire	24 kV pour 20 kV								
Tension secondaire à vide (1)	entre phases 410 V entre phase et neutre 237 V								
Réglage (hors tension) (1)	± 2,5 % (1)								
Couplage	Dyn 11 (triangle, étoile, neutre sorti)								
Pertes (W)	à vide 650 880 1 200 1 650 2 000 2 300 2 800 3 100 4 000 dues à la charge à 75 °C 2 300 3 400 4 800 6 800 8 200 9 600 11 500 13 900 17 500 à 120 °C 2 700 3 800 5 500 7 800 9 400 11 000 13 100 16 000 20 000								
Tension de court-circuit (%)	6 6 6 6 6 6 6 6 6 6								
Courant à vide (%)	2,3 2 1,5 1,3 1,3 1,2 1,2 1,2 1,2 1,1								
Courant d'enclenchement	I _e /I _n valeur crête 10,5 10,5 10 10 10 10 10 10 10 9,5 constante de temps (s) 0,13 0,18 0,25 0,26 0,30 0,30 0,35 0,40 0,40								
Bruit (dBA) (2)	puissance acoustique LWA 62 65 68 70 72 73 75 76 78 pression acoustique LPA (1-m) 50 53 56 57 59 60 61 62 63								
Décharges partielles (3)	< 10 pC à 1,1 Um								

(*) La puissance assignée est définie en refroidissement naturel dans l'air (AN).

(1) Autres possibilités sur demande. (2) Mesures selon IEC 551. (3) Mesures selon IEC 270.

Pour des raisons de continuité de service, ou des variations journalières ou saisonnières de consommation d'énergie, il est intéressant de pouvoir coupler deux ou plusieurs transformateurs en parallèle.

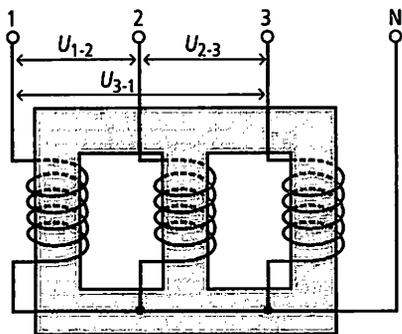
1. Conditions de couplage

- **Puissance** : la puissance totale disponible est la somme des puissances des transformateurs. Si les puissances des transformateurs sont différentes, la puissance du plus gros transformateur ne doit pas dépasser deux fois la puissance du plus petit.
- **Réseau** : les transformateurs sont alimentés par le même réseau.
- **Connexions** : mêmes longueurs de connexions, surtout côté BT.
- **Même indice horaire de couplage** des enroulements.
- **Tensions de courts-circuits** égales à 10 % près.
- **Tensions secondaires** très peu différentes selon la charge (0,4 % maximum).

2. Couplage des enroulements

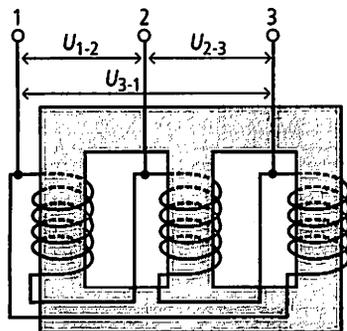
a) Couplage étoile

Il permet la sortie du point neutre, très utile en BT. Il y a 2 tensions disponibles : tension simple et tension composée.



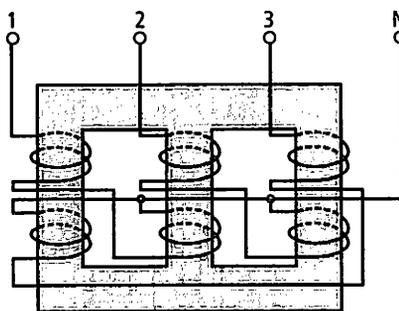
b) Couplage triangle

Il nécessite plus de spires par colonne que l'enroulement étoile ; pas de neutre sorti.



c) Couplage zigzag

Chaque enroulement comprend deux demi-bobines placées sur des noyaux différents ; la deuxième demi-bobine a ses sorties inversées. Les fém de chaque demi-bobine sont déphasées de 120° électriques. Avec le couplage zigzag, on obtient une meilleure répartition des tensions en cas de réseau déséquilibré côté BT.

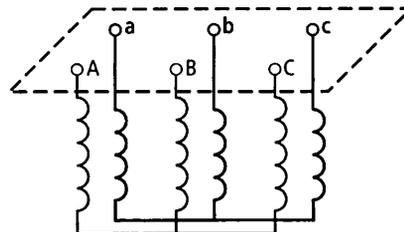


3. Présentation des enroulements

a) Représentation schématique

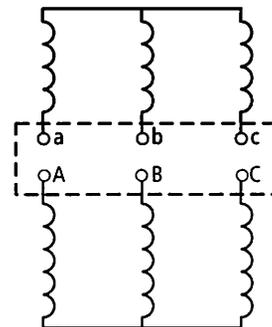
Les bobines primaires et secondaires, placées sur les mêmes noyaux sont repérées par leurs bornes de sortie situées sur le couvercle.

Côté HT : A, B, C (lettres majuscules) ;
Côté BT : a, b, c (lettres minuscules).



La représentation schématique des enroulements se fait de part et d'autre du couvercle.

HT vers le bas ;
BT vers le haut.



b) La désignation des couplages

Elle s'effectue par un groupe de 2 lettres et un nombre.

- 1^{re} lettre (majuscule) : Couplage côté HT
Y : étoile
D : triangle
Z : zigzag
- 2^e lettre (minuscule) : Couplage côté BT
y : étoile
d : triangle
z : zigzag

Le chiffre indique l'indice du couplage, c'est-à-dire l'angle de déphasage entre la tension primaire et la tension secondaire. Cet angle horaire correspond, pour 360°, aux 12 heures du cadran repérées de 0 à 11, chaque angle horaire étant un multiple de 30°.

Exemple : Dy 11

Couplage HT en triangle, basse tension en étoile
Décalage $11 \times 30 = 330^\circ$.

c) Schémas et déphasages des couplages

Il existe pour chaque indice horaire un couplage particulier des enroulements. Dans la pratique, les couplages les plus utilisés sont ceux d'indice 0, 5, 6, 11 (voir tableau page 32).



2 - Alimentation en énergie électrique

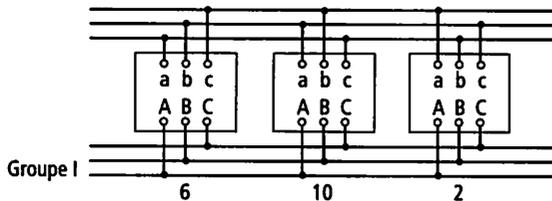
TABLEAUX DES PRINCIPAUX COUPLAGES

<p>Dd 0 0°</p>	<p>Yy 0 0°</p>	<p>Dy 5 150°</p>
<p>Yd 5 150°</p>	<p>Yz 5 150°</p>	<p>Dd 6 180°</p>
<p>Yy 6 180°</p>	<p>Dz 6 180°</p>	<p>Dz 10</p>
<p>Dy 11 330°</p>	<p>Yd 11 330°</p>	<p>Yy 11 330°</p>

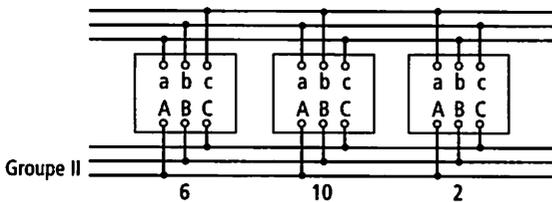
d) Marche en parallèle de transformateurs de même groupe

On peut coupler en parallèle des transformateurs d'indice horaire différent dans les 4 groupes de couplage, en respectant les branchements ci-après :

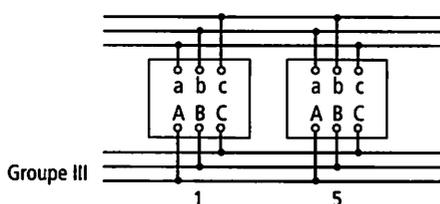
- Groupe I : indice horaire 0 - 4 - 8



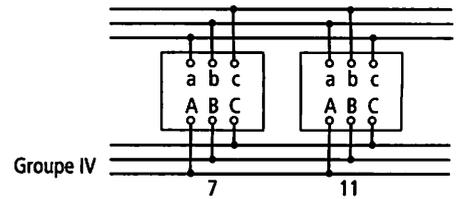
- Groupe II : indice horaire 6 - 10 - 2



- Groupe III : indice horaire 1 - 5



- Groupe IV : indice horaire 7 - 11



e) Marche en parallèle de transformateurs appartenant aux groupes III et IV

On peut coupler en parallèle des transformateurs appartenant aux groupes différents III et IV à condition de respecter les dispositions des branchements ci-dessous.

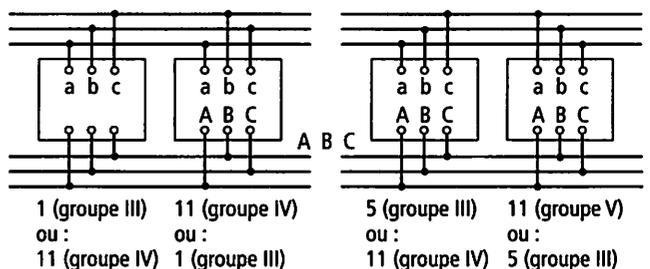
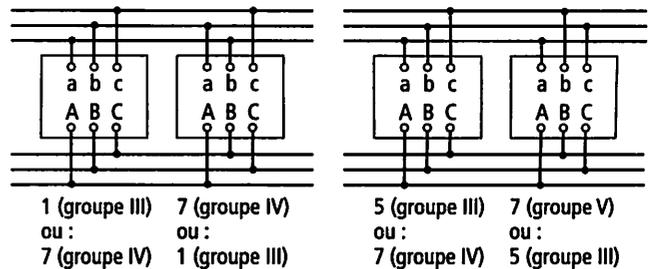


TABLEAU DES CARACTÉRISTIQUES DES TRANSFORMATEURS HT/BT (FRANCE-TRANSFO)

P ≤ 630 kVA

Puissance (kVA)	25	50	100	160	200 (2)	250	315 (2)	400	500 (2)	630	
Tension secondaire (V)	231 ou 400	231 ou 400	231 ou 400	231 ou 400	231 ou 400	231 ou 400	231 ou 400	231 400	231 400	231 400	
Pertes à vide (kW)	0,115	0,19	0,32	0,46	0,55	0,65	0,77	0,93 0,93	1,1 1,1	1,3 1,3	
Pertes cuivre à 75 °C (kW)	0,7	1,1	1,75	2,35	2,85	3,25	3,9	4,81 4,6	5,95 5,5	6,95 6,5	
Pertes actives totales (kW)	0,815	1,29	2,07	2,81	3,4	3,9	4,67	5,74 5,53	7,05 6,6	8,25 7,8	
Énergie à compenser à pleine charge (kvar)	1,5	3,1	6,1	9,6	11,9	14,7	18,3	22,8 22,9	28,5 28,7	35,5 35,6	
Tension de court-circuit à 75 °C (%)	4	4	4	4	4	4	4	4 4	4 4	4 4	
Chute de tension en %	cos φ = 1	2,84	2,26	1,81	1,54	1,49	1,37	1,31 1,28	1,22 1,26	1,17 1,18	1,11 1,11
	cos φ = 0,8	3,96	3,77	3,57	3,43	3,41	3,33	3,30 3,28	3,25 3,27	3,22 3,22	3,17 3,17
Rendement à 3/4 de charge en %	cos φ = 1	97,36	97,89	98,29	98,54	98,58	98,70	98,76 98,80	98,84 98,83	98,89 98,91	98,96 98,96
	cos φ = 0,8	96,72	97,37	97,87	98,18	98,24	98,37	98,46 98,51	98,56 98,54	98,62 98,64	98,71 98,71
Rendement à pleine charge en %	cos φ = 1	96,84	97,48	97,97	98,27	98,33	98,46	98,54 98,59	98,64 98,61	98,70 98,71	98,78 98,78
	cos φ = 0,8	96,08	96,88	97,48	97,85	97,92	98,09	98,18 98,24	98,30 98,27	98,38 98,39	98,48 98,48
Courant à vide en %	3,3	2,9	2,5	2,3	2,2	2,1	2	1,9 1,9	1,9 1,9	1,8 1,8	

P > 630 kVA (3)

Puissance (kVA)	800	1 000	1 250	1 600	2 000	2 500	3 150
Tension secondaire (V)	231 400	231 400	231 400	231 400	400 400	400 400	400
Pertes à vide (kW)	1,95	1,95	2,3	2,3	2,7	2,7	3,3 3,3
Pertes cuivre à 75 °C (kW)	12	10,2	13,9	12,1	17,5	15	21,3 18,1
Pertes actives totales (kW)	13,95	12,15	16,2	14,4	20,2	17,7	24,6 21,4
Puissance à compenser à pleine charge (kvar)	62,4	54,5	82,2	72,5	94	94,5	124,8 126,5
Tension de court-circuit à 75 °C (%)	5,5	4,5	6	5	5,5	5,5	6 6 7 7 8
Chute de tension en %	cos φ = 1	1,64	1,37	1,56	1,33	1,34	1,34 1,30
	cos φ = 0,8	4,43	3,65	4,69	3,93	4,24	4,24 4,52
Rendement à 3/4 de charge en %	cos φ = 1	98,57	98,73	98,67	98,80	98,67	98,83 98,74
	cos φ = 0,8	98,22	98,42	98,34	98,50	98,35	98,54 98,43
Rendement à pleine charge en %	cos φ = 1	98,29	98,50	98,41	98,59	98,40	98,60 98,48
	cos φ = 0,8	97,87	98,14	98,02	98,23	98,01	98,26 98,11
Courant à vide en %	2,5	2,5	2,4	2,4	2,2	2,2	2 2 1,9 1,7 1,7

Intensité en ligne/intensité de court-circuit BT

Puissance (kVA)	25	50	100	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000
Tension	Intensité en ligne (A)														
20 kV	0,72	1,44	2,88	4,62	5,77	7,21	9,09	11,55	14,43	18,19	23	28,8	36,1	46,2	57,7
15 kV	0,96	1,92	3,86	6,16	7,70	9,62	12,12	15,4	19,24	24,25	30,8	38,5	48,1	61,6	77
9,5 kV	1,07	2,14	4,28	6,85	8,55	10,7	13,5	17,1	21,4	27	34,3	42,8	53,5	68,5	85,5
10 kV	1,44	2,88	5,78	9,24	11,55	14,43	18,19	23,09	28,87	36,37	46,2	57,8	72,2	92,4	115,5
5,5 kV	2,62	5,25	10,5	16,8	21	26,24	33,06	42	52,5	66,1	84	105	131,2	168	210
5 kV	2,89	5,77	11,55	18,5	23,1	28,9	36,4	46,2	57,7	72,7	92,4	115,5	144,3	185	231
400 V	36,1	72,2	144,3	231	288,7	361	454,8	577,6	721,9	909,6	1 155	1 443	1 804	2 310	2 887
231 V	62,5	125	250	400	500	625	787	1 000	1 250	1 575	2 000	2 500	3 125	4 000	5 000
Tension	Intensité de court-circuit BT (kA)														
400 V	0,9	1,8	3,6	5,77	7,2	9,02	11,37	14,44	18,05	22,74	25,67	28,86	32,8	38,5	41,2
231 V	1,56	3,12	6,25	10	12,5	15,62	19,67	25	31,25	39,37	36,36	41,67	50,7	57,1	62,5

(1) Transformateurs à remplissage intégral de France-Transfo.
 (2) Puissances non préférentielles.
 (3) Les puissances supérieures à 800 kVA en 230 V et 1250 kVA en 400 V relèvent du comptage HT.

D'après Merlin Gérin.



2 - Alimentation en énergie électrique

Symbole	Légende	Symbole		Légende	Symbole		Légende
		Forme 1	Forme 2		Forme 1	Forme 2	
Interconnexion des enroulements		Transformateurs				Exemples de transformateurs à enroulements séparés	
	Enroulement diphasé			Transformateur à deux enroulements			Transformateur monophasé à 2 enroulements avec écran
	Enroulement tétraphasé avec neutre sorti			Transformateur à deux enroulements de polarité des tensions instantanées			Transformateur à prise médiane sur un enroulement
	Enroulement triphasé en triangle			Transformateur à trois enroulements			Transformateur monophasé à deux enroulements secondaires séparés
	Enroulement triphasé en étoile			Autotransformateur			Transformateur à couplage réglable
	Enroulement triphasé en étoile avec neutre sorti			Inductance			Transformateur triphasé, couplage étoile-triangle
	Enroulement triphasé en zigzag			Transformateur de courant. Transformateur d'impulsion			Transformateur triphasé à quatre prises, couplage étoile-étoile (non compris la prise principale)
Machines		Transformateurs de mesure					
	Enroulement de commutation ou de compensation			Transformateur de courant à deux enroulements secondaires, chacun sur un circuit magnétique			Transformateur triphasé à quatre prises, couplage étoile-étoile (non compris la prise principale)
	Enroulement série			Transformateur de courant sans primaire bobiné avec cinq passages du conducteur primaire			Transformateur triphasé à quatre prises, couplage étoile-étoile (non compris la prise principale)
	Enroulement d'excitation en dérivation ou séparé			Transformateur de courant à deux enroulements secondaires, chacun sur un circuit magnétique			Transformateur triphasé à quatre prises, couplage étoile-étoile (non compris la prise principale)
	Balai (sur bague ou sur collecteur à lames)			Transformateur de courant à un enroulement secondaire à trois bornes			Transformateur triphasé à prises multiples avec commutateur de prise pour manœuvre en charge
	Machine (symbole générale) L'étoile* doit être remplacé par un des symboles littéraux suivants : C commutatrice G génératrice GS alternateur synchrone M moteur MS moteur synchrone MG moteur générateur			Transformateur d'impulsion ou de courant à un enroulement et 3 conducteurs traversants			Transformateur triphasé couplage étoile-zigzag, neutre sorti au secondaire
	Moteur linéaire			Transformateur d'impulsion ou de courant avec deux enroulements sur le même noyau et 9 conducteurs			Autotransformateur triphasé, couplage étoile
	Moteur pas à pas	Piles et accumulateurs					
	Générateur à commande manuelle (magnéto d'appel)			Élément de pile ou d'accumulateur			Batterie de piles ou d'accumulateurs
Exemples de machines à courant continu				Autotransformateur triphasé, couplage étoile			Autotransformateur monophasé à réglage progressif de la tension
	Moteur à courant continu à deux conducteurs, à excitation série						
	Moteur à courant continu à deux conducteurs, à excitation en dérivation						
	Moteur à courant continu à deux conducteurs, à excitation composée, courte dérivation représenté avec bornes et balais						
	Convertisseur rotatif de courant continu en courant continu avec excitation commune par aimant permanent						
Exemples de machines à courant alternatif							
	Compensateur synchrone						
	Moteur à collecteur monophasé à répulsion						
	Alternateur synchrone à six bornes sorties						

1. Comptage HT ou BT

• Pour les postes de transformation dont la puissance installée est au plus égale à 1 000 kVA et qui ne comprennent qu'un seul transformateur, on peut effectuer un comptage côté basse tension.

• Pour les postes de transformation comportant deux ou plusieurs transformateurs, ou pour ceux dont la puissance est supérieure à 1 000 kVA, on doit effectuer un comptage en moyenne tension (20 kV).

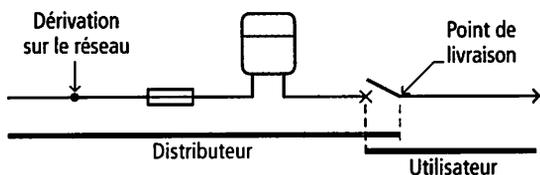
2. Comptage en BT (Basse Tension)

2.1. Point de livraison

Il constitue la frontière entre les ouvrages qui sont propriété du distributeur d'énergie (en général EDF) et les installations intérieures privées.

2.2. Alimentation BT

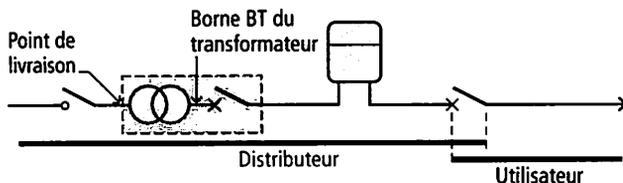
Le compteur se situe dans un coffret extérieur à l'habitation ; le disjoncteur est placé à l'intérieur du local de l'utilisateur.



2.3. Alimentation en HT (20 kV)

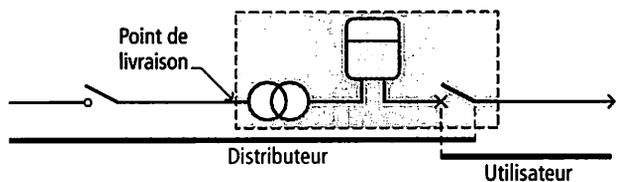
a) Poste sur poteau

Il est utilisé pour une puissance de 25, 50 ou 10 kVA. Le transformateur est précédé d'un interrupteur aérien situé côté HT sur le deuxième poteau en amont du transformateur.



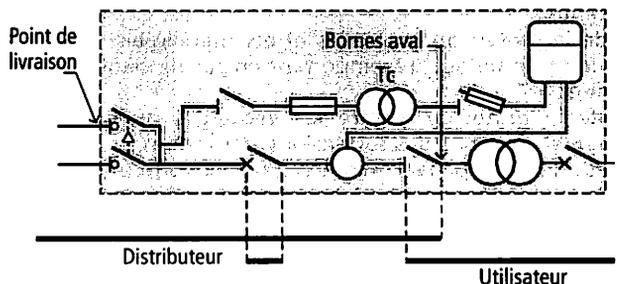
b) Poste simplifié

Il est surtout employé pour les postes de distribution de 160 à 250 kVA. Il s'agit souvent de postes préfabriqués posés sur une dalle et raccordés par câble.



c) Poste à comptage sur la HT (20 kV)

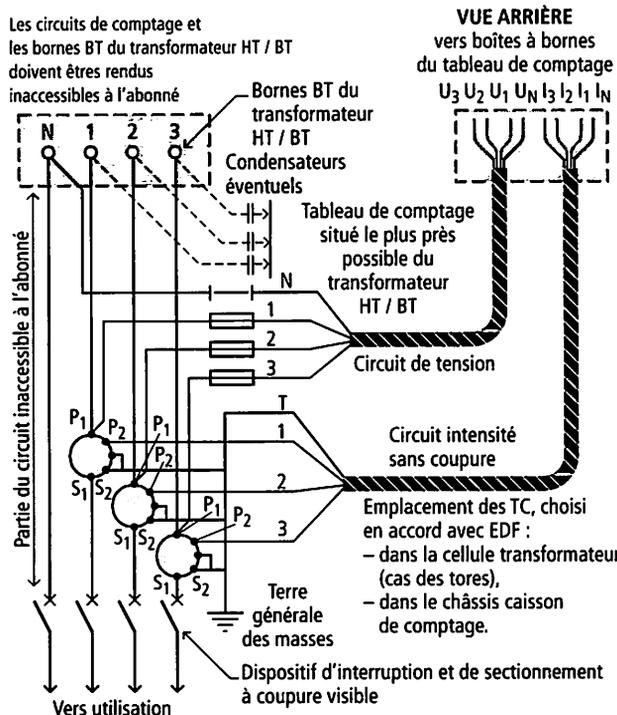
Le poste a une puissance installée supérieure à 1 000 kVA, il est souvent placé à l'intérieur de locaux spécialisés. Il comporte un circuit de comptage très complet avec transformateurs de potentiel et de courant.



3. Alimentation des circuits de comptage

3.1. Circuit intensité

Il est alimenté par des transformateurs de courant (Tc) dont le secondaire est au calibre 5A (isolement relevé en 20 kV).



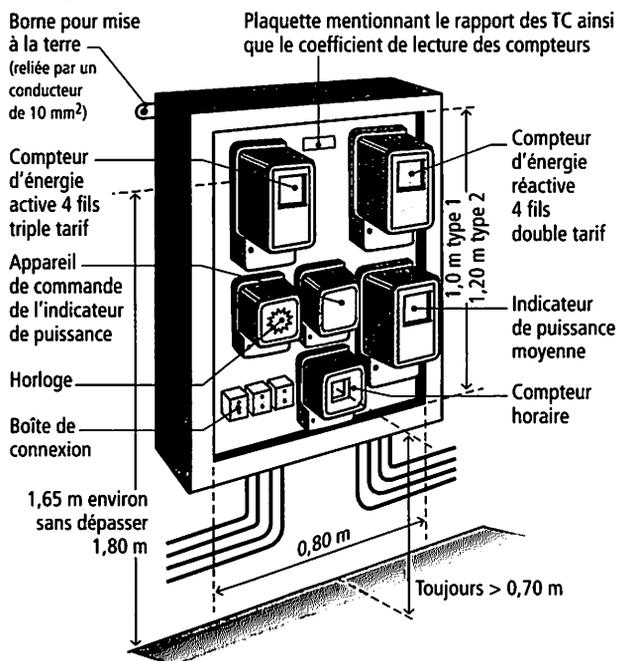
2 - Alimentation en énergie électrique

3.2. Circuit tension

- En BT, le circuit de comptage, sur les bornes BT.
- En HT, la tension 20 kV est transformée en basse tension calibre 100 V par des transformateurs de potentiel (Tp).

4. Tableau de comptage

Il est situé le plus près possible du transformateur et est facilement accessible à l'abonné et au distributeur. Ce type de tableau est le plus complet. La détermination du tableau de comptage est directement liée au type de tarification choisi.



1. Définitions

Selon les régimes de neutre en basse tension, TT, TN ou IT, on a été conduit à préciser la disposition des masses du poste de transformation par rapport à la terre. On utilise pour cela une troisième lettre qui s'ajoute aux 2 précédentes.

R : masses du poste reliées aux neutres et aux masses de l'installation ;

N : masses du poste reliées au neutre seulement ;

S : masses du poste, du neutre, de l'installation séparées ; chacune est raccordée à une prise de terre distincte.

a) Rappel de la signification des lettres

• Première lettre : liaison du neutre à la terre :

- directe : lettre T ;
- par impédance ou isolée : I.

• deuxième lettre : liaison des masses de l'installation :

- au neutre : N ;
- à une prise de terre distincte : T.

D'où les trois schémas ou régimes de neutre : TN, TT, IT

b) Résistance des prises de terre

Le tableau ci-dessous indique les valeurs maximales de la prise de terre permettant d'éviter le claquage du matériel BT. Ce claquage peut résulter des surtensions atmosphériques sur le réseau HT, ou des défauts d'isolement HT/masse dans un poste alimenté en aérien :

• Limite 1 : poste alimenté en aérosouterrain où le coup de foudre n'est pas à craindre.

• Limite 2 : poste alimenté en aérien avec gros risques de coup de foudre.

	TNR ou ITR	TTN	ITN	TTS ou ITS
Limite 1	30 Ω	4 Ω	3,5 Ω	5 Ω
Limite 2	10 Ω	0,2 Ω	0,2 Ω	0,3 Ω

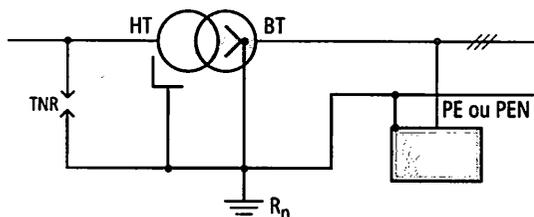
2. Différents schémas

a) Régime TNR (reliées)

Toutes les masses sont reliées entre elles et reliées à la terre.

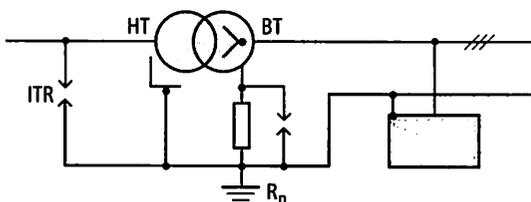
En cas de défaut, le courant de défaut s'écoule à la terre en R_n , provoquant une montée en potentiel de l'ensemble des masses.

Les risques sont nuls pour le matériel BT et les personnes, si l'équipotentialité est totale dans tout le poste et dans toute l'installation.



b) Régime ITR

Disposition analogue au schéma précédent. Dans les deux cas, une résistance de prise de terre de 10 Ω est recommandée pour limiter la montée du potentiel en cas de défaut.

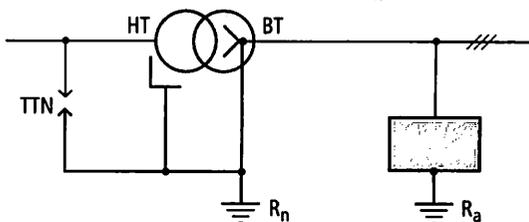


c) Régime TTN

La masse du poste est reliée à celle du neutre.

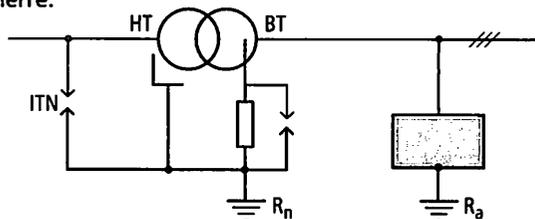
Le courant de défaut s'écoule par R_n , provoquant la montée en potentiel des masses du poste et du réseau BT par rapport aux masses des utilisations.

Il y a un risque de claquage (en retour) pour les matériels alimentés par le réseau BT et non reliés à R_n



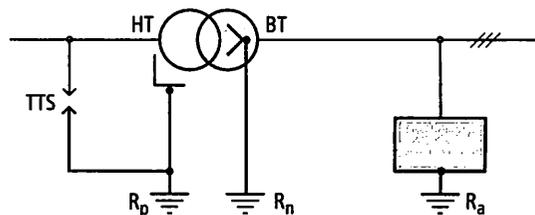
d) Régime ITN

Disposition analogue au schéma précédent. La valeur de 0,2 Ω est indicative mais très difficile à obtenir. Dans ce cas, la protection contre les coups de foudre est à assurer par un paratonnerre.



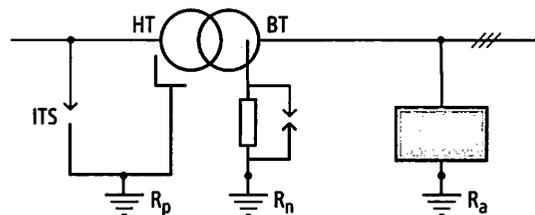
e) Régime TTS

Les prises de terre sont toutes séparées. Le courant de défaut s'écoule par R_p . En cas de défaut côté HT, les masses du poste montent en potentiel par rapport au réseau BT, relié à R_n . Il y a un risque de claquage, en retour, des matériels BT du poste.



f) Régime ITS

Disposition analogue au schéma précédent.



3. Critères de choix

Parmi les six schémas des liaisons à la terre des postes de transformation, on doit choisir celui qui convient en tenant compte :

- de la protection contre les effets thermiques : risque de courant de défaut très important en cas de claquage d'isolant en HT ;
- de la protection contre les décharges atmosphériques (foudre) : ce sont des surtensions transitoires, souvent limitées par des impédances insérées entre neutre et terre ;
- de la protection contre les surtensions à fréquences industrielles : amorçage entre haute tension et masse, c'est ce qui est lié à la valeur de la résistance de terre maximale à ne pas dépasser.

L'amélioration du facteur de puissance ($\cos \varphi$) dans une installation permet :

- de diminuer les pertes dans les installations ;
- d'éviter la facturation par EDF de l'énergie réactive.

La consommation d'énergie réactive conduisant à surdimensionner les sources d'énergie, la solution consiste à brancher des condensateurs le plus près possible des appareils responsables du mauvais $\cos \varphi$ (moteur, machine à souder, etc.).

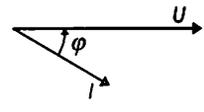
1. Rappel d'électrotechnique

a) Puissances

- **Puissance active (ou wattée) :** c'est la puissance restituée sous forme de travail mécanique ou de chaleur ; symbole : P , s'exprime en watts (W).
- **Puissance réactive (ou déwattée) :** c'est la puissance électrique nécessaire pour générer des champs magnétiques (énergie magnétisante) ; symbole : Q ; s'exprime en volt-ampères réactifs (var).
- **Puissance apparente :** symbole : S ; s'exprime en volt-ampères (VA).

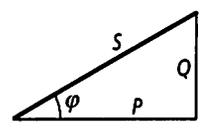
b) Facteur de puissance

Le facteur de puissance est l'écart angulaire entre les vecteurs représentant la tension et l'intensité ; on le désigne par le cosinus de l'angle : symbole : $\cos \varphi$. $\cos \varphi$ est compris entre 0 et 1.

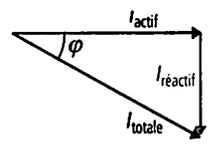


c) Relations électrotechniques

$\tan \varphi = \frac{Q}{P}$	$\cos \varphi = \frac{P}{S}$	$\sin \varphi = \frac{Q}{S}$
$\tan \varphi = \sqrt{\frac{1}{\cos^2 \varphi} - 1}$	$\sin \varphi = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi}$	$\cos \varphi = \sqrt{\frac{1}{1 + \tan^2 \varphi}}$



Triangle des puissances



Triangle des courants

I_a = courant transformé en puissance mécanique ou en chaleur ;

I_r = courant pour l'excitation magnétique ;

I_c = courant dans les conducteurs.

$$S^2 = P^2 + Q^2$$

$$P = S \cos \varphi$$

$$Q = S \sin \varphi = P \tan \varphi$$

d) Exemple

Soit un moteur triphasé alimenté en 400 V 50 Hz dont le courant nominal est de : 15, 21 A.

Calcul des puissances pour $\cos \varphi = 0,5$ et pour $\cos \varphi = 0,9$:

$\cos \varphi$	$\sin \varphi$	$S = UI\sqrt{3}$	$P = \sqrt{3} UI \cos \varphi$	$Q = \sqrt{3} UI \sin \varphi$
0,5	0,86	10 kVA	5 kW	8,6 kvar
0,9	0,43	10 kVA	9 kW	4,3 kvar

Lorsque le $\cos \varphi$ passe de 0,5 à 0,9, la puissance réactive absorbée passe de 8,6 kvar à 4,3 kvar ; pour un même courant absorbé par le moteur, la puissance active passe de 5 kW à 9 kW.

e) Quelques valeurs de $\cos \varphi$

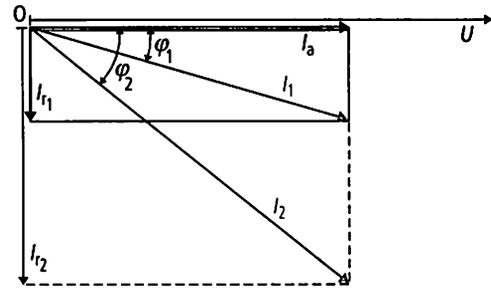
- Four à induction : 0,85.
- Four à arc : 0,80.
- Soudure à l'arc : 0,50.
- Lampe à incandescence : 1.
- Tube fluorescent non compensé : 0,55.
- Radiateur électrique : 1.
- Moteur asynchrone triphasé :

Charge	0 %	25 %	50 %	75 %	100 %
$\cos \varphi$	0,17	0,55	0,73	0,80	0,85

2. Inconvénients d'un mauvais $\cos \varphi$

a) Intensité en ligne trop élevée

Pour une même intensité active utilisée par un récepteur, le courant en ligne est supérieur avec un mauvais $\cos \varphi$.



Exemple :

- Pour transporter 20 kW avec $\cos \varphi = 1$:

$$\text{Intensité en ligne : } I_1 = \frac{P}{\sqrt{3} U \cos \varphi} = \frac{20\,000}{400 \sqrt{3} \times 1} = 28,86 \text{ A}$$

- Pour transporter 20 kW avec $\cos \varphi = 0,5$:

$$\text{Intensité en ligne : } I_2 = \frac{P}{\sqrt{3} U \cos \varphi} = \frac{20\,000}{400 \sqrt{3} \times 0,5} = 57,73 \text{ A}$$

Pour une même puissance active utilisée par un récepteur, le courant est d'autant plus élevé que le $\cos \varphi$ est faible, d'où des pertes en ligne plus importantes.

b) Facturation de l'énergie réactive

Pour les abonnés relevant du tarif jaune ou du tarif vert, lorsque l'énergie réactive dépasse 40 % de l'énergie active consommée, le distributeur facture la surconsommation d'énergie réactive.

Ce seuil correspond à $\tan \varphi = 0,4$ soit un $\cos \varphi = 0,93$.

$$\tan \varphi > 0,4 \text{ ou } \cos \varphi < 0,93 = \text{PÉNALITÉS}$$

c) Diminution de la puissance disponible

Un transformateur de 200 kVA avec $\cos \varphi = 0,5$ délivre une puissance active de 100 kW. Si le $\cos \varphi$ de l'installation est de 0,93, il délivre : $200 \times 0,93 = 186 \text{ kW}$.

On dispose alors d'une puissance active de 53 % plus élevée.

2 - Alimentation en énergie électrique

3. Calcul de la puissance réactive

Un bilan de la puissance réactive consommée par une installation est nécessaire pour déterminer la puissance de la batterie de condensateurs à installer.

Les calculs peuvent être faits à partir de différentes données.

3.1. Calcul à partir des factures EDF

Les factures EDF donnent pour les tarifs vert et jaune les valeurs de tangente phi ($\tan \varphi$) et de la puissance active. Sachant que la puissance réactive est liée à une valeur de $\tan \varphi = 0,4$ au maximum, on calcule la puissance réactive pour la compensation par la relation :

$$Q_c = P (\tan \varphi - 0,4)$$

Q_c : puissance réactive (var)
 P : puissance consommée (W)
 $\tan \varphi$: valeur donnée par EDF
 0,4 : valeur à ne pas dépasser pour $\tan \varphi$, fixée par EDF

Exemple de calcul :

On a relevé sur les factures mensuelles pour les six derniers mois d'exploitation d'une usine, une puissance active moyenne de 400 kW avec une tangente φ de 0,8, d'où une batterie de : $Q_c = 400 (0,8 - 0,4) = 160$ kvar.

3.2. Calcul à partir des relevés des compteurs

On peut utiliser les indications données par les compteurs d'énergie active et réactive pendant une période d'un jour, de 5 jours, d'un mois par exemple.

La consommation d'énergie est donnée en kWh ou en kvar.

Exemple :

Pour une période de 1 mois (environ 150 h) on a relevé les consommations suivantes :

- Énergie active : 60 000 kWh.
- Énergie réactive : 49 000 kvar.

Calcul de $\tan \varphi$ moyenne :

$$\tan \varphi = \frac{49\,000}{60\,000} = 0,82$$

Calcul de puissance moyenne :

$$P_{(kW)} = \frac{W \text{ (kWh)}}{t \text{ (h)}} = \frac{60\,000}{150} = 400 \text{ kW}$$

Puissance de la batterie de condensateurs nécessaire pour obtenir $\tan \varphi = 0,4$: $Q_c = 400 (0,82 - 0,4) = 168$ kvar.

On choisira une batterie de 170 kvar.

3.3. Calcul à partir des caractéristiques des machines

Dans le cas d'installations nouvelles, si l'on ne dispose pas de relevé EDF ou de moyen de mesure, on établit un tableau-bilan des puissances :

Type de récepteur	Puissance (kW)	Cos φ moyen	$\tan \varphi$	Puissance réactive kvar compensation
Incandescence	2	1	0	
Fluorescence	3	0,5	1,73	4
Chauffage	10	1	0	
Four à arc	5	0,4	2,34	9,7
Moteurs	30	0,6	1,33	27,9
Totaux	50 kW	-	-	41,5 kVA

La puissance réactive à installer est calculée par la formule :

$$Q_c = P (\tan \varphi - 0,4)$$

Une batterie de condensateurs de 45 kvar conviendra.

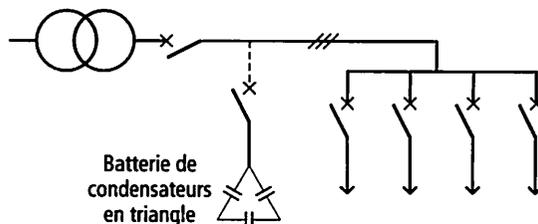
4. Installation des condensateurs

L'installation des condensateurs nécessite certaines précautions. En effet, il existe des risques de surtension.

4.1. Branchement sur l'alimentation BT

Avec ce type de branchement :

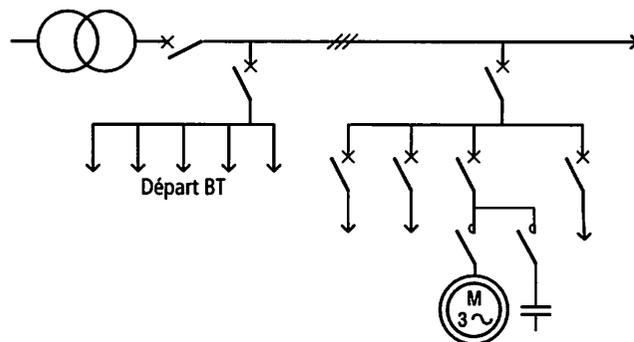
- les condensateurs sont en service durant tout le fonctionnement de l'usine d'où un amortissement rapide ;
- il y a risque de surtension lorsque le transformateur est à vide.



4.2. Branchement aux bornes du récepteur

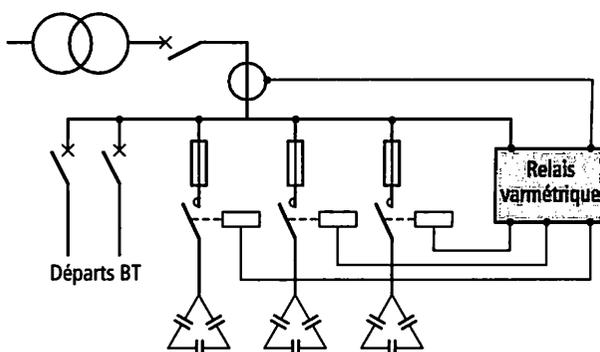
La batterie de condensateurs est raccordée directement à l'appareil ayant un mauvais cos φ , par exemple à un moteur asynchrone triphasé.

- Dans le cas d'éclairage fluorescent, elle est incorporée dans l'appareil.
- Une compensation trop importante aux bornes d'un moteur asynchrone peut introduire une auto-excitation, surtout si le moteur est entraîné par la charge. Dans ce cas, une surtension importante peut se produire à ses bornes ($2 \text{ à } 3 U_n$).



4.3. Branchement par poste de répartition

Cette disposition est un compromis entre les deux solutions précédentes ; elle permet, en particulier, de tenir compte du facteur de simultanéité des récepteurs, d'où une puissance installée mieux utilisée, et elle limite les intensités en ligne au niveau de la répartition de l'énergie.



Bien souvent, cette installation s'effectue avec une compensation automatique liée aux variations de charge.

Les batteries de condensateurs sont enclenchées par des contacteurs commandés automatiquement par un relais varmétrique en fonction de la charge du cos φ désiré.

La compensation automatique permet l'adaptation aux variations de charge. Elle évite le renvoi d'énergie réactive sur le réseau et les surtensions dangereuses.

5. Caractéristiques d'une batterie de condensateurs

Les condensateurs industriels pour la compensation d'énergie réactive sont parfois isolés avec du papier, le plus souvent avec un film plastique. Ils sont prévus pour les tensions de 230 V ou 400 V.

a) Calcul de la capacité

En alternatif, la relation qui lie la puissance à la capacité est :

$$U = \frac{1}{C\omega} I \quad \text{ou encore :} \quad Q = C\omega U^2$$

avec : $f = \frac{\omega}{2\pi}$ ou $\omega = 2\pi f$.

Exemple :

Calcul de la capacité d'un condensateur fournissant 60 kVar en 400 V :

$$C = \frac{Q}{2\pi f \times U^2} = \frac{60\,000}{2 \times 3,14 \times 50 \times 400^2} = 1,194 \times 10^{-3} \text{ F}$$

soit environ 1 200 microfarads (µF).

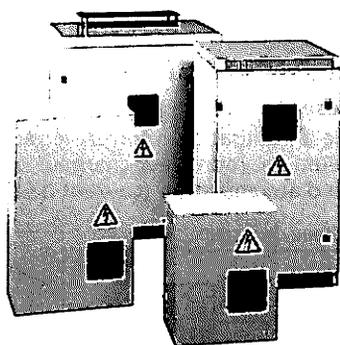
Exemple de gamme de condensateurs :

Puissance réactive de la batterie en 400 V : 10 - 20 - 25 - 30 - 45 - 60 - 75 - 90 - 110 - 135 - 150 - 180 - 200 - 270 - 300 - 360 kvar.

En général, pour des raisons de prix, les condensateurs sont montés en triangle. Cela permet d'avoir, pour une même puissance, une capacité 3 fois plus faible ; par contre, la tension d'isolement est beaucoup plus élevée.

b) Précautions

- Des résistances de décharge doivent être prévues aux bornes des condensateurs ;
- On doit couper les condensateurs aux bornes d'un transformateur aux heures de faible charge ;
- L'appareillage de commande doit être surdimensionné ; il faut prévoir des inductances de choc en série (courant à la mise sous tension analogue à un court-circuit).



Batterie de condensateurs de 3 éléments équipée d'un relais pour la compensation automatique du facteur de puissance (doc. Schneider Electric).

6. Compensation d'énergie réactive sur réseau pollué

6.1. Présentation du problème

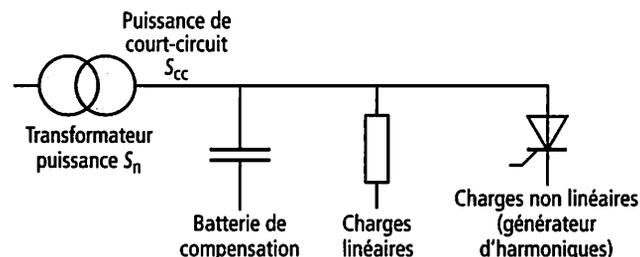
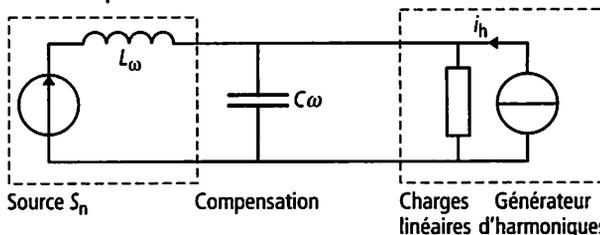


Schéma équivalent :



On appelle pollution d'un réseau les courants non sinusoïdaux qu'il véhicule. Ces courants proviennent principalement des variateurs de vitesse et des onduleurs.

Deux problèmes peuvent se poser :

- La batterie de condensateur est traversée par le courant de compensation à 50 Hz I_{c50} plus une partie des courants harmoniques I_h . Les courants harmoniques ont des fréquences multiples de 50 Hz et souvent de rang impair (5 f, 7 f, 11 f, ...). Plus la fréquence est élevée, plus l'impédance du condensateur est faible, ce qui offre un parcours privilégié pour les harmoniques.

La surcharge de courant provoque un échauffement et un vieillissement prématuré du condensateur.

- L'impédance du réseau et la batterie de condensateur forment un circuit LC résonnant pour certains rangs d'harmoniques. Ceci peut engendrer des distorsions de tension de la source et des surtensions aux bornes des condensateurs. La fréquence de résonance peut se calculer par la relation :

$$f_0 = f \sqrt{\frac{S_{cc}}{Q}}$$

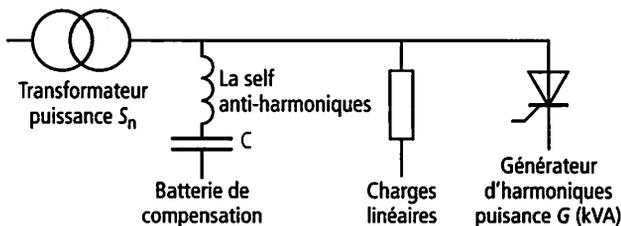
f : fréquence du réseau (50 Hz)
 S_{cc} : puissance de court-circuit de la source
 Q : puissance de la batterie de condensateurs

Si la fréquence f_0 est très éloignée de celles des harmoniques, l'effet de la résonance sera négligeable.

6.2. Remèdes proposés

On fait la somme de tous les générateurs d'harmoniques de l'installation, G en kVA.

- Si $G \leq 0,15 \cdot S_n$ (S_n puissance du transformateur en kVA), il n'y a pas de modifications à faire sur le bloc de compensation car les condensateurs sont conçus pour absorber un courant efficace égal à 1,3 fois leur courant nominal.
- Si $0,15 \cdot S_n < G \leq 0,25 \cdot S_n$, il faut majorer la tension des condensateurs de 10 % (440 V au lieu de 400 V). Ceci permet d'augmenter le seuil de 1,3 I_{cn} car $I_{cn} = C \cdot \omega \cdot U_n$.
- Si $G > 0,25 \cdot S_n$, il faut majorer la tension nominale des condensateurs de 10 % et rajouter des selfs anti-harmoniques.



La self anti-harmoniques permet de limiter la circulation des harmoniques dans la batterie de condensateurs.

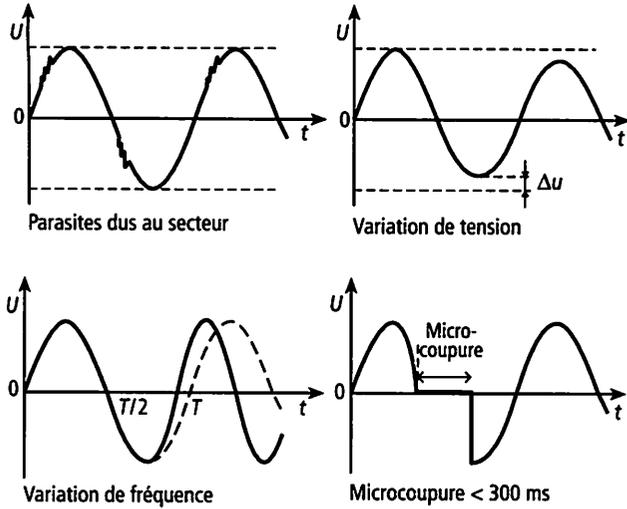
Le circuit $L_a C$ est généralement accordé sur une fréquence f_a de 190, 210 ou 225 Hz.

$$f_a = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_a \cdot C}}$$

2 - Alimentation en énergie électrique

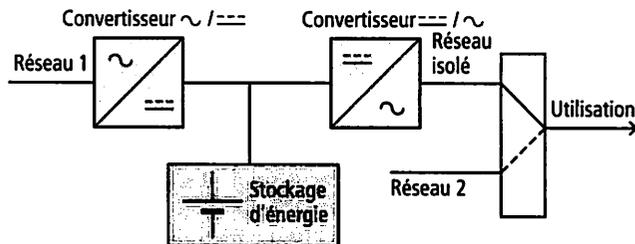
1. Les perturbations du réseau

Le but d'une alimentation sans coupure est de pallier les perturbations qui peuvent survenir, séparément ou simultanément, dans tout réseau de distribution d'énergie.



Elles peuvent prendre la forme de fluctuations de tension, ou de fréquence, ou bien de parasites, ou encore de microcoupures. Au-delà de 300 ms, une microcoupure devient une coupure de réseau. Il faut prévoir une réserve d'énergie ou faire appel à une autre source pour maintenir l'alimentation des récepteurs.

2. Principe d'une alimentation sans coupure

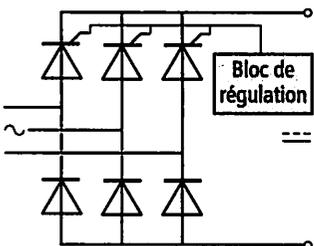


L'alimentation sans coupure isole totalement le réseau d'alimentation de l'utilisation ; elle puise en temps normal son énergie sur le réseau 1 et en stocke une partie. Un convertisseur continu-alternatif crée un nouveau réseau exempt de perturbations. Un contacteur statique permet de passer au réseau 2 sans coupure si le stockage d'énergie devient insuffisant.

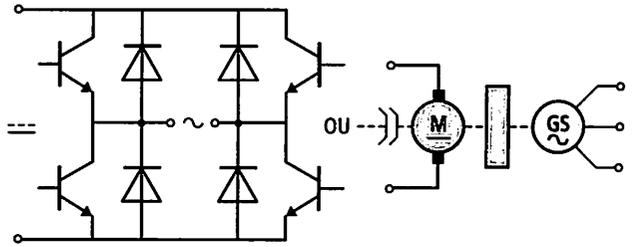
2.1. Constitution d'une alimentation sans coupure

a) Convertisseur alternatif-continu

C'est un redresseur commandé qui a pour rôle l'alimentation du convertisseur continu-alternatif et la charge régulée des batteries.

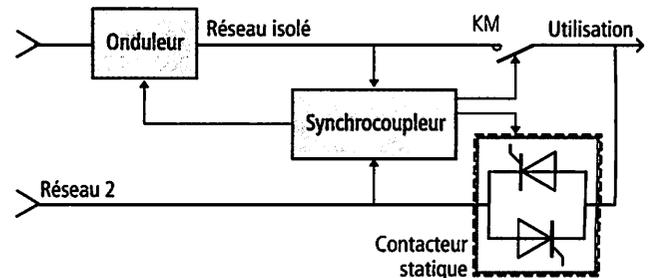


b) Convertisseur continu-alternatif



Selon la puissance, il est constitué d'un onduleur monophasé ou triphasé ou d'un ensemble groupe tournant machine à courant continu-volant d'inertie-alternateur. La première solution est plus compacte et demande peu de maintenance mais la tension de sortie n'est pas purement sinusoïdale. La deuxième solution privilégie la qualité de la tension de sortie et permet la reprise de la ligne d'arbre par un moteur Diesel via un embrayage en cas de coupure prolongée.

c) Contacteur statique à permutation synchrone

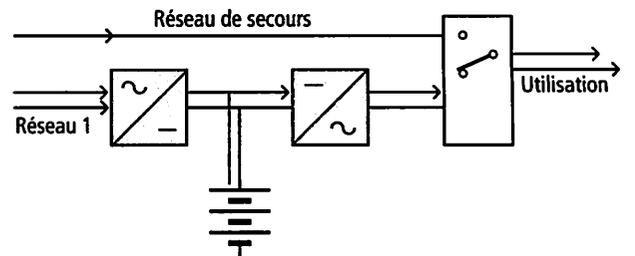


En fonctionnement normal, le contacteur KM est fermé et le contacteur statique ouvert. Pour passer du réseau isolé au réseau 2, le synchrocoupleur donne l'ordre de fermeture du contacteur statique lorsque les tensions sont identiques en amplitude et en phase. Pendant un instant, les 2 sources sont en parallèle, le contacteur KM peut ensuite s'ouvrir. La permutation est synchrone, c'est-à-dire sans aucune coupure.

2.2. Séquences de fonctionnement

a) Réseau présent

Il fournit l'énergie à l'utilisation à travers le redresseur-chargeur et l'onduleur. Le redresseur-chargeur maintient en charge la batterie d'accumulateur (courant de floating).



b) Réseau coupé

L'alimentation de l'utilisation est transférée instantanément et sans aucune perturbation, de la batterie vers l'onduleur, dans les limites de son autonomie.

c) Retour du réseau

Il alimente à nouveau le circuit d'utilisation par le redresseur et l'onduleur, et recharge la batterie.

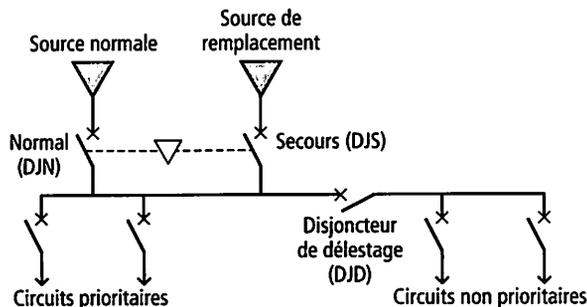
d) Défaut d'alimentation prolongé

Ce type d'alimentation sans coupure peut être muni d'un contacteur statique normal-secours qui permet de passer sans coupure de la source à une alimentation de secours.

La source de secours peut aussi être utilisée en cas de délestage du réseau principal ; elle est généralement constituée par un groupe tournant moteur Diesel alternateur.

Un grand nombre d'industries ne peuvent supporter une coupure d'alimentation électrique prolongée, cette dernière pouvant engendrer des réactions graves dans le processus en cours. Un inverseur normal-secours permet de réalimenter tout ou partie de l'installation par une deuxième source.

1. Principe de fonctionnement



En fonctionnement normal, le disjoncteur secours DJS est ouvert et tous les autres disjoncteurs sont fermés. En cas d'absence de la source normale, les disjoncteurs DJN et DJD s'ouvrent et le disjoncteur DJS se ferme, ce qui permet l'alimentation des circuits prioritaires par la source de remplacement. Cette permutation peut se faire soit manuellement, soit automatiquement. La source de remplacement peut être une deuxième ligne d'alimentation indépendante ou un groupe électrogène.

2. Les différents types de permutation

Selon les exigences des circuits alimentés, on peut employer 3 types de permutation, la permutation à temps mort, pseudo-synchrone ou synchrone.

2.1. La permutation à temps mort

C'est la plus employée. Le temps de passage d'une source à l'autre est compris entre 0,5 et 30 secondes.

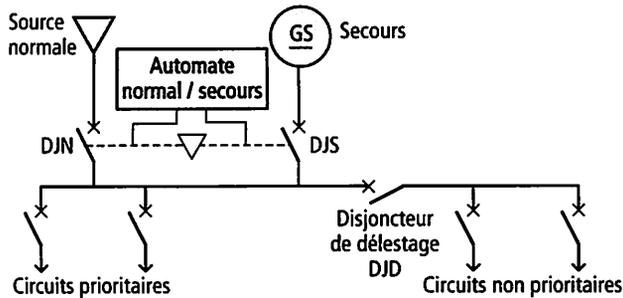
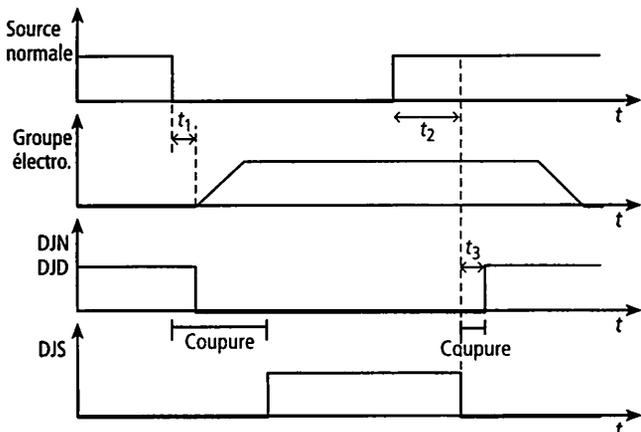


Diagramme de fonctionnement :

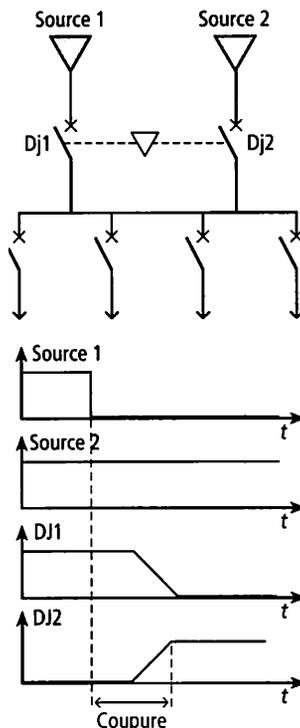


- Lorsque la source normale disparaît, une temporisation t_1 , de 0,1 à 30 s est lancée pour s'assurer que ce n'est pas un défaut fugitif. Le groupe électrogène démarre et les disjoncteurs DJN et DJD s'ouvrent. Une fois la tension du groupe stabilisée, l'ordre de fermeture de DJS est donné. La puissance du groupe étant souvent réduite, il est nécessaire de prévoir dans l'automatisme un démarrage échelonné des machines.

- Après retour de la source normale, une temporisation t_2 de 0,1 à 180 s est lancée. Le disjoncteur DJS s'ouvre et les disjoncteurs DJN et DJD se ferment après un temps t_3 de quelques secondes.

2.2. La permutation pseudo-synchrone

La durée de coupure est de l'ordre de 150 ms, ce qui est trop court pour que les contacteurs s'ouvrent et que les moteurs décélèrent. C'est une reprise à la volée de l'installation.



Dans ce type de permutation, les deux sources doivent être présentes en même temps (alimentation par 2 lignes différentes ou groupe à temps 0).

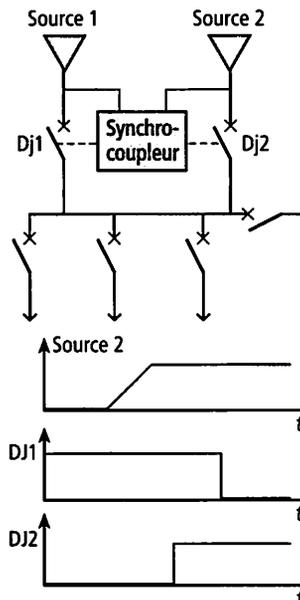
Lorsque la source 1 disparaît, les moteurs asynchrones conservent une tension à leurs bornes pendant environ 0,5 s.

Il faut attendre que la source 2 soit en phase avec cette tension pour coupler sinon la pointe de courant peut atteindre 15 à 20 I_n , et des tensions induites importantes apparaissent pouvant entraîner la destruction des bobinages des moteurs.

Les ensembles électromécaniques sont peu perturbés par ce type de permutation. Par contre, les systèmes informatiques sont réinitialisés.

2.3. La permutation synchrone

Ce type de permutation est utilisé pour la maintenance d'une source, le temps de coupure est nul.

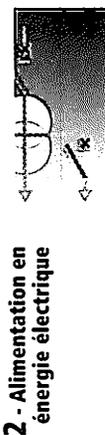


En fonctionnement normal, la source 1 alimente l'installation. Pour effectuer une maintenance sur cette source on lui substitue une source S_2 avant de la couper.

Si cette deuxième source est un groupe électrogène, un synchronocoupleur assure le couplage lorsque les tensions sont identiques en amplitude et en phase.

Pendant un instant les deux sources sont en parallèle. Le disjoncteur DJ1 est ensuite ouvert.

Ce type de permutation est toujours fait à la demande de l'utilisateur et non en cas de coupure d'alimentation.



2 - Alimentation en énergie électrique

L'électricité est devenue une source d'énergie indispensable. Les besoins croissants font que des recherches sont menées dans tous les domaines pour pouvoir produire et stocker l'énergie électrique à moindre coût. Un effort particulier est fait pour le développement des énergies renouvelables telles que l'hydraulique, l'éolien ou le solaire.

1. Les énergies renouvelables

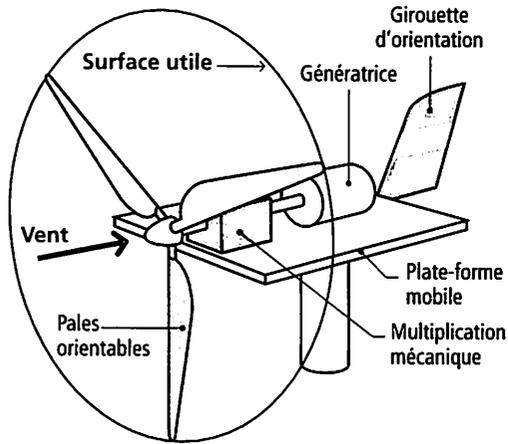
1.1. L'énergie hydraulique

C'est une des plus anciennes formes d'énergie exploitées par l'Homme. En France, ce potentiel est déjà bien utilisé dans les centrales hydrauliques ou barrages (voir p. 7 à 9).

1.2. L'énergie éolienne

C'est une énergie connue depuis longtemps qui est en train de se développer avec la construction d'éoliennes de plus en plus puissantes.

• Synoptique d'une éolienne :



Une éolienne ne peut fonctionner que si la vitesse v du vent est telle que $v > 5$ m/s. Les pales sont orientables pour réguler la puissance lorsque le vent est trop fort. Cette puissance pour une surface donnée est proportionnelle au cube de la vitesse du vent :

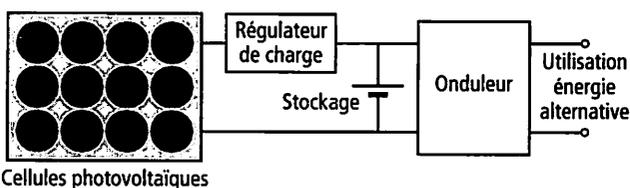
$$P_u = k \cdot v^3$$

Les pales actuelles peuvent atteindre 20 m de long, soit une surface utile d'environ 1 200 m². L'énergie éolienne est estimée à 500 kW h/m² en plaine et jusqu'à 5 000 kW h/m² sur les côtes. L'objectif est d'atteindre 500 MW installés en 2005. Son prix reste encore élevé mais en diminution constante.

1.3. L'énergie solaire

C'est l'énergie la plus abondante mais difficilement transformable en électricité. Selon les régions, l'énergie solaire rayonnée peut atteindre 2 000 kW h/an par m², soit une puissance moyenne de 150 à 250 W/m² sur une année. Cette énergie peut être directement transformée en électricité par des cellules photovoltaïques avec un rendement n'excédant pas 10 %. Elle reste l'énergie la plus chère en prix de revient à cause du coût des cellules, mais reste rentable pour alimenter des sites isolés où il n'est pas possible d'amener une autre source d'énergie.

• Installation alimentée par cellules photovoltaïques :



1.4. Tableau comparatif des prix de revient des principales sources d'énergie

	Nucléaire	Hydraulique	Pétrole	Gaz	Éolien	Photovoltaïque	Marées	Vagues
Prix de revient cts/kWh	12	10	18	12	25	60 à 200	40	50

2. Stockage électrochimique de l'énergie

2.1. Les accumulateurs au plomb

La différence de potentiel aux bornes d'un élément est de 2 V. Pour obtenir des tensions supérieures, on place plusieurs éléments en série (6 pour une batterie de 12 V).

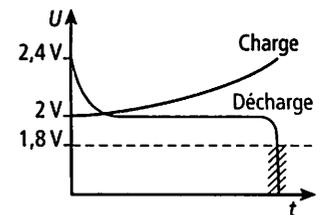
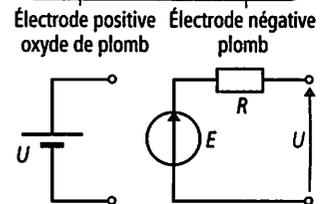
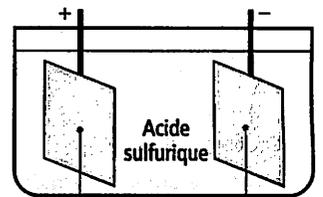
• Schéma équivalent :

La résistance interne d'un élément est très faible (inférieure au centième d'ohm). Un accumulateur est un générateur de tension presque parfait, mais un court-circuit à ses bornes provoque un courant important qui peut entraîner sa destruction.

• Cycle de charge-décharge :

Pendant la charge, la tension aux bornes d'un élément peut atteindre 2,4 V. Cette tension se stabilise très vite à 2V et reste constante pendant la décharge. Il ne faut pas décharger l'accumulateur en dessous de 1,8 V, sinon les électrodes se recouvrent de sulfate de plomb et la recharge devient impossible.

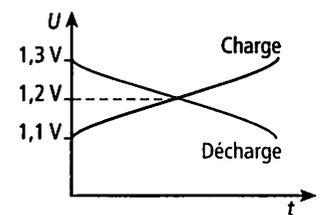
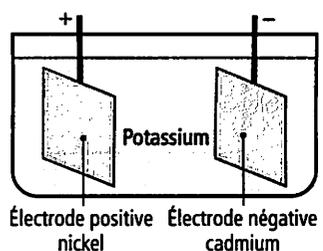
L'énergie que peut stocker un accumulateur au plomb est d'environ 25 Wh/kg. Il nécessite un entretien régulier.



2.2. Les accumulateurs alcalins nickel-cadmium (Ni-Cd)

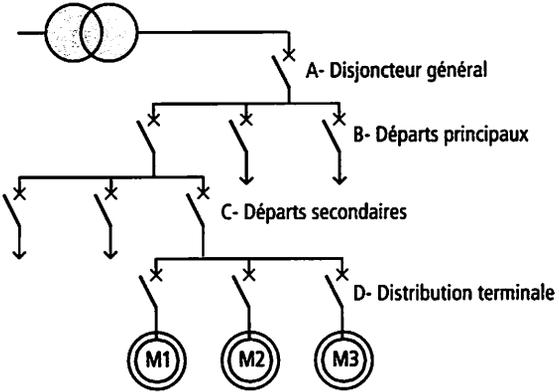
Ces accumulateurs ne demandent pas d'entretien. Il n'y a pas de perte d'électrolyte, ce qui permet la réalisation de batteries étanches. La tension moyenne aux bornes d'un élément est de 1,2 V et diminue progressivement au cours de la décharge. Un accumulateur Ni-Cd supporte une décharge complète pendant longtemps sans modification de ses caractéristiques.

L'énergie stockée est de l'ordre de 35 Wh/kg, ce qui fait que ces batteries sont très adaptées aux véhicules électriques malgré leur coût encore élevé.



1. Distribution radiale

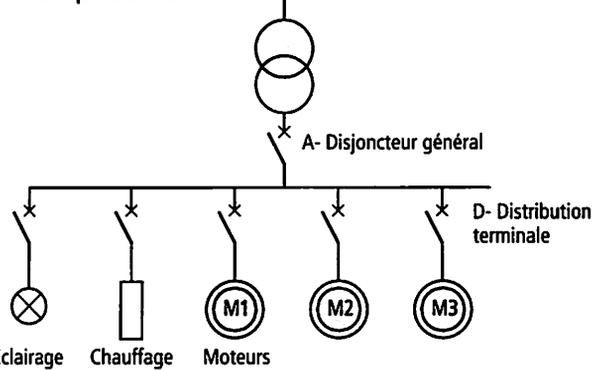
C'est le mode de distribution le plus employé dans les installations industrielles.



- **Avantages**
Seul le circuit en défaut est mis hors service, sa localisation est facile.
Il est possible d'effectuer les opérations d'entretien sans coupure générale.
- **Inconvénient**
Un défaut au niveau d'un départ principal affecte tous les départs aux niveaux secondaires et de la distribution terminale issus du départ principal.

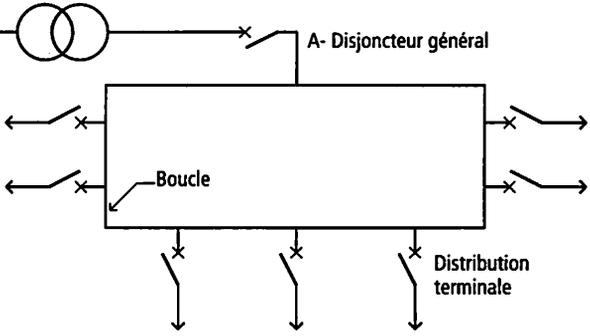
2. Distribution en peigne

Elle est surtout utilisée pour les installations peu étendues et de faible puissance.



- **Avantage**
Dans le cas d'un défaut autre que celui du disjoncteur général, seul le circuit en défaut est coupé.
- **Inconvénient**
On se trouve devant un grand nombre de circuits séparés, donc de grandes longueurs de lignes et une surabondance de cuivre.

3. Distribution en boucle



La distribution en boucle n'est pratiquement pas utilisée en France, mais elle est très fréquente en Angleterre, par exemple, pour les dessertes de prises de courant.

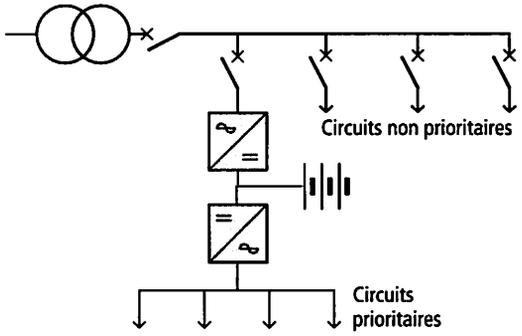
- **Avantages**
Réduction des pertes par résistance ;
Un seul dispositif de protection par boucle.
- **Inconvénients**
Connexions spéciales aux dérivations (ne pas couper la boucle) ;
Répartition difficile des intensités ;
Difficultés de sélectivité et de protection.

4. Distribution avec alimentation de remplacement

Certaines parties d'une installation doivent être alimentées en énergie même lorsqu'il y a coupure du réseau de distribution. C'est le cas des salles d'opérations, d'ordinateurs, des fours industriels, etc. Plusieurs solutions peuvent être envisagées.

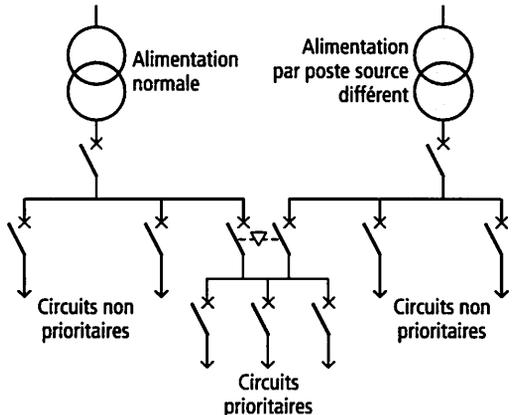
4.1. Alimentation sans coupure

Elle se fait au moyen d'onduleurs et de batteries de secours.

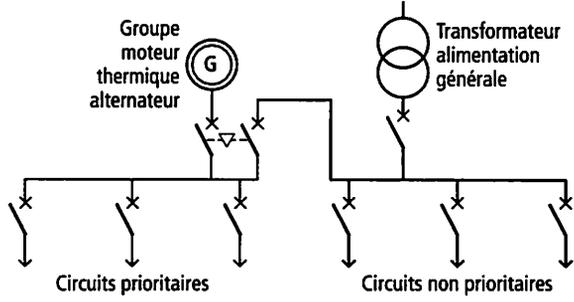


4.2. Alimentation double

Deux postes sources EDF différents alimentent l'installation.



4.3. Alimentation de remplacement par groupe électrogène

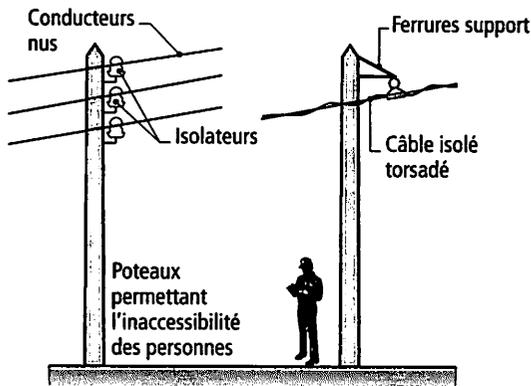


2 - Alimentation en énergie électrique



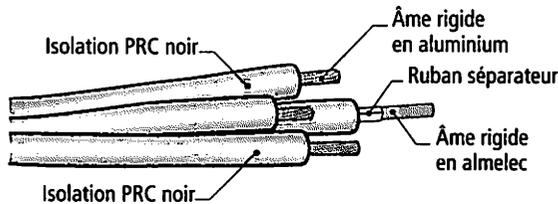
Les canalisations aériennes, beaucoup plus économiques que les canalisations souterraines, sont utilisées pour les réseaux d'éclairage, pour la distribution en basse et moyenne tension, pour le transport d'énergie en HT et THT.

1. Constitution générale



2. Conducteurs

- Conducteurs nus : en cuivre écroui, en almelec.
- Câbles torsadés en basse tension :



Dans le cas où ces torsades sont utilisées aussi pour l'éclairage public, elles comportent un ou deux conducteurs pour l'éclairage et trois phases assemblées autour d'un neutre porteur.

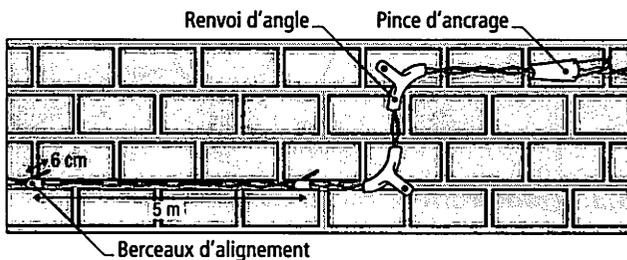
Exemple :

Câble $3 \times 35 + 2 \times 16 + 54,6 \text{ mm}^2$.

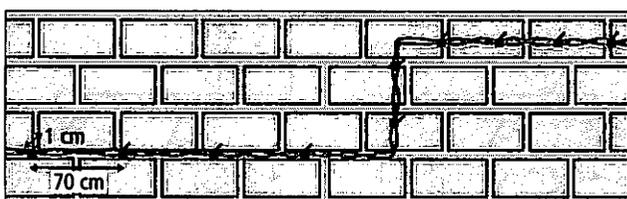
a) Réseau sur façade

Il peut être :

- à faisceau tendu : les conducteurs sont soutenus par le neutre porteur à l'aide de pinces d'ancrage. Les changements de direction se font par des renvois d'angle en alliage léger isolé.



- à faisceau posé : le câble est posé sur des colliers tous les 70 cm.



b) Réseau sur poteaux

Ils sont surtout utilisés pour les lignes rurales.

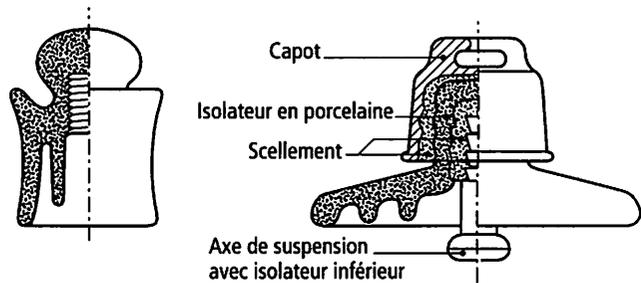


Ce type de réseau aérien présente beaucoup d'avantages :

- chute de tension plus faible ;
- simplification des études ;
- poteaux de plus faible hauteur ;
- augmentation de la sécurité ;
- réduction de la largeur des tranchées d'abattage ;
- diminution des surcharges dues au givre ;
- simplification de l'armement sur poteau, etc.

3. Isolateurs

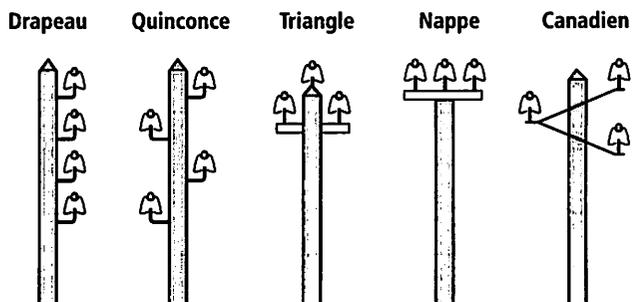
Ils servent à amarrer les conducteurs et à les isoler des supports. Ils sont réalisés en verre (silice + calcaire + soude) ou en porcelaine (kaolin et quartz). Ils doivent supporter à la fois des contraintes mécaniques et diélectriques.



On distingue les isolateurs rigides pour les lignes BT et HTA et les isolateurs montés en chaîne pour les lignes HTB.

4. Armement des supports

C'est l'ensemble constitué par les ferrures et les isolateurs avec les vis de fixation.



Les différentes dispositions d'armement des supports.

5. Les poteaux ou supports

Ils assurent l'inaccessibilité aux conducteurs. Ils sont :

- en bois : pays froids ou risques de givre ;
- en béton armé, surtout en BT et HTA ;
- métalliques, surtout en HTB.

a) Hauteur des poteaux

Elle est liée à la distance minimale des conducteurs au-dessus du sol :

- 6 m pour les tensions jusqu'à 45 kV ;
- 8 m pour les tensions au-delà de 45 kV.

En BT et HTA, elle est comprise entre 10 et 12 m. En HTB, entre 20 et 30 m.

b) Distance entre supports

La distance normale est de 45 m ; elle peut atteindre jusqu'à 100 m, selon le relief du terrain, en MT et BT. Pour la HT et la THT, les portées peuvent être de 500 m à 1 500 m.

Chaque support doit être muni d'un dispositif avertisseur de danger, fil de fer barbelé ou piquants ainsi que de l'inscription : « Défense absolue de toucher aux conducteurs même tombés à terre. Danger de mort ».

Les supports métalliques doivent être reliés à la terre. Cette protection est souvent complétée par un ou deux conducteurs placés au sommet des portiques qui relient tous les pylônes : ce conducteur est appelé fil de garde ; il assure une protection de la ligne contre la foudre et le retour du courant en cas de court-circuit phase-masse.

6. Établissement d'une ligne aérienne

La construction d'une ligne aérienne suppose l'exécution des opérations suivantes :

a) Le projet

À partir des données électriques :

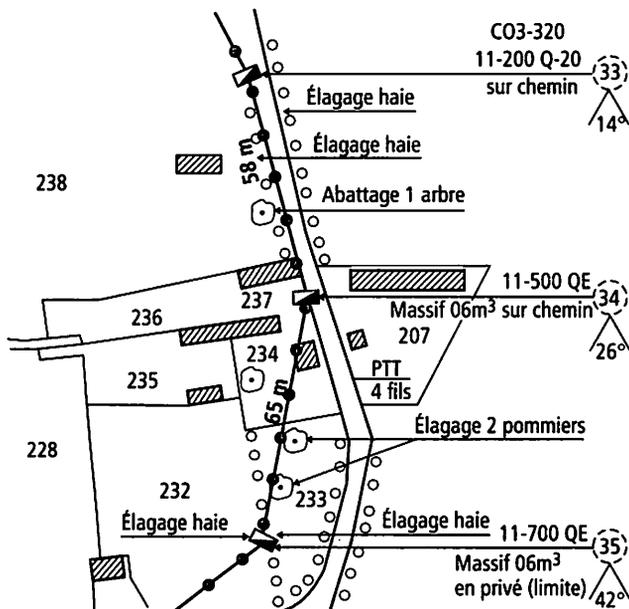
- tension, puissance à transporter, nature du courant ;

et des données d'environnement :

- lieu à raccorder, milieu urbain ou rural, obstacles naturels ;
- lignes existantes, routes, rivières, voies ferrées ,

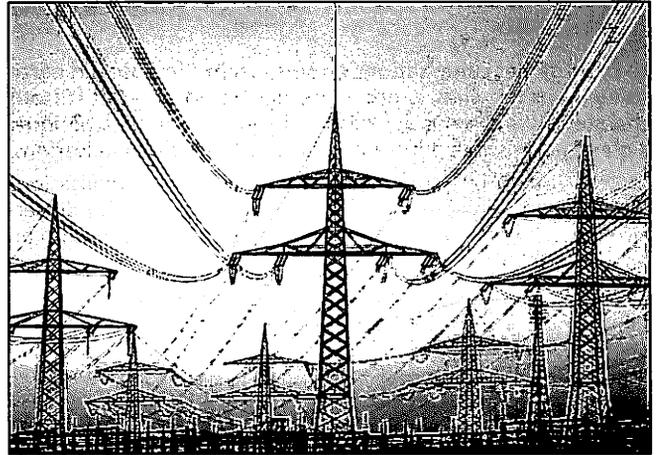
on détermine :

- le type de conducteurs et les sections ;
- les supports utilisés et leurs accessoires ;
- le tracé de la ligne sur une carte à l'échelle 1/10 000 ou 1/50 000.



Tracé d'une ligne aérienne à basse tension.

Une étude sur le terrain est nécessaire. À la suite de cela, les démarches administratives avec les propriétaires sont entreprises.



Pylônes avec armement en double drapeau.

b) Le piquetage

Il faut reporter l'emplacement des poteaux sur le terrain.

c) La préparation

Il s'agit de commander le matériel : poteaux, ferrures, câbles et de faire exécuter les travaux préparatoires : abattage d'arbres, fondations.

d) La pose des supports

Selon les types de poteaux et les emplacements, on effectue les travaux de levage, de réglage et de fixation des ferrures et isolateurs.

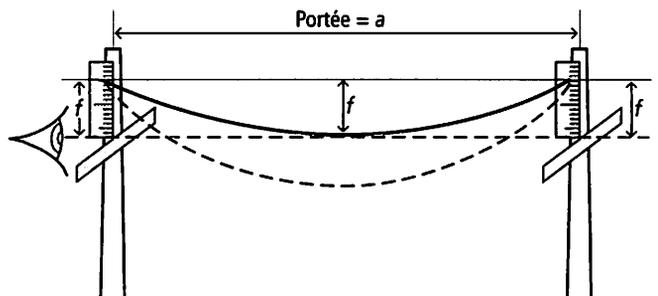
e) Le montage des câbles

Il comprend le tirage et le réglage de la tension des câbles.

Pour effectuer le réglage de la tension des câbles, on mesure la flèche à l'aide de deux mires ou nivelettes montées sur une règle graduée et accrochées à l'isolateur.

Par visée du point le plus bas des conducteurs, on détermine la flèche.

7. Calcul de la flèche d'un câble



$$f = \frac{p a^2}{8 T}$$

T (daN) : effort de traction sur la ligne.
 a (m) : distance ou portée entre deux supports
 p (daN/m) : masse du câble par unité de longueur

Exemple :

Une ligne BT a une portée de 80 m ; l'effort de traction maximale est de 500 daN ; le câble torsadé comporte 3 câbles aluminium de 35 mm² plus un neutre porteur de 54,6 mm² ; sa masse est de 0,65 daN. Calculer la flèche à 15 °C sans vent.

$$f = \frac{0,65 \times 80^2}{8 \times 500} = \frac{0,65 \times 6400}{8 \times 500} = 1,04 \text{ m}$$

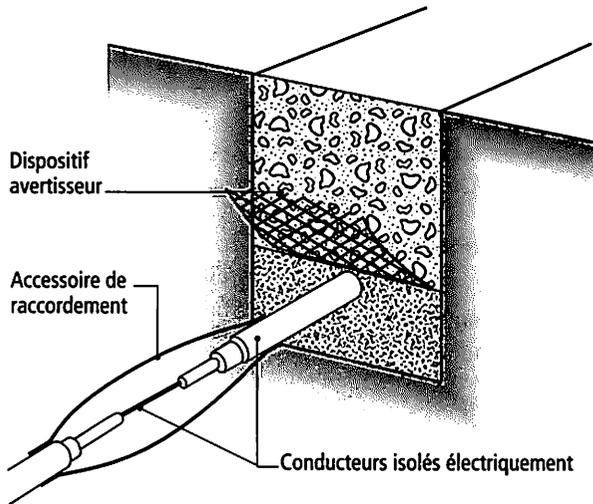
Remarque :

L'électricité étant devenu un besoin vital, et les lignes aériennes étant vulnérables aux perturbations atmosphériques (foudre, tempête), la tendance est à leur remplacement par des lignes souterraines.

2 - Alimentation en énergie électrique



Le passage des canalisations en souterrain s'impose, en particulier, dans les villes, à proximité des aérodromes et surtout chaque fois que, pour des raisons de sécurité ou d'esthétique, il n'est pas possible d'installer d'autres types de canalisations. Malgré un prix plus élevé que pour les canalisations aériennes, on préfère, pour une meilleure continuité du service, enterrer les canalisations électriques en basse tension ou en HTA (20 kV).



1. Constitution générale

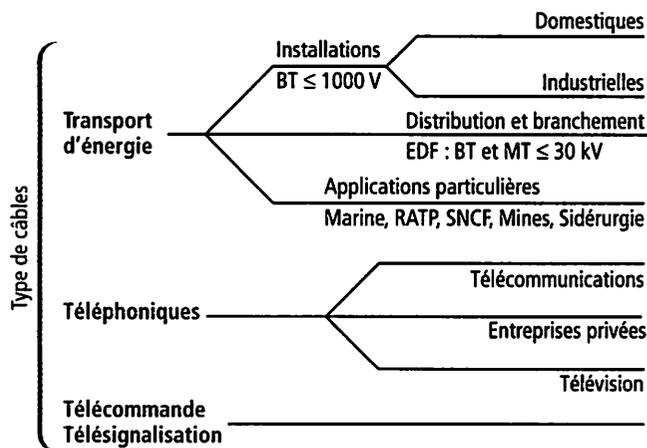
Nous limiterons notre étude aux lignes moyenne tension (HTA) et basse tension (BT).

2. Les câbles

a) Classification des câbles

Les câbles de transport d'énergie sont classés selon la tension de service entre phases.

- Basse tension : $U < 1\ 000\ V$
- Moyenne tension : $1\ 000\ V < U \leq 30\ 000\ V$
- Haute tension : $U > 30\ 000\ V$.



D'autre part, on distingue les câbles rigides des câbles souples.

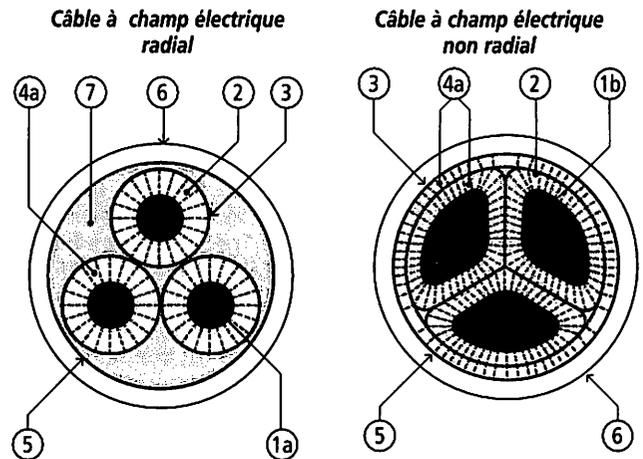
Les câbles téléphoniques ne seront pas étudiés dans ce chapitre.

Les câbles de télécommande et de télésignalisation s'apparentent à la fois aux câbles d'énergie et aux câbles téléphoniques.

Les câbles BT ayant déjà été étudiés, nous donnerons les compléments pour les câbles moyenne tension (HTA).

b) Constitution des câbles HTA

On distingue les câbles à champ électrique radial des câbles électriques à champ non radial.

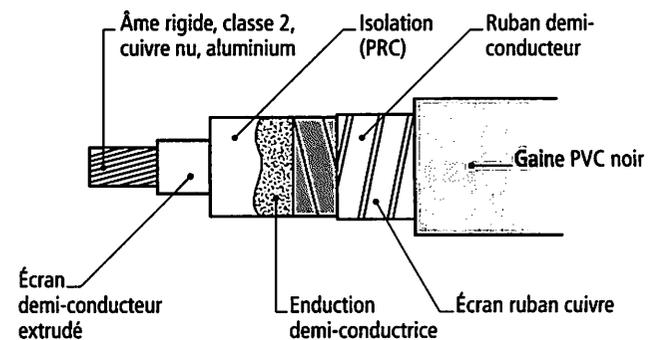


- (1a) Âme conductrice cylindrique.
- (1b) Âme conductrice sectorielle.
- (2) Enveloppe isolante.
- (3) Écran sur l'enveloppe isolante assurant une surface équipotentielle.
- (4a) Lignes de force radiales du champ électrique (pointillés).
- (4b) Lignes de force non radiales du champ électrique (pointillés).
- (5) Revêtement d'étanchéité formant écran pour le câble.
- (6) Revêtement extérieur assurant la protection mécanique et chimique, en général PVC.
- (7) Bourrage assurant le remplissage pour le câble.

Si le câble est à champ non radial (câble à ceinture), le niveau d'isolement entre phases est égal au niveau d'isolement entre phase et terre (exemple : 6/6 kV). Ces câbles ne sont utilisés actuellement que pour des réseaux de tension nominale inférieure à 15 kV.

Si le câble est à champ radial, il est désigné par une tension spécifiée où le rapport entre U et U_0 est de 1,732 pour le triphasé (exemple : 12/20 kV).

c) Exemple : câble unipolaire radial



Ce câble unipolaire à champ radial est conforme à la spécification EDF HN 33-S-22. Il est employé pour les raccordements de lignes aériennes aux postes de transformation, liaisons aéro-souterraines.

La pose s'effectue sans protection mécanique à l'air libre et il est fixé sur tablettes ou chemin de câble, ou avec protection mécanique réalisée par dalles, coquilles, caniveaux, pour la pose enterrée.

d) Caractéristiques d'un câble

La détermination des caractéristiques d'un câble de transport nécessite de définir :

- la tension de service et la tension spécifiée,
- la section conductrice,
- la nature de l'isolant et la protection extérieure.

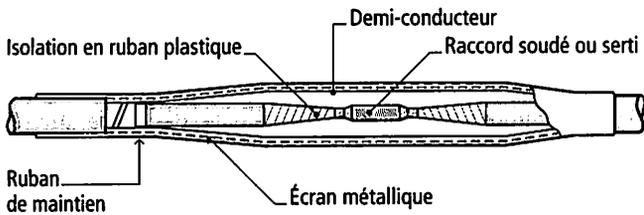
3. Les accessoires de raccordement

L'utilisation de câbles isolés aux matériaux synthétiques (PRC, PVC, polychlorure de vinyle, PE) a considérablement simplifié les accessoires de raccordement et d'extrémité.

Les différents appareils sont symbolisés de la manière suivante :

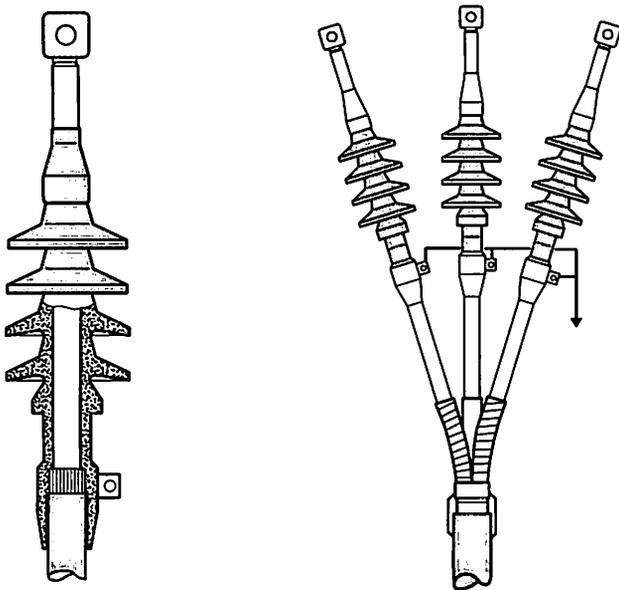
Symbole	Désignation
	Boîte d'extrémité pour câble
	Boîte de jonction
	Boîte de dérivation
	Boîte à double dérivation (2 variantes)

a) Jonction de câble unipolaire 20 kV



Ce type de jonction convient à l'air libre. Dans le cas où elle est enterrée, il faut prévoir un rubanage avec injection de résine thermodurcissable.

b) Extrémités d'extérieur



Ces extrémités de câbles tripolaires sont prévues pour l'extérieur.

L'étanchéité de la fourche est assurée par un bourrage complet par un rubanage en PVC adhésif.

4. Modes de pose

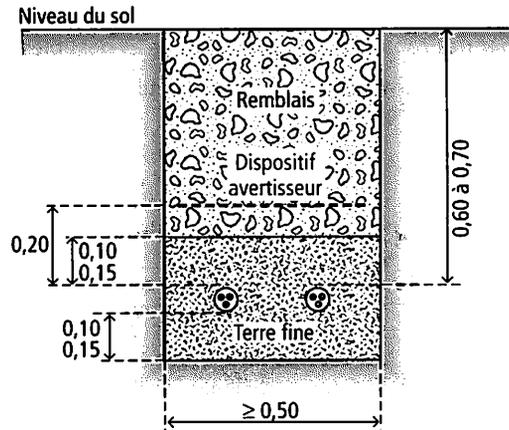
Le choix des câbles enterrés s'effectue selon les types de pose suivants.

a) Pose directe dans le sol sans protection complémentaire

• Câbles de $U \leq 1\,000\text{ V}$ avec armure d'acier ou avec gaine d'étanchéité sans armure.

Exemple : $U\ 1\,000\ R\ G\ P\ F\ V.$

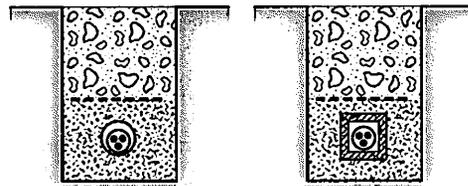
• Câbles de $U > 1\,000\text{ V}$ sans armure, capable de supporter le tassement des terres et le contact des corps durs. Ces câbles comportent une gaine ou un écran métallique mis à la terre.



b) Pose sous fourreaux, conduits, caniveaux enterrés

Câbles comportant une gaine extérieure de protection permettant le tirage en tube (mode de pose réf. 61).

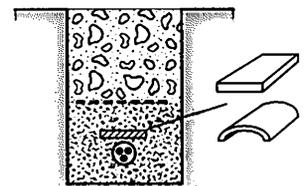
Exemple : $A\ 05\ V\ V\ U$ (ou R) ($V\ G\ V$) ou $U\ 500\ V\ G\ P\ V.$



c) Pose directe dans le sol avec protection mécanique complémentaire (mode réf. 63)

Ce mode de pose convient aux câbles de $U \leq 1\,000\text{ V}$ sans armure et comportant une gaine épaisse.

Exemple : $U\ 1\,000\ R\ 0\ 2\ V$ et $H\ 07\ R\ N\ F$ ($S\ C\ 12\ N$).



Remarque :

La pose en fourreaux est utilisée pour les traversées de voies publiques quel que soit le type de câble.

5. Règles générales de pose

Norme NF C 15-100 et NF C 12-100

Spécification EDF H N-S-01

Les canalisations souterraines doivent être protégées contre les détériorations causées par :

- le tassement des terres ;
- les actions chimiques dues au sol ;
- le contact des corps durs ;
- le choc des outils à main.

Proximité d'autres canalisations :

- croisement de 2 câbles d'énergie à 20 cm au moins ;
- tracé parallèle de câbles d'énergie à 20 cm au moins ;
- croisement avec câble de télécommunication 0,20 à 0,40 m ;
- parcours parallèle énergie-télécommunication 0,50 m.

2 - Alimentation en énergie électrique



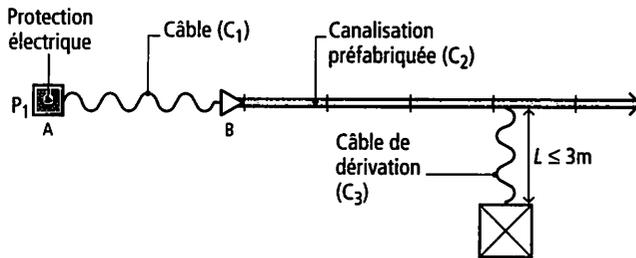
On utilise de plus en plus souvent, pour distribuer l'énergie, des canalisations préfabriquées qui facilitent l'installation et l'extension des réseaux.

Le choix des canalisations préfabriquées et des protections correspondantes doit être conforme à la norme C 15.1000. Pour les canalisations préfabriquées, de 16 à 250 A, il est possible de déterminer rapidement les sections et calibres de protection en utilisant la méthode du guide UTE C 15.107.

1. Choix du schéma type

En règle générale, les canalisations préfabriquées sont alimentées par des câbles. On distingue trois cas possibles :

- Schéma 1 : Alimentation d'appareils d'utilisation non susceptibles de surcharges.

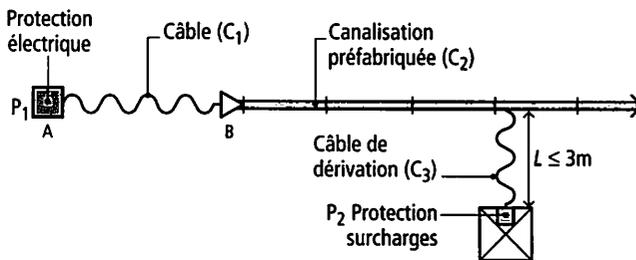


Exemple : luminaires conducteurs.

Le câble C3 (raccordement à l'appareil) n'est pas protégé contre les surcharges, ni contre les courts-circuits.

Ce câble de longueur inférieure à 3 m, ne comporte ni dérivation, ni prise de courant ; il n'est pas susceptible d'être le siège de surcharge ou de court-circuit.

- Schéma 2 : Alimentation d'appareils d'utilisation ayant une protection incorporée contre les surcharges.

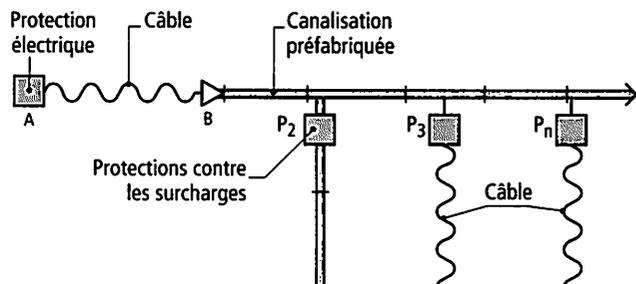


Le dispositif de protection P₂, qui protège le câble contre les surcharges, n'est pas placé à son origine car ce câble a une longueur inférieure à 3 m et ne comporte ni dérivation ni prise de courant.

Ces câbles sont réalisés de manière à réduire au minimum le risque de court-circuit.

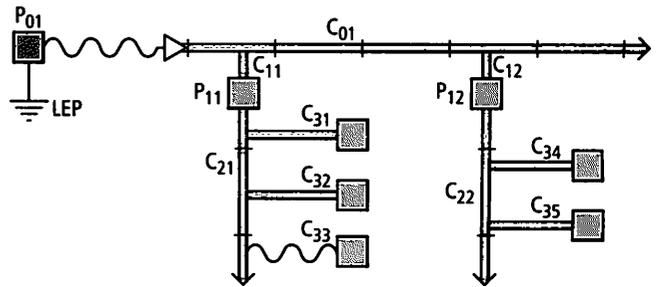
Si les conditions ci-dessus ne sont pas réalisées, on emploie le schéma 3 : Protection en tête de dérivation.

- Schéma 3 : Alimentation des dérivation protégées individuellement contre les surcharges.



Les dispositifs P₂, P₃, P_n protègent les câbles en aval contre les surcharges, les courts-circuits et les contacts indirects.

Exemple d'application :



Les canalisations préfabriquées :

- C₀₁, C₁₁, C₁₂ sont protégées contre les courts-circuits par P₀₁ ;
- C₂₁, C₂₂... sont protégées contre les surcharges par P₁₁, P₁₂ ;
- C₃₁, C₃₂... sont protégées contre les courts-circuits par P₁₁ ou P₁₂.

2. Sections et protections contre les surcharges

a) Caractéristiques des enveloppes des canalisations préfabriquées (NF C 63 411)

- I_{nc} : courant nominal de la canalisation préfabriquée ;
- Z_{ph max.} : impédance linéique maximale de phase utilisée pour le calcul des chutes de tension ;
- Z_{ph mini} : impédance linéique minimale de phase utilisée pour le calcul des courants de courts-circuits maximaux ;
- Z_{b (Ph-PE)} : impédance de boucle phase-masse utilisée pour le calcul des courants de défaut Ph-PE (protection contre les contacts indirects) ;
- R_{TE} : résistance linéique du conducteur de protection de la canalisation préfabriquée.

Les valeurs choisies correspondent aux valeurs existant dans les canalisations préfabriquées.

Caractéristiques des enveloppes des canalisations préfabriquées.

I _{nc} (A)	Z _{ph. max} (mΩ/m)			Z _{ph. mini} (mΩ/m)			Z _{b (Ph-PE)} (mΩ/m)			R _{PE} (mΩ/m)	m = $\frac{R_{PE}}{Z_b}$
	Z	R	X	Z	R	X	Z	R	X		
16	9	9	-	9	9	-	18	18	-	9	0,5
25	8,45	8,45	-	6,5	6,5	-	11,1	11,1	-	1,8	0,16
32	5,28	5,28	-	4,06	4,06	-	7,08	7,08	-	1,8	0,25
40	3,66	3,66	-	2,14	2,14	-	5,82	5,82	-	1,8	0,31
63	1,77	1,77	-	1,36	1,36	-	2,87	2,87	-	1,02	0,35
100	1,46	1,39	0,457	0,91	0,91	-	2,09	1,98	0,67	1,02	0,49
160	0,792	0,772	0,180	0,40	0,40	-	1,15	0,89	0,73	0,75	0,65
250	0,456	0,440	0,120	0,27	0,245	0,122	0,76	0,64	0,42	0,42	0,55

b) Choix des dispositifs de protection contre les surcharges et sections des conducteurs amont en fonction du courant d'emploi

Le tableau suivant (page 49) donne, pour chaque valeur du courant nominal des canalisations préfabriquées, les courants d'emploi I_B, le courant nominal de chaque protection, ainsi que la section minimum des câbles amont d'alimentation de la canalisation préfabriquée.

I_{nc} (A)	Courant d'emploi I_B ou courant nominal (protection)			Section mini des câbles amont (mm ²)			
	Fusibles gl	Petits disjoncteurs	Disjoncteur d'usage général	Cuivre		Aluminium	
				Phase	Neutre PE	Phase	Neutre Pe
16	12	15	15	1,5	1,5	-	-
25	20	25	25	2,5	2,5	-	-
32	25	32	32	4	4	-	-
40	32	38	40	6	6	10	10
63	50	60	63	10	10	16	16
100	80	95	100	25	25	50	35
160	125	-	160	50	25	95	50
250	200	-	250	120	70	185	70

I_{nc} : courant nominal des canalisations préfabriquées.

3. Vérification des chutes de tension

a) Formule de calcul

Pour une chute de tension de 6 %.

$$0,06 U = L Z_{ph \max} k_1 I_n k_p k_c \cdot 10^{-3}$$

- $k_1 I_n$: courant de non-fonctionnement du dispositif de protection contre les surcharges, les fusibles, gG étant pris comme référence ;
- k_p : coefficient de polarité, 2 en monophasé, $\sqrt{3}$ en triphasé ;
- k_c : coefficient de répartition de charge :
 $k_c = 0,5$ en charge uniformément répartie,
 $k_c = 1$ en charge concentrée à l'extrémité ;
- U : en monophasé : $U = U_0$ (tension entre phase et neutre),
 en triphasé : $U = U \sqrt{3}$;
- L : longueur de la canalisation préfabriquée en mètres ;
- $Z_{ph \max}$: impédance maximale linéique de phase (en mΩ/m).

Monophasé

$$L_{\max} = \frac{60 U_0}{Z_{ph} k_1 I_n}$$

Triphasé

$$L_{\max} = L_{\max. \text{ mono}} \times 2$$

b) Utilisation du tableau de chute de tension

Le tableau ci-dessous donne les valeurs de chute de tension en % par mètre. Pour connaître la chute de tension réelle en %, il faut multiplier ces valeurs par la longueur réelle de la canalisation.

Si le courant d'emploi est inférieur au courant de référence, les valeurs de chute de tension par mètre peuvent être corrigées dans le rapport correspondant.

Courant nominal I_{nc} (A)	Courant de référence (A)	Chute de tension ΔU en % par m			
		Circuit monophasé		Circuit triphasé	
		127 V	220 V	220 V	380 V
16	17	0,120	0,069	0,060	0,034
25	28	0,187	0,109	0,094	0,054
32	35	0,146	0,085	0,073	0,042
40	42	0,120	0,069	0,060	0,034
63	65	0,090	0,053	0,045	0,026
100	104	0,120	0,070	0,060	0,034
160	150	0,091	0,054	0,047	0,027
250	240	0,087	0,050	0,043	0,025

Exemple :

Soit une canalisation préfabriquée de 24 A utilisée avec un I_B de 10 A en monophasé 127 V et de 12 m de longueur.

La chute de tension donnée par le tableau est de 0,187 %/m.

$$\text{Chute de tension : } u\% = 0,187 \times 12 \times \frac{10}{28} = 0,80 \%$$

Remarques

- Si la canalisation préfabriquée est alimentée par un câble, il faut calculer sa chute de tension (tableau 2, page 59).
- Les valeurs du tableau sont calculées pour une charge uniformément répartie ($k_c = 0,5$).
- Lorsque la charge est concentrée à l'extrémité, $k_c = 1$, les longueurs L sont divisées par 2 et les chutes de tension ΔU sont multipliées par 2.

4. Pouvoir de coupure des dispositifs de protection

La méthode est la même que pour la détermination des sections de conducteurs et protections (p. 60) :

1) Évaluation du courant de court-circuit présumé à l'origine de l'installation (voir tableau p. 60).

2) Emploi du tableau : au lieu de lire la section, on lit dans le tableau I page 50 la valeur de I_{nc} (Intensité nominale canalisation).

Remarque :

Dans les circuits mixtes, il y a lieu de calculer d'abord le courant de court-circuit à l'extrémité du câble d'alimentation (méthode simplifiée 15.105), puis de considérer ce courant de court-circuit, comme celui étant à l'origine de la canalisation préfabriquée.



2 - Alimentation en énergie électrique

5. Protection contre les contacts indirects

Pour les schémas TN et IT, la protection contre les contacts indirects est assurée par le dispositif de protection contre les surintensités placé en amont. Il faut, dans ce cas, vérifier que la longueur de la canalisation n'est pas trop importante, ce qui aurait pour conséquence l'établissement d'une tension dangereuse.

a) Formules utilisées

Fusibles gl

$$L_{20} = \frac{0,8 \times 220}{Z_b I_a} 10^3$$

Disjoncteurs

$$L_{20} = \frac{0,2 \times 220}{Z_b \mu I_r} 10^3$$

L_{20} : longueur de la canalisation préfabriquée lorsqu'il n'existe pas de câble amont ;

Z_b : impédance de boucle phase-masse (en mΩ/m) ;

I_a : courant de fusion du fusible dans un temps correspondant à la tension de contact U_c ;

I_r : courant de réglage du disjoncteur (en A) ;

μ : rapport du courant minimal de fonctionnement

magnétique du disjoncteur à son courant de réglage ;

$\mu = 3,85$ disjoncteur type B

$\mu = 8,8$ disjoncteur type C

$\mu = 1,2$ disjoncteur usage général.

b) Utilisation du tableau II page 50

L_{20} : longueur de canalisation préfabriquée seule ;

L_{10} : longueur de câble seul.

Dans les circuits mixtes : L_1 = longueur du câble

L_2 = longueur canalisation

On obtient :

$$L_1 = L_{10} \frac{L_{20} - L_2}{L_{20}}$$

$$L_2 = L_{20} \frac{L_{10} - L_1}{L_{10}}$$

Remarques :

- Lorsque la tension limite de sécurité $U_L = 25$ V, les longueurs indiquées par les fusibles doivent être divisées par 2.
- Dans les installations 127-220 V, les longueurs doivent être multipliées par 0,58 pour les disjoncteurs d'usage général et les petits disjoncteurs.
- Le conducteur de protection doit faire partie de la même canalisation que les conducteurs actifs correspondants.

Tableau I : Courants de court-circuits présumés.

I_{nc} (A)		Longueur de la canalisation (en mètres)																												
		16	25	32	40	63	100	160	250	2	2,4	3	4	4,8	6	6,4	18	7	8,12	8,7	10	12	13,5	15	20	24	30,5	34,8	140	
230 400	V																													
I_{cc} amont (kA)		Courant de court-circuit au niveau considéré (kA)																												
I_{cc}		50	45	40	35	30	24	18	14	12	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0,05	
		32	27	24	21	17	14,2	12	11	10,4	9,2	8	6,7	5,2	4,4	3,6	3,5	3,3	3,1	2,8	2,6	2,3	1,9	1,7	1,5	1,2	1	0,8	0,7	0,6
		25	22	20	18	15	12,7	10,5	10	9,5	8,6	7,5	6,3	5	4,3	3,5	3,4	3,2	3	2,7	2,6	2,2	1,9	1,7	1,5	1,1	1	0,8	0,7	0,6
		20	18	16	15	13,5	11,4	10,5	10	9,5	8,6	7,5	6,3	5	4,3	3,5	3,4	3,2	3	2,7	2,6	2,2	1,9	1,7	1,5	1,1	1	0,8	0,7	0,6
		15	14	13	12	10,7	9,5	8,6	7,7	7	6,5	5,8	5	4,2	3,7	3,1	3	2,9	2,7	2,5	2,3	2	1,7	1,6	1,4	1,1	1	0,8	0,7	0,6
		12	11	10,6	10	9,5	8,5	7,8	7	6,7	6,5	6	5,4	4,8	4	3,5	3	2,9	2,8	2,6	2,4	2,3	2	1,7	1,6	1,4	1,1	0,9	0,7	0,6
		10	9	8,6	8,2	7,5	6,9	6,3	6	5,8	5,5	5	4,4	3,7	3,3	2,8	2,7	2,6	2,5	2,3	2,2	2	1,7	1,5	1,4	1,1	0,9	0,7	0,6	
		7	6,5	6,3	6	5,7	5,3	5	4,8	4,7	4,4	4	3,7	3,2	2,9	2,5	2,5	2,4	2,3	2,1	2	1,8	1,6	1,4	1,3	1	0,9	0,7	0,6	
		5	4,7	4,6	4,5	4,3	4	3,9	3,7	3,7	3,5	3,3	3	2,7	2,5	2,2	2	2	2	1,9	1,8	1,6	1,4	1,3	1,2	1	0,8	0,7	0,6	
		4	3,8	3,7	3,7	3,5	3,4	3,2	3,2	3,1	3	2,9	2,7	2,4	2,2	2	1,9	1,9	1,8	1,7	1,6	1,5	1,3	1,2	1,1	0,9	0,8	0,7	0,6	
		3	2,9	2,9	2,8	2,7	2,8	2,5	2,5	2,5	2,4	2,3	2,2	2	1,9	1,7	1,7	1,6	1,6	1,5	1,4	1,3	1,1,2	1,1	1	0,9	0,7	0,6		
		2	2	2	2	1,9	1,8	1,8	1,8	1,7	1,7	1,7	1,6	1,5	1,4	1,3	1,3	1,3	1,3	1,2	1,2	1	1	0,9	0,9	0,7	0,7	0,6		
		1	1	1	1	1	1	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,86	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,7	0,7	0,7	0,7	0,6	0,6	0,5	0,5	0,4	0,4	
	I_{nc} (A)		Longueur de la canalisation (en mètres)																											
130 230	V																													

Tableau II : Longueurs maximales de canalisations (m) protégées contre les contacts indirects.

	Canalisation préfabriquée	Câble amont	Fusibles gG		Fusibles aM		Petits disjoncteurs				Disjoncteurs usage général			
			I_{nc} (A)	S (mm ²)	L_{20} (m)	L_{10} (m)	L_{20} (m)	L_{10} (m)	C		B		L_{20} (m)	L_{10} (m)
									L_{20} (m)	L_{10} (m)	L_{20} (m)	L_{10} (m)		
Câbles amont EN	Cuivre	16	1,5	79	47	47	28	74	43	169	99	51	30	
		25	2,5	149	51	133	30	72	44	165	100	53	32	
		32	4	179	62	110	38	88	56	202	128	65	41	
		40	6	154	73	89	45	90	70	207	160	63	49	
		63	10	175	75	103	48	116	75	265	172	81	52	
		100	25	106	122	66	75	100	117	230	289	70	68	
		160	50/25	83	72	59	47	-	-	-	-	80	81	
	250	120/70	88	102	65	72	-	-	-	-	77	105		
	Aluminium	40	10	154	76	89	58	90	43	207	99	63	51	
		63	16	175	74	103	60	116	46	265	107	81	52	
100		50/35	106	76	66	58	100	72	230	179	70	68		
160		95/50	83	86	59	71	-	-	-	-	80	81		
250		185/70	88	78	65	70	-	-	-	-	77	101		

La détermination d'une installation de distribution électrique nécessite à la fois :

- des choix de canalisation en fonction de l'environnement, et des modes de pose ;
- des calculs pour déterminer :
 - les sections de conducteurs ;
 - les calibres et dispositifs de protection.

Dans tous les cas, on doit respecter les règles énoncées dans la norme NF C 15 100.

1. Courants admissibles I_z

C'est la valeur de l'intensité que peut supporter un conducteur dans des conditions données, sans détérioration dans le temps.

$$I_B \leq \frac{I_z}{f}$$

I_B : courant d'emploi
 I_z : courant admissible
 f : facteur de correction tenant compte de la température et du groupement des conducteurs.

À une valeur du courant admissible, correspond une section de conducteur qui tient compte :

- du mode de pose des canalisations ;
- de la nature des isolants ;
- du nombre d'âmes actives ;
- de la nature de l'âme conductrice (Cu ou Al).

à I_z correspond S S : section de l'âme conductrice

La valeur des courants admissibles en fonction des sections de conducteurs fait l'objet de la section 523 de la NF C 15.100.

2. Protection contre les surcharges

Pour réaliser une protection efficace contre les surcharges, on doit prévoir la coupure d'un circuit avant un échauffement anormal pouvant provoquer des dégâts.

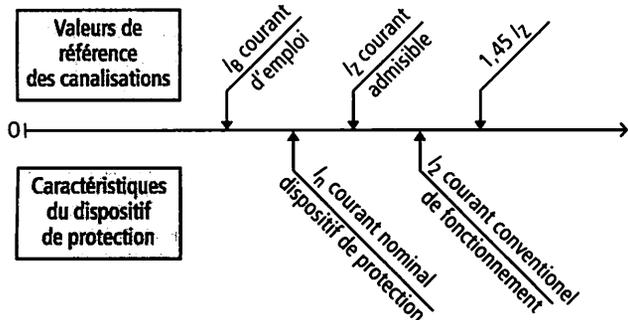
Deux conditions sont à respecter : (NF C 15,100, 433.2)

$$I_B \leq I_n < I_z$$

I_B : courant d'emploi
 I_n : courant nominal du dispositif de protection

$$I_z \leq 1,45 I_z$$

I_z : courant admissible dans la canalisation
 I_z : courant de fonctionnement du dispositif de protection dans le temps conventionnel.



Pour les fusibles :

$$I_B \leq I_n$$

$$I_z \leq 1,45 I_z \text{ ou } I_n \leq \frac{I_z}{k_3}$$

- $I_n \leq 10 \text{ A}$ $k_3 = 1,31$
- $10 \text{ A} < I_n \leq 25 \text{ A}$ $k_3 = 1,21$
- $I > 25 \text{ A}$ $k_3 = 1,10$

Pour les disjoncteurs :

$$I_B \leq I_n$$

$$I_n \leq I_z$$

Fusibles gG

3. Chutes de tension (NF C 15.100, 524)

Valeurs de la chute de tension :

Installation alimentée à partir :	Éclairage	Autres Usages
- d'un réseau BT	3 %	5 %
- d'un poste de transformation	6 %	8 %

La chute de tension est calculée par la relation :

$$u = b \left(\rho_1 \frac{L}{S} \cos \varphi \right) + \lambda (L \sin \varphi) I_B$$

Valeurs de b :

- $b = 2$: monophasé ou continu
 - $b = 1$: triphasé, tension phase-neutre
 - $b = \sqrt{3}$: triphasé tension phase-phase
- L : Longueur de la ligne (m)
 S : section (mm²)
 λ : réactance linéique des conducteurs ($0,08 \times 10^{-3} \Omega/m$)
 I_B : courant emploi (A)
 ρ_1 : résistivité (cuivre : $0,0225 \Omega \text{ mm}^2/m$; aluminium : $0,036 \Omega \text{ mm}^2/m$)

4. Protection contre les courts-circuits

a) Règle du pouvoir de coupure (NF C 434.2.2)

$$I_{cc \text{ maxi}} \leq PC$$

I_{cc} : intensité de court-circuit
 PC : pouvoir de coupure de l'appareil de protection

Le pouvoir de coupure de l'appareil de protection doit être au moins supérieur ou égal au courant de court-circuit.

b) Règle du temps de coupure (NF C 434.2.3)

Le temps de coupure doit être inférieur au temps de passage du courant de court-circuit, tel que la température des conducteurs soit portée à la valeur limite maximale admise.

La règle est satisfaite lorsque :

$$t \leq k^2 \frac{S^2}{I_{cc}^2}$$

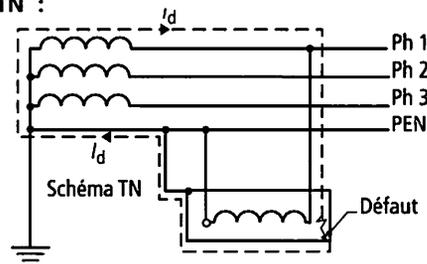
S : section des conducteurs (mm²)
 I_{cc} : intensité de court-circuit (A)
 k : constante (voir tableau).
 Le temps t ne doit pas être supérieur à 5 s.

Conducteur isolé au :	Coefficient k	
	âme cuivre	âme aluminium
- PVC	115	74
- PRC	135	87

5. Protection contre les contacts indirects (NF C 15.100 413, 533)

La protection par coupure automatique de l'alimentation doit, en cas de défaut d'isolement, ne doit pas laisser se maintenir une tension de défaut U supérieure à celle de la courbe de sécurité fixée par des valeurs de temps en fonction de la version U_L .

Schémas TN :



Tension de contact :
$$U_c = R_{pE} I_d = \rho \frac{L}{S_{pE}} I_d$$

- U_c : tension de contact (V)
- S : section conducteur PE
- L : longueur conducteur PE
- I_d : courant de défaut

2 - Alimentation en énergie électrique



La détermination des intensités de court-circuit dans une installation est à la base de la conception d'un réseau.

Elle détermine :

- le pouvoir de coupure des appareils de protection ;
- la tenue des câbles ou des canalisations électriques ;
- la sécurité des personnes et du matériel.

Il existe plusieurs méthodes pour la détermination des courants de court-circuit :

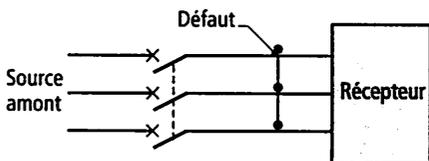
- les méthodes à base de tableaux ou d'abaques ou de graphiques (exemple : GUIDE UTE NF C 15.105) ;
- la méthode simplifiée de la norme C 15.100 ;
- la méthode de calcul complète (réactances homopolaires et composantes symétriques).

Des logiciels permettent désormais de réaliser très rapidement ces calculs.

Les règles de calcul et les données qui suivent permettent, dans la majorité des cas, une approche suffisante pour le calcul du courant de court-circuit.

1. Principe du calcul de I_{cc}

Soit un réseau triphasé sur lequel survient un court-circuit sur les 3 phases ; I_{cc3} .



La valeur de l'intensité de court-circuit est tirée de la relation générale $U = ZI$ soit, en triphasé :

$$I_{cc3} = \frac{U_0}{\sqrt{3} Z_T}$$

U_0 : tension entre phases à vide au secondaire du transformateur.
 Z_T : impédance totale par phase en amont du défaut.

Il existe deux autres valeurs significatives du courant de court-circuit :

- I_{cc2} ; court-circuit entre deux phases ;
- I_{cc1} : court-circuit entre phase et neutre.

Le calcul de l'intensité de court-circuit revient à déterminer Z_T , l'impédance totale de court-circuit. Elle est formée des éléments résistants et des éléments inductifs du réseau, d'où :

$$Z_T = \sqrt{\Sigma R^2 + \Sigma X^2}$$

ΣR : somme des résistances } Transformateurs, disjoncteur, câbles, canalisations électriques, etc.
 ΣX : somme des réactances }

Exemple :

Calcul simplifié d'un courant de court-circuit

Câble tripolaire 3 x 16 mm² ; longueur 25 m ; résistance 1,45 mΩ/m ; tension entre phases 400 V ; réactance négligeable ; court-circuit triphasé en extrémité.

$$I_{cc3} = \frac{U_0}{\sqrt{3} Z_c} = \frac{400}{\sqrt{3} \times 1,45 \times 10^{-3} \times 25} = 6\,370 \text{ A}$$

où $I_{cc} = 6,37$ kA. Cette valeur donne un ordre de grandeur de l'intensité de court-circuit, mais elle ne tient pas compte de l'impédance de la source amont, ni du courant de court-circuit maximal du transformateur.

Faire passer un courant de 6 370 A dans un câble de 16 mm² de section, conduit à la destruction rapide de ce câble.

2. Méthode générale de calcul des I_{cc}

La disposition d'un réseau de distribution de moyenne ou basse tension peut être généralisée selon le schéma ci-après, dans lequel on retrouve toujours les éléments suivants :

- le réseau amont ;
- le ou les transformateurs ;
- un ou des disjoncteurs ;
- des câbles, des jeux de barres, des canalisations préfabriquées.

La méthode consiste à décomposer le réseau en tronçons et à calculer, pour chacun des tronçons, R et X, puis à les additionner arithmétiquement :

Réseau amont		R_a Résistance amont X_a Réactance amont P_{cc} En général 500 MVA
Transformateur		R_t : Résistance transfo X_t Réactance transfo $U_{cc} \%$: entre 4 et 7 %
Câble		R_c Résistance câble X_c Réactance du câble
Disjoncteur		R_d Négligeable X_d Réactance disjoncteur
Jeu de barres		R_b Négligeable X_b Réactance du jeu de barres
Câbles		R_c Résistance des câbles X_c Réactance des câbles
		(M)

Attention : Il ne faut surtout pas calculer Z séparément pour chaque tronçon et en faire la somme arithmétique pour obtenir Z_T , car il s'agit d'une somme vectorielle.

3. Réseau amont

La puissance de court-circuit du réseau HT (P_{cc} = Puissance de court-circuit) est donnée par le distributeur d'énergie, en général EDF. L'impédance du réseau amont ramenée au secondaire du transformateur est donnée par la relation :

$$Z_a = \frac{U_0^2}{P_{cc}}$$

U_0 : tension entre phases à vide du secondaire du transformateur :
 400 V pour réseau 380 V
 230 V pour réseau 220 V
 Z_a : impédance amont du transformateur ramenée au secondaire.

Tableau des impédances du réseau amont ramenées au secondaire du transformateur.

P_{cc} (MVA)	U_0 (V)	R_a (mΩ)	X_a (mΩ)
250	237	0,033	0,222
	410	0,1	0,700
500	237	0,017	0,111
	410	0,050	0,350

La résistance R_a peut être considérée comme négligeable devant la réactance X_a qui peut être confondue avec Z_a . Si un calcul précis est nécessaire, on peut prendre :

$$\frac{R_a}{X_a} = 0,15$$

4. Transformateur

L'impédance Z_T d'un transformateur vue du secondaire est donnée par la relation :

$$Z_T \leq \frac{U_0^2}{P} \times U_{cc} (\%)$$

U_0 : tension entre phases au secondaire à vide
 P : puissance du transformateur
 U_{cc} : tension de court-circuit en %

La résistance se calcule à partir des pertes cuivre dans le transformateur.

Pertes cuivre = $3 R_T I_n^2$ d'où : $R_T = \frac{P_{cu}}{3 I_n^2}$

La réactance se déduit de la relation :

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2}$$

X_T : réactance transformateur
 R_T : résistance transformateur
 Z_T : impédance ramenée au secondaire du transformateur

En cas de calcul approché, on peut assimiler X_T à Z_T .

Impédance d'un transformateur.

Puissance (kVA)	I_n (A)	U_{cc} (%)	R_T (mΩ)	X_T (mΩ)	Z_T (mΩ)	I_{cc} (kA)
100	141	4	35,30	57,23	67,24	3,5
160	225	4	15,63	39,02	42,03	5,59
250	352	4	8,93	25,37	26,9	8,69
315	444	4	6,81	20,22	21,34	10,9
400	563	4	5,03	16,04	16,81	13,8
500	704	4	3,90	12,87	13,45	17,2
630	887	4	2,95	10,25	10,67	21,5
800	1 127	4,5	2,88	9	9,45	24,18
1 000	1 408	5	2,24	8,10	8,4	27,08
1 250	1 760	5,5	1,81	7,16	7,39	30,61
1 600	2 253	6	1,39	6,14	6,30	35,65
2 000	2 816	6,5	1,12	5,34	5,46	40,82

Transformateur HT/BT alimenté par un réseau 500 MVA ; tension de sortie à vide $U_{20} = 410$ V.

5. Disjoncteurs

La résistance est négligeable, la réactance est prise égale à 0,15 mΩ.

L'impédance d'un disjoncteur ne doit être prise en compte que pour les appareils en amont de celui qui doit ouvrir sur le court-circuit envisagé.

6. Jeu de barres

La résistance d'un jeu de barre est négligeable sauf pour les faibles sections. La réactance est prise égale à 0,15 mΩ/m.

Pour les canalisations préfabriquées, l'impédance varie de 0,011 mΩ/m (4 700 A) à 0,063 mΩ/m (1 250 A) (voir la documentation-constructeurs).

7. Câbles

La résistance se calcule à l'aide de la formule :

$$R_c = \rho \frac{L}{S}$$

ρ : résistivité mΩ.mm²/m
 L : longueur en m de la canalisation
 S : section des conducteurs en mm²

Les fabricants donnent parfois la résistance linéique des câbles R_{ce} .

$$R_c = R_{ce} \cdot L$$

La résistivité des conducteurs est prise à température normale de fonctionnement :

- cuivre : $\rho = 22,5$ mΩ.mm²/m ;
- aluminium : $\rho = 36$ mΩ.mm²/m.

La réactance linéique des câbles est en général donnée par les fabricants ; elle est négligeable pour des sections inférieures à 25 mm² :

- câbles tripolaires : $X_{Ce} = 0,08$ mΩ/m ;
- câbles unipolaires : $X_{Ce} = 0,1$ à 0,2 mΩ/m ;
- lignes aériennes : $X_{Ce} = 0,3$ mΩ/m.

$$X_c = X_{ce} \cdot L$$

Câbles type U 1 000 R 02 V (cuivre).

Section (mm ²)	Résistance 50Hz CA à 85 °C (mΩ/m)	Réactance en CA à 50 Hz (mΩ/m)		
		Unipolaire (mΩ/m)	Tripolaire (mΩ/m)	
1,5	15,3	0,218	0,375	0,104
2,5	9,18	0,203	0,359	0,097
4	5,75	0,191	0,346	0,091
6	3,88	0,180	0,329	0,085
10	2,31	0,166	0,313	0,080
16	1,45	0,157	0,298	0,077
25	0,916	0,148	0,285	0,076
35	0,660	0,140	0,275	0,074
50	0,488	0,133	0,266	0,073
70	0,338	0,126	0,254	0,072
95	0,244	0,120	0,245	0,071
120	0,195	0,113	0,240	0,070
150	0,159	0,111	0,236	0,070
185	0,127	0,108	0,229	0,070
240	0,099	0,105	0,222	0,070
300	0,080	0,101	0,216	0,070
400	0,064	0,094	0,207	0,069
500	0,052	0,093	0,202	0,069
630	0,043	0,090	0,196	0,068



8. Canalisations préfabriquées

La documentation-constructeurs indique les valeurs de résistance et de réactance à prendre en compte.

- 25 A : impédance $X = 7,75$ mΩ/m ;
- 800 A : impédance $X = 0,094$ mΩ/m.

Canalisations préfabriquées.

Calibre intensité I_z (A)	Section des conducteurs (mm ²)	Résistance par phase à 20 ° (mΩ/m)	Réactance par phase à 50 Hz (mΩ/m)	Impédance par phase à 50 Hz (mΩ/m)	Exemple (désignation Schneider)
25	2,5	6,95		7,75	KB 2
40	6	2,92		3,38	KB 4
40	6	2,86	0,26	3,59	KJ 4
63	12,5	1,40	0,25	1,77	KJ 6
100		1,059	0,457	1,468	KSA 10
160		0,49	0,233	0,701	KSA 16
250		0,216	0,192	0,351	KSA 25
315		0,142	0,112	0,221	KSA 31
400		0,142	0,112	0,221	KSA 40
500		0,091	0,116	0,170	KSA 50
630		0,074	0,070	0,123	KSA 63
800		0,045	0,071	0,094	KSA 80

Différentes grandeurs :

U_0 : tension entre phases à vide au secondaire du transformateur moyenne-basse tension en volts (V) ;

P_{cc} : puissance de court-circuit du réseau amont en VA, en général donnée par l'EDF ;

P_{cu} : pertes cuivre dans le transformateur en watts (W) ;

P : puissance nominale du transporteur en volts-ampères (VA) ;

U_{cc} : tension de court-circuit en %.

Transformateurs en parallèle sur un jeu de barres.

L'intensité du courant de court-circuit est prise égale à la somme des intensités de court-circuit de chaque transformateur en parallèle. Dans ce cas, on ne tient compte, ni de l'impédance du jeu de barres, ni de celle des disjoncteurs.

ρ : résistivité à la température normale des conducteurs en service.

On prend :

$\rho = 22,5 \text{ m}\Omega/\text{mm}^2/\text{m}$ pour le cuivre

$\rho = 36 \text{ m}\Omega/\text{mm}^2/\text{m}$ pour l'aluminium

Pose des câbles : selon le mode de pose des câbles, la réactance peut varier considérablement :

- pose en tréfle avec permutation des phases $0,1 \text{ m}\Omega/\text{m}$;

- pose en nappe horizontale $0,2 \text{ m}\Omega/\text{m}$.

Remarque importante

S'il y a plusieurs conducteurs en parallèle par phase, il faut diviser la résistance d'un conducteur par le nombre de conducteurs. La réactance n'est pratiquement pas modifiée.

• **Calcul du courant de court-circuit minimum**

Dans le cas de la protection des personnes contre les contacts indirects, il arrive que l'on sépare la protection contre les courts-circuits (fusible ou disjoncteur) de la protection contre les surcharges (relais thermique). Dans ce cas, il faut s'assurer que le courant de court-circuit (I_{cc1} ou I_{cc2}) provoque bien la coupure du circuit dans le temps de 5 s (contrainte thermique des conducteurs).

Tableau résumé du calcul d'impédance Z_T .

Éléments de réseau	Résistance R	Réactance X
Réseau amont	$\frac{R_a}{X_a} = 0,15$ R peut être négligé par rapport à X	$X_a = Z_a = \frac{U_0^2}{P_{cc}}$
Transformateur	$R_T = \frac{P_{cu}}{3I_n^2}$ R_T souvent négligeable devant X_T pour transfo de puissance > 100 kVA	$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2}$ avec $Z_T = \frac{U_0^2}{P} \times u_{cc}$
Disjoncteur	R_d négligeable	$X_d = 0,15 \text{ m}\Omega/\text{pole}$
Jeu de barres	R_b négligeable pour $S > 200 \text{ mm}^2$ ou $R_b = \rho \frac{L}{S}$	$X_b = 0,15 \text{ m}\Omega/\text{m}$
Câble	$R_c = \rho \frac{L}{S}$	Câbles tripolaires $X_c = 0,08 \text{ m}\Omega/\text{m}$ Câbles unipolaires $X_c = 0,1 \text{ à } 0,2 \text{ m}\Omega/\text{m}$
Moteurs	R_m souvent négligeable	X_m souvent négligeable

$$I_{cc3} = \frac{U_0}{\sqrt{3} \sqrt{R_T^2 + X_T^2}}$$

Exemple de calculs de courants de court-circuit en triphasé.

Disposition de l'installation	Données électrotechniques	Résistance par tronçon R (mΩ)	Réactance par tronçon X (mΩ à 50 Hz)	Résistances cumulées R_c (mΩ)	Réactance cumulée X_c (mΩ à 50 Hz)	Courant de court-circuit I_{cc} (kA)
Réseau amont EDF	$P_{cc} = 500 \text{ MVA}$	0,050	0,350			
Transformateur	$S_n = 630 \text{ kVA}$ 20 kV/410 V $U_{cc} = 4 \%$	2,95	10,25			
Câble	8 m câble unipolaire Cu $2 \times 240 \text{ mm}^2/\text{phase}$ en nappe	$R_c = \frac{22,5 \times 8}{240} \times \frac{1}{2}$ $R_c = 0,375$	$X_c = 0,222 \times 8$ $X_c = 1,776$	3,375	12,376	18,45
Disjoncteur général		$R_d = 0$	$X_d = 0,15$	3,375	12,526	18,25
Jeu de barres	Longueur 10 m	$R_b = 0$	$X_b = 1,5$	3,375	14,026	16,41
Câble	72 m câble tripolaire $95 \text{ mm}^2 \text{ Cu}$	$R_c = \frac{22,5 \times 72}{95}$ $R_c = 17,05$	$X_c = 0,071 \times 72$ $X_c = 5,11$	20,425	19,136	8,46
Câble terminal	30 m câble tripolaire $10 \text{ mm}^2 \text{ Cu}$	$R_c = \frac{22,5 \times 30}{10}$ $R_c = 67,5$	$X_c = 0,08 \times 30$ $X_c = 2,4$	87,925	21,536	2,61

9. Méthode simplifiée de calcul des courants de court-circuit

Connaissant le courant de court-circuit en amont d'une canalisation, il est possible d'obtenir la valeur du courant de court-circuit en aval par utilisation du tableau page 61.

9.1. Mode d'emploi du tableau page 61

- On choisit le tableau du haut pour les câbles en cuivre et celui du bas pour ceux en aluminium.
- On part de la section de la canalisation.
- Sur la ligne, on cherche la valeur immédiatement supérieure à la longueur réelle, puis on se déplace verticalement vers la partie centrale du tableau jusqu'à la ligne correspondant à la valeur de I_{cco} du circuit considéré.

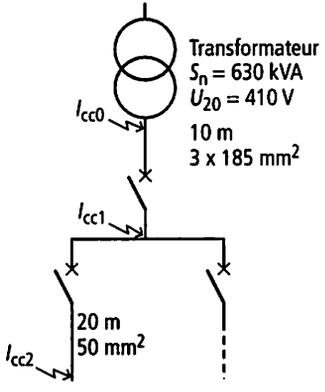
Si l'installation est alimentée par un transformateur, le courant de court-circuit le plus en amont sera pris égal au courant de court-circuit du transformateur.

Exemple :

- Pour un transformateur de 630 kVA, on a d'après ces caractéristiques un courant de court-circuit de 21,5 kA.
soit : $I_{cco} = 21,5 \text{ kA}$

- Pour un câble de section $3 \times 185 \text{ mm}^2$ et de longueur 9,5 (valeur du tableau), on obtient avec un I_{cc} amont de 20 kA un courant de court-circuit aval de 19 kA.
soit : $I_{cc1} = 19 \text{ kA}$

- Pour le dernier tronçon, on choisira une longueur de 21 m et un I_{cc} amont de 20 kA. Ceci nous donne un courant de court-circuit aval de 11 kA.
soit : $I_{cc2} = 11 \text{ kA}$



9.2. Pouvoir de coupure (I_{cu}) des disjoncteurs

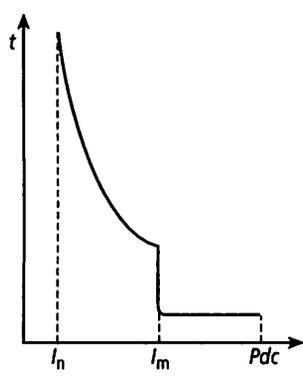
Le pouvoir de coupure est la plus grande intensité de courant de court-circuit que peut interrompre un disjoncteur sous une tension donnée.

I_n : courant nominal ou courant de réglage thermique

I_m : seuil de déclenchement du magnétique

Pdc : pouvoir de coupure

Dans une installation, il faut toujours vérifier que le pouvoir de coupure des disjoncteurs est supérieur au courant de court-circuit maximum situé en aval de celui-ci :



$Pdc = I_{cc \text{ maxi}}$

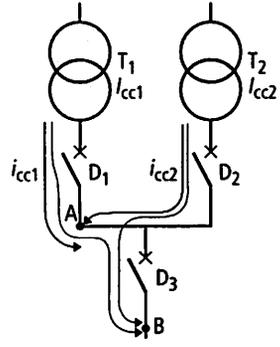
9.2. Cas de plusieurs transformateurs en parallèles

a) Cas de deux transformateurs en parallèle

Pour un court-circuit au point A, le disjoncteur D_1 doit couper le courant I_{cc1} (courant de court-circuit du transformateur T_1) et le disjoncteur D_2 le courant I_{cc2} .

Pour un court-circuit au point B le disjoncteur D_3 doit couper le courant $I_{cc1} + I_{cc2}$.

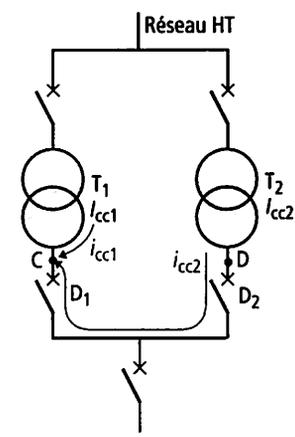
$Pdc D_3 > I_{cc1} + I_{cc2}$



Pour un court-circuit au point C, c'est le disjoncteur haute tension de T_1 qui coupera I_{cc2} . Par contre c'est le disjoncteur D_1 ou D_2 qui coupera le courant I_{cc2} . Si le court-circuit est situé au point D, le principe reste le même.

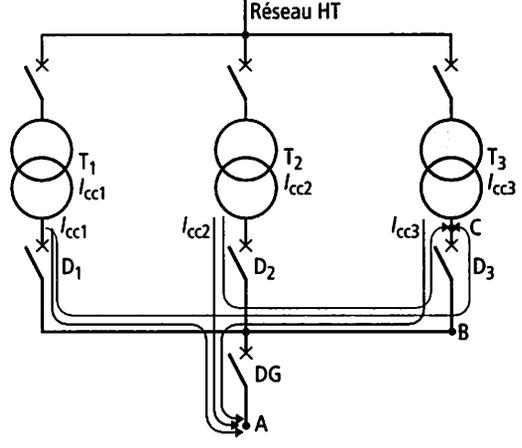
Le pouvoir de coupure du disjoncteur D_1 ou D_2 doit être supérieur au plus grand des deux courants I_{cc1} ou I_{cc2} .

$Pdc D_1 > \text{maximum de } (I_{cc1} ; I_{cc2})$



2 - Alimentation en énergie électrique

b) Cas de trois transformateurs en parallèle



• Pour un court-circuit au point A, le disjoncteur général DG doit couper le courant $I_{cc1} + I_{cc2} + I_{cc3}$.

$Pdc DG > I_{cc1} + I_{cc2} + I_{cc3}$

• Pour un court-circuit au point B, chaque disjoncteur D_1 , D_2 ou D_3 doit couper le courant de court-circuit du transformateur qui lui est associé.

Par contre, pour un court-circuit au point C, le disjoncteur D_3 doit couper le courant $I_{cc1} + I_{cc2}$. Le disjoncteur HT de T_3 s'ouvrira également.

$Pdc D_3 > I_{cc1} + I_{cc2}$

Exemple :

T_1 : transformateur de 400 kVA ; $I_{cc1} = 13,8 \text{ kA}$

T_2 : transformateur de 400 kVA ; $I_{cc2} = 13,8 \text{ kA}$

T_3 : transformateur de 250 kVA ; $I_{cc3} = 8,7 \text{ kA}$

$Pdc DG > I_{cc1} + I_{cc2} + I_{cc3}$ $Pdc DG > 36,3 \text{ kA}$

$Pdc D_1 > I_{cc2} + I_{cc3}$ $Pdc D_1 > 22,5 \text{ kA}$

$Pdc D_2 > I_{cc1} + I_{cc3}$ $Pdc D_2 > 22,5 \text{ kA}$

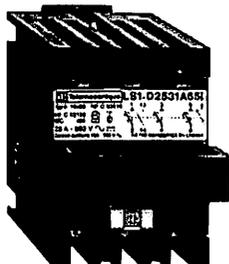
$Pdc D_3 > I_{cc1} + I_{cc2}$ $Pdc D_3 > 27,6 \text{ kA}$



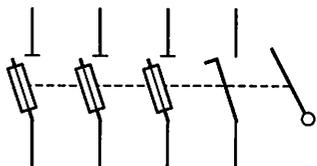
1. Les sectionneurs

Ils permettent l'isolation d'un circuit aval grâce à une coupure visible largement surdimensionnée. Ils se commandent manuellement, mais ne possèdent pas de pouvoir de coupure. Ils doivent donc être manœuvrés à vide. Les sectionneurs sont aujourd'hui souvent associés à d'autres fonctions.

1.1. Les sectionneurs-fusibles



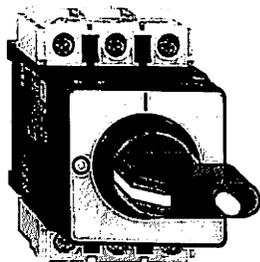
(doc. Schneider Electric)



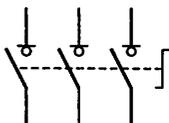
Ces appareils sont souvent associés à un départ moteur. Les fusibles assurent la protection contre les courts-circuits.

Un contact de préouverture qui s'ouvre avant les contacts de puissance permet la mise hors tension prématurée du circuit de commande et donc l'ouverture des contacteurs avant l'ouverture du sectionneur.

1.2. Les interrupteurs-sectionneurs

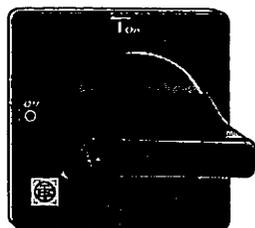


(doc. Schneider Electric)

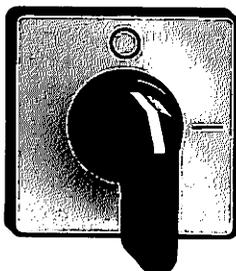


Ces sectionneurs possèdent la fonction interrupteur. Ils peuvent ouvrir ou fermer un circuit en charge selon la catégorie d'emploi AC3. On peut également leur adjoindre des contacts auxiliaires à ouverture avancée et fermeture retardée.

1.3. Les poignées de commande



Poignée condamnable (doc. Schneider Electric).



Poignée non condamnable (doc. Schneider Electric).

Si une intervention ou des travaux doivent être effectués sur une installation, celle-ci doit être consignée. Il est nécessaire d'installer un appareil condamnable par un cadenas. Cet appareil est soit un disjoncteur, soit un sectionneur. Le choix de la poignée condamnable ou non doit se faire selon la position de l'appareil dans l'installation. Une poignée condamnable étant préférable si on ne veut isoler qu'une partie de l'installation.

2. Les consignations

Une procédure de consignation comprend 4 opérations :

- séparation,
- condamnation,
- identification,
- vérification de l'absence de tension (VAT).

2.1. Séparation

Cette opération consiste à séparer l'installation de son alimentation par coupure de tous les conducteurs actifs, y compris le neutre (toutefois en régime TNC, le PEN ne doit pas être coupé). La séparation doit se faire à partir d'un appareil de sectionnement défini par la norme NF C 15-100.

La dépose de ponts, l'enlèvement de fusibles ou le retrait d'une fiche d'une prise de courant assure également une séparation certaine.

2.2. Condamnation

La condamnation a pour but d'interdire la manœuvre de l'organe de séparation. Elle consiste à :

- immobiliser l'appareil en position d'ouverture par blocage mécanique,
- placer une signalisation qui confirme que cet appareil est condamné et qu'il ne doit pas être manœuvré.

S'il n'est pas possible de réaliser un blocage mécanique, une pancarte très visible doit être apposée sur l'appareil :



La suppression d'une condamnation ne peut être effectuée que par la personne qui l'a mise en place.

2.3. Identification

L'identification permet de s'assurer que les travaux seront exécutés sur l'ouvrage dont les organes de séparation ont été condamnés.

Elle consiste en :

- une connaissance du lieu du chantier,
- une consultation des schémas, et des ouvrages,
- la lecture des pancartes, étiquettes et repères.

Une fois l'identification faite, il est nécessaire de réaliser un marquage de la zone de travail pour éviter toute confusion.

2.4. Vérification de l'absence de tension et mise à la terre et en court-circuit

La VAT doit s'effectuer au plus près de la zone de travail sur tous les conducteurs actifs y compris le neutre. Elle doit être réalisée à partir d'un appareil normalisé et une vérification du bon fonctionnement de l'appareil doit être effectuée immédiatement avant et immédiatement après l'opération.

En basse tension, la mise à la terre et en court-circuit n'est pas exigée sauf dans les cas suivants :

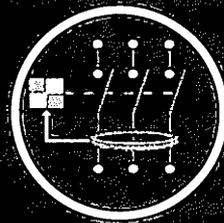
- risque de tension induite,
- risque de réalimentation,
- présence de condensateurs ou de grandes longueurs de câbles.

3. Consignation en deux étapes

Lorsque le chargé de consignation ne réalise que les deux premières opérations (séparation-condamnation), on dit que l'installation est consignée en première étape. Une attestation de première étape de consignation établi par le chargé de consignation précède les opérations 3 et 4 (identification-VAT) que doit effectuer le chargé de travaux avant le commencement des travaux.



3 - Protection et commande



Sommaire

3 - 1 - Protection des matériels

- 32. Section des conducteurs et choix des protections p. 58
- 33. Sélectivité des protections p. 63
- 34. Filiation de l'appareillage p. 65

3 - 2 - Protection des personnes

- 35. Régimes de neutre p. 67
- 36. Neutre à la terre TT p. 68
- 37. Mise au neutre TN p. 69
- 38. Neutre isolé IT p. 72

3 - 3 - Commander la puissance

- 39. Départs moteurs p. 75
- 40. Choix d'un contacteur p. 76

Les règles établies par la norme NF C 15.100 sont très complètes et permettent d'envisager tous les cas d'applications.

Cependant, les résultats de l'expérience montrent que :

- pour chaque valeur de courant, une section de conducteur usuelle est généralement adoptée ;
- à chaque section de conducteur correspond une valeur maximale d'impédance permettant de respecter une chute de tension dans un circuit donné ;
- des hypothèses simplificatrices :
 - conduisent à une protection contre les surcharges au départ de chaque circuit,
 - permettent de déterminer, pour chaque section de phase une seule section de neutre et une seule section de conducteur de protection.

L'UTE, pour les raisons évoquées ci-dessus, a été conduite à établir une méthode simplifiée qui respecte les règles de la norme NF C 15.100 avec :

1. les courants admissibles (sections 523 et 525) ;
2. la protection contre les surcharges (articles 433.2 et 532.2) ;
3. la protection contre les courts-circuits (articles 434-2 et 532-3) ;
4. les chutes de tension maximale (section 524) ;
5. la protection contre les contacts indirects (413 - 533 - 622).

L'établissement d'un avant-projet d'installation fait aussi intervenir d'autres critères tels que les conditions économiques, les besoins futurs, etc.

1. Courant maximal d'emploi : I_B

$$I_B = P_n \times a \times b \times c \times d \times e$$

Le courant maximal d'emploi est le courant correspondant à la plus grande puissance transportée par le circuit en service normal. Il peut être déterminé par la formule ci-dessus (la détermination du courant I_B fait l'objet d'une fiche du livre Électrotechnique et normalisation, vol. 3 : Installations électriques).

2. Sections des conducteurs et protections contre les surcharges

Le tableau I, donnant les sections de conducteurs et le choix des dispositifs de protection contre les surcharges en fonction du courant d'emploi, est établi sur les hypothèses suivantes :

- la température ambiante n'est pas supérieure à 30 °C, ou peut occasionnellement atteindre 40 °C ;
- le nombre de conducteurs jointifs est limité ;
- les dispositifs de protection sont placés à l'origine des circuits qu'ils protègent.

Remarques relatives à la section du neutre :

Les valeurs de la section réduite du neutre sont valables pour les circuits triphasés si :

- la puissance transportée dans le circuit est absorbée par des appareils montés entre phases ;
- le courant maximal du neutre est inférieur au courant admissible dans la section réduite du neutre.

Exemple :

- Un circuit d'éclairage demandant un I_B de 23 A nécessitera :
- une protection par fusible 32 A, section des conducteurs : 6 mm² ;
 - une protection par disjoncteur 25 A, section des conducteurs : 4 mm².

3. Calcul des chutes de tension

Entre l'origine d'une installation et son extrémité la plus éloignée, les valeurs de chutes de tension varient de 3 % à 8 %.

Pour vérifier la chute de tension dans un circuit, il faut la calculer pour chaque tronçon et ajouter ensuite toutes les valeurs obtenues.

Tableau I : les sections de conducteurs et la protection contre les surcharges fonction de I_B

	Courant d'emploi I_B ou I_n courant du dispositif de protection			Section minimale des conducteurs (mm ²)		
	Fusibles gG	Petits disjoncteurs	Disjoncteurs d'usage (*) général	Phase	Neutre	Protection ou PEN
Conducteurs en cuivre	12	15	15	1,5	1,5	1,5
	16	20	20	2,5	2,5	2,5
	20	25	25	4	4	4
	32	32	35	6	6	6
	40	47	50	10	10	10
	63	60	70	16	16	16
	80	75	90	25	25	25
	100	95	110	35	25 (**)	25
	125		130	50	35	25
	160		170	70	35	35
	160		210	95	50	50
	200		240	120	70	70
	250		270	150	70	70
	250		310	185	70	70
	315		370	240	95	95
	400		480	2 x 120	120	120
	500		550	2 x 150	150	150
500		630	2 x 185	150	150	
630		720	2 x 120	185	185	
630		820	3 x 150	185	185	
800		950	3 x 185	240	240	
Conducteurs en aluminium	32	38	40	10	10	10
	40	47	50	16	16	16
	63	60	70	25	25	25
	63	75	85	35	35	35
	80		100	50	35 (**)	35
	100		130	70	35	35
	125		160	95	50	50
	160		190	120	70	70
	160		210	150	70	70
	200		240	185	70	70
	250		290	240	95	95
	315		370	2 x 120	120	120
	315		430	2 x 150	150	150
	400		490	2 x 185	150	150
	500		560	3 x 120	185	185
	500		640	3 x 150	185	185
	630		730	3 x 185	240	240
800		860	3 x 240	240	240	

* Les valeurs du courant de réglage sont arrondies.

** Section neutre sensiblement égale à 0,5 S de phase après 35 mm² (voir remarques).

3.1. Formules utilisées pour le calcul de la chute de tension

a) Circuits monophasés

$$L = \frac{0,06 U_0 S}{2ap k_1 I_n}$$

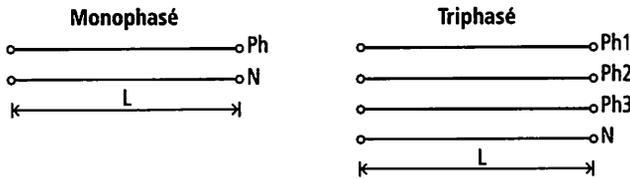
U_0 (V) : tension phase neutre
 S (mm²) : section des conducteurs
 ρ (Ω.mm²/m) : résistivité des conducteurs :
 0,0225 pour le cuivre
 0,036 pour l'aluminium

b) Circuits triphasés

$$L = \frac{0,06 U_0 S}{ap k_1 I_n}$$

$k_1 I_n$ (A) : courant de non-fonctionnement du dispositif de protection
 a : facteur tenant compte de la réactance
 0,06 : chute de tension de 6 %

c) Longueur de la canalisation



d) Mode d'emploi des tableaux II et III

Le tableau II donne les longueurs de canalisations correspondant à une chute de tension de 6 %, calculée à partir du courant d'emploi.

Pour chaque canalisation, à partir de l'origine de l'installation, le rapport de la longueur réelle L à la longueur L_{max} indiquée dans le tableau donne la valeur de la chute de tension pour cette canalisation, soit, en pourcentage :

$$u (\%) = 6 \times \frac{L}{L_{max}} \quad \text{ou} \quad u (\%) = \frac{6}{L_{max}} \times L$$

La somme de ces valeurs u %, de l'origine à l'extrémité, doit se situer selon les cas entre 3 % (éclairage) et 8 %.

Exemple 1 :

Calculer la chute de tension pour une canalisation de 16 mm², d'une longueur de 35 m, en triphasé 400 V.

Solution : le tableau II donne : $L_{max} = 160$ et $6/L_{max} = 0,037$.

D'où une chute de tension de u en % de :

$$u = 0,037 \times 35 = 1,29 \%$$

Exemple 2 :

Calculer la chute de tension pour une installation d'un éclairage alimentée par une ligne de 1,5 mm², d'une longueur de 22 m, en monophasé 230 V.

Solution : le tableau II donne : $L_{max} = 32$ m et $6/L_{max} = 0,18$.

D'où une chute de tension de u en % de :

$$u = 0,18 \times 22 = 3,96 \%$$

Ce résultat ne convient pas à première vue, car il est supérieur à 3 %.

Remarque :

Ces calculs ne tiennent pas compte de $\cos \varphi$ ni du calibre des protections, en particulier pour les courants inférieurs à 12 A.

Lorsque pour des circuits d'éclairage, les conducteurs de 1,5 mm² en cuivre sont protégés par des fusibles inférieurs à 12 A, les longueurs maximales sont données dans le tableau III.

Exemple 3 :

Reprenons les données de l'exemple 2 : Ligne de 1,5 mm², longueur de 22 m, monophasé 230 V, protection par fusible 6 A.

Solution : le tableau III nous donne : $L_{max} = 75$ m et $6/L_{max} = 0,080$.

D'où une chute de tension de :

$$u = 22 \times 0,080 = 1,76 \%, \text{ ce qui est inférieur à } 3 \%$$

Tableau II - Les chutes de tensions (méthode simplifiée d'après UTE C 15-105)

Section des conducteurs (mm ²)	Monophasé				Triphasé				
	127 V		230 V		220 V		400 V		
	L_{max}	$6/L_{max}$	L_{max}	$6/L_{max}$	L_{max}	$6/L_{max}$	L_{max}	$6/L_{max}$	
Conducteurs en cuivre	1,5	15	0,40	32	0,18	30	0,20	65	0,092
	2,5	19	0,32	40	0,15	38	0,16	80	0,75
	4	24	0,25	50	0,12	48	0,125	100	0,060
	6	25	0,24	55	0,11	50	0,12	110	0,054
	10	32	0,19	65	0,092	65	0,092	130	0,046
	16	33	0,18	80	0,075	65	0,092	160	0,037
	25	40	0,15	90	0,067	80	0,075	180	0,033
	35	45	0,13	100	0,060	90	0,067	200	0,030
	50	55	0,11	100	0,060	110	0,054	200	0,030
	70	60	0,10	100	0,060	120	0,050	210	0,028
	95	80	0,075	120	0,050	160	0,038	240	0,025
	120	80	0,075	120	0,050	160	0,038	250	0,024
	150	80	0,075	120	0,050	160	0,038	240	0,025
	185	90	0,067	120	0,050	180	0,033	250	0,024
	240	90	0,067	130	0,046	170	0,035	260	0,023
	2 x 120					160	0,038	290	0,021
	2 x 150					150	0,040	270	0,022
2 x 185					180	0,033	280	0,021	
3 x 120					150	0,040	310	0,019	
3 x 150					180	0,033	290	0,021	
3 x 185					170	0,036	300	0,020	
Conducteurs en aluminium	10	26	0,23	50	0,12	50	0,115	95	0,063
	16	33	0,18	60	0,10	65	0,091	120	0,050
	25	32	0,19	70	0,085	65	0,094	140	0,043
	35	45	0,13	80	0,075	90	0,067	160	0,037
	50	51	0,12	75	0,080	100	0,060	150	0,040
	70	55	0,11	85	0,070	110	0,054	170	0,035
	95	60	0,10	95	0,063	120	0,050	190	0,031
	120	60	0,10	100	0,060	120	0,050	210	0,028
	150	70	0,085	95	0,063	150	0,040	190	0,031
	185	70	0,085	100	0,060	140	0,043	200	0,030
	240	70	0,085	100	0,060	140	0,043	210	0,028
	2 x 120					130	0,047	230	0,026
	2 x 150					150	0,040	220	0,027
	2 x 185					140	0,043	230	0,026
	3 x 120					120	0,048	250	0,024
	3 x 150					140	0,043	230	0,026
	3 x 185					130	0,047	240	0,025
3 x 240					130	0,047	260	0,023	

Le tableau II donne les longueurs maximales de canalisations en mètres correspondant à une chute de tension de 6 %.

Le rapport $6/L_{max}$ permet de calculer la valeur u % d'un tronçon quelconque.



3 - Protection et commande

Tableau III - Les chutes de tensions

Courant nominal du fusible I_n (A)	Monophasé				Triphasé			
	127 V		230 V		220 V		400 V	
	L_{max}	$6/L_{max}$	L_{max}	$6/L_{max}$	L_{max}	$6/L_{max}$	L_{max}	$6/L_{max}$
2	85	0,07	230	0,026	170	0,035	460	0,013
4	42	0,14	110	0,054	85	0,07	230	0,026
6	28	0,21	75	0,080	55	0,11	150	0,040
8	21	0,28	60	0,100	42	0,14	120	0,050

Le tableau III est à employer uniquement dans les cas de conducteurs cuivre de 1,5 mm² protégés par des fusibles de courant nominal inférieur à 12 A (circuit éclairage).

4. Courant de court-circuit

Le pouvoir de coupure d'un dispositif de protection doit être au moins égal au courant de court-circuit présumé à son point d'installation.

4.1. Évaluation du courant de court-circuit

Connaissant le courant de court-circuit à l'origine d'une installation, les tableaux des courants de court-circuit permettent de connaître le courant de court-circuit à l'extrémité d'une canalisation de section et de longueur données.

a) Alimentation de l'installation par un transformateur

La valeur prise par le courant de court-circuit à l'origine (I_{cc0}) est donnée par le tableau suivant :

P (kVA)		25	50	63	80	100	160	200	250
I_{cc0} (kA)	127-220	1,2	2,5	3,1	4	5	8	10	12
	230-400	1,72				3,43	5,49	6,85	8,58

P (kVA)		315	400	500	630	800
I_{cc0} (kA)	127-220	16	20	25	31	40
	230-400	10,80	13,72	17,15	21,60	24,40

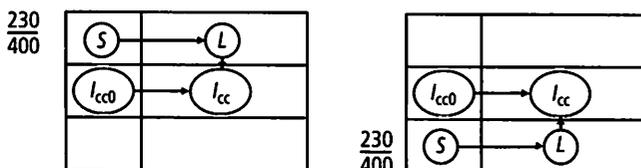
Ces valeurs sont basées sur un courant de court-circuit égal à 20 fois le courant nominal du transformateur.

b) Alimentation de l'installation par plusieurs transformateurs

Si les transformateurs fonctionnent en parallèle, le courant de court-circuit est pris égal à la somme des courants de court-circuit de chaque transformateur.

4.2. Mode d'emploi du tableau IV

- On choisit le tableau du haut si l'on est en 230/400 cuivre et le tableau du bas si l'on est en 230/400 aluminium.
- On part de la section de la canalisation (cuivre ou aluminium) ;
- Sur la ligne de la section, on cherche la valeur immédiatement inférieure à la longueur réelle, puis on se déplace verticalement vers la partie centrale du tableau jusqu'à la ligne correspondant à la valeur de I_{cc0} du circuit considéré.



Exemple :

Une installation d'atelier est alimentée par un poste de transformation avec un transformateur de 250 kVA, sortie en 230-400 V. Un départ alimente un moteur triphasé $I_B = 180$ A. Déterminer la section de la ligne et sa protection (ligne en cuivre de 50 m de longueur).

Solutions :

Il faut déterminer la section du câble puis sa protection :

• Protection par fusible :

- Section du câble : le tableau I donne pour $I_B = 180$ A, un câble triphasé 5 ph = 120 mm², neutre ou PE 70 mm².

- Courant de court-circuit à l'origine : il est fonction de la puissance du transformateur, le tableau du paragraphe 4.1.a) donne pour 250 kVA, réseau 230-400 V → $I_{cc0} = 8,58$ kA.

Courant de court-circuit à couper par les fusibles : on utilise le tableau III, partie 230-400 V avec 120 mm² Cu ; on suit la ligne horizontale jusqu'à la longueur la plus proche de la ligne existante 46 < 50 m ; à la case 46 m, on se dirige verticalement vers le bas, dans la partie centrale et à l'intersection avec la ligne I_{cc} amont 9,5 kA. On obtient la valeur du courant de court-circuit que devra couper le fusible, soit 15 kA.

• Protection par disjoncteur :

- Section du câble : le tableau I donne pour $I_B = 180$ A soit $I_n = 210$ A ; câble triphasé 95 mm² cuivre, section neutre 50 mm².

- Courant de court-circuit : le tableau III donne pour 230-400 V et 95 mm² cuivre, horizontalement 50 m.

Pour I_{cc} amont 10 kA, à l'intersection avec la verticale passant par 50 on obtient aussi un pouvoir de coupure du disjoncteur de 6,5 kA.

5. Protection contre les contacts indirects

Dans les régimes de neutre TN et IT dont les dispositifs de protection assurent également la protection contre les contacts indirects, il faut s'assurer que la longueur de la canalisation soit telle que, en cas de défaut, la tension de contact reste toujours inférieure à U_L .

5.1. Méthode de calcul

a) Schéma TN

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

L : longueur de la canalisation (m)
 S : section canalisation (mm²)
 ρ : cuivre 0,0225 Ωmm²/m, aluminium 0,036 Ωmm²/m

b) Schéma IT

Pour le schéma IT, il a été tenu compte par rapport au schéma TN des facteurs de réduction suivants :

Protection par	fusible	disjoncteur
neutre non distribué	1	0,86
neutre distribué	0,89	0,50

5.2. Précautions d'emploi des tableaux

- Les longueurs indiquées ne sont valables que si le conducteur de protection fait partie de la même canalisation que les conducteurs actifs du circuit.
- Les valeurs des tableaux sont données pour $U_L = 50$ V. Pour $U_L = 25$ V, les longueurs doivent être divisées par 2.
- Ces longueurs sont applicables seulement aux circuits terminaux ; en revanche, au niveau de l'origine des circuits, une liaison équipotentielle doit être réalisée.

Tableau V : Protection contre les contacts indirects - longueurs maximales de canalisations (en mètres) (D'après UTE C 15-105)

	Section des conducteurs (mm ²)		Schéma TN					Schéma IT neutre non distribué					Schéma IT neutre distribué				
	Phase	Protection ou PEN	Fusibles		Petits (1) disjoncteurs		Disjoncteurs d'usage général	Fusibles		Petits (1) disjoncteurs		Disjoncteurs d'usage général	Fusibles		Petits (1) disjoncteurs		Disjoncteurs d'usage général
			gG gl	aM	U (1)	L (1)		gG gl	aM	U (1)	L (1)		gG gl	aM	U (1)	L (1)	
Conducteurs en cuivre	1,5	1,5	90	37	50	120	50	75	38	47	100	44	55	27	27	60	26
	2,5	2,5	75	49	70	160	60	65	42	60	140	55	45	30	36	80	32
	4	4	100	60	90	210	80	85	50	80	180	70	60	38	46	100	41
	6	6	90	55	100	250	85	80	50	90	210	75	55	35	50	120	44
	10	10	120	75	120	280	100	100	65	100	240	85	75	47	60	140	50
	16	16	150	75	150	350	120	130	65	130	300	100	90	47	75	170	60
	25	25	150	95	190	440	140	120	85	160	380	120	90	55	95	220	70
	35	25	110	75	150	350	110	95	65	130	300	100	65	47	75	170	55
	50	25	110	80			100	100	70			90	70	49			50
	70	35	120	70			110	110	60			95	75	44			55
	95	50	140	100			130	120	90			110	85	60			65
	120	70	140	110			150	120	100			130	85	70			75
	150	70	110	90			140	100	75			120	70	55			70
	185	70	65	100			140	55	85			110	40	60			70
	240	95	130	110			160	120	95			130	80	65			80
	300	150	190	120			190	160	100			160	110	75			95
	2 x 120	120	150	100			150	130	85			130	90	60			75
	2 x 150	150	150	120			170	130	100			140	90	75			85
2 x 185	150	100	95			140	90	80			120	60	55			70	
3 x 120	185	130	120			170	110	100			140	75	70			85	
Conducteurs en aluminium	2,5	2,5	90	38	55	130	50	80	33	49	110	46	55	23	28	65	27
	4	4	75	49	70	160	60	65	42	60	140	55	47	30	36	80	32
	6	6	95	55	85	200	75	80	50	75	170	65	55	35	43	100	38
	10	10	95	60	95	220	80	80	50	80	180	65	55	37	48	110	40
	16	16	120	75	120	280	100	100	65	100	240	85	75	47	60	140	50
	25	25	110	75	150	340	110	100	65	120	290	95	70	46	75	170	55
	35	35	130	85	160	380	130	110	70	140	330	110	75	50	80	190	65
	50	35	95	65			90	80	55			75	55	41			45
	70	35	95	70			90	80	60			80	55	43			46
	95	50	110	80			110	95	70			95	65	49			55
	120	70	120	90			130	100	75			110	70	55			65
	150	70	120	70			110	100	60			95	70	44			55
	185	70	100	80			110	90	70			85	60	49			55
	240	95	110	85			130	95	75			110	65	50			65
	300	150	150	120			160	130	100			130	80	70			80
	2 x 120	120	120	100			120	100	90			110	70	60			60
	2 x 150	150	120	95			130	100	80			110	70	55			65
	2 x 185	150	120	95			120	100	65			100	70	47			60
3 x 120	185	110	95			140	100	80			120	70	55			70	

(1) Lorsque les petits disjoncteurs sont des types B, C et D conformes à la norme NF C 61-410 (ou EN 60-898), les valeurs correspondantes sont celles des colonnes « disjoncteurs d'usage général » multipliées par 2 pour le type B, par 1 pour le type C, et par 0,5 pour le type D. Le courant assigné de ces petits disjoncteurs ne dépasse pas 125 A.

Tableau VI : Annexe : sections minimales des conducteurs de liaison entre transformateur et tableau principal (mm²) câbles isolés PRC 20 m maxi.

Puissance nominale du transformateur (kVA)	Nombre de conducteurs en cuivre						Nombre de conducteurs en aluminium					
	Phase				Neutre		Phase				Neutre	
	1	2	3	4	1	2	1	2	3	4	1	2
25	6				6		10				10	
50	16				16		25				25	
80	35				25		50				35	
100	50				25		70				35	
160	95				50		150				70	
200	120				70		185				70	
250	185				70		300				120	
315	240	120			120			120			150	
400		150			150			150			240	
500		240	120		240	120		185	150		300	150
630		300	185	120	300	150		300	185			185
800			300	185		185			300			300

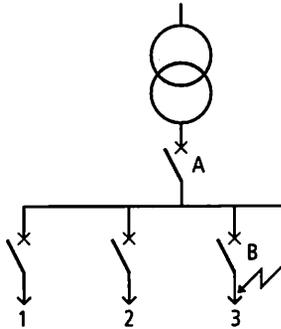
Dans une installation électrique comportant plusieurs niveaux de protection, il faut qu'en cas de défaut, toute l'installation ne soit pas coupée, mais que seule la partie étant le siège de la perturbation soit mise hors circuit, cela afin de perturber le moins possible les activités des entreprises ou des personnes.

1. Notion de sélectivité

La continuité de la distribution dans une installation électrique est directement liée à la sélectivité des protections.

Exemple :

Soit le poste de distribution comportant un transformateur et 3 départs.



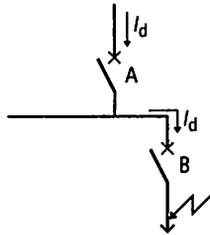
Il y a continuité si le défaut sur le départ 3 est éliminé : le disjoncteur B s'ouvre sans que le disjoncteur A déclenche.

Dans le cas où le défaut sur 3 provoque l'ouverture de B et de A il n'y a plus sélectivité.

Pour obtenir une sélectivité, on peut agir sur les dispositifs de protection, soit par le réglage des calibres intensité des protections : c'est la sélectivité ampèremétrique, soit par un décalage dans le temps des systèmes de coupure : c'est la sélectivité chronométrique.

2. Définitions

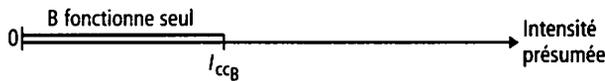
2.1. Sélectivité totale



Deux appareils de protection placés en série parcourus par le même courant de défaut :

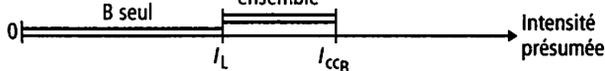
A en amont
B en aval

A et B sont sélectifs entre eux pour un défaut d'intensité donnée I_d si celui-ci est éliminé par B et uniquement par B.



2.2. Sélectivité partielle

A et B fonctionnent ensemble



I_L = Intensité limite de sélectivité entre A et B.

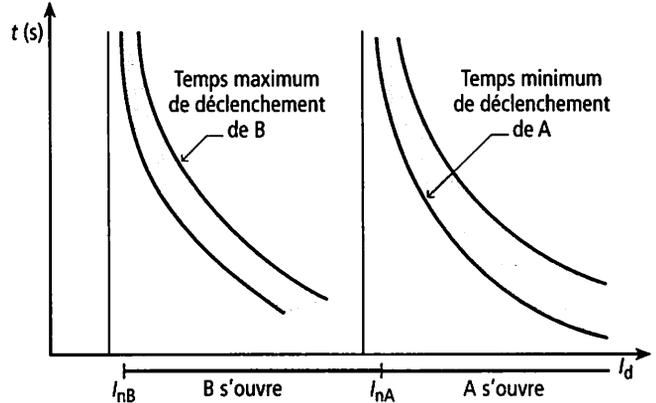
B fonctionne seul pour un courant de court-circuit présumé inférieur à I_L . Au-delà de cette valeur A, B fonctionnent simultanément.

3. Sélectivité ampèremétrique

3.1. Cas de surcharges

La sélectivité est réalisée si les courbes de déclenchement thermique ne se chevauchent pas.

Ce cas est pratiquement toujours réalisé du fait de l'échelonnement des intensités distribuées à chaque niveau, entre le poste de distribution et les récepteurs.



3.2. Cas des courts-circuits

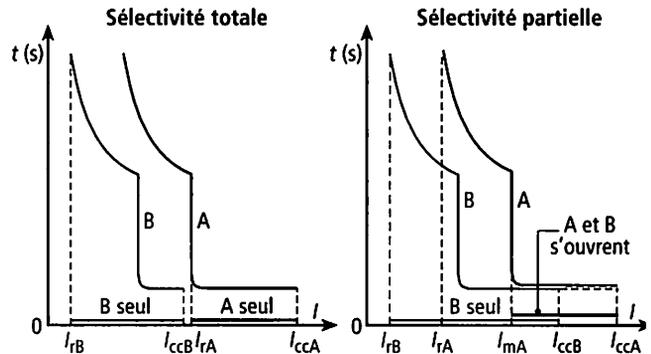
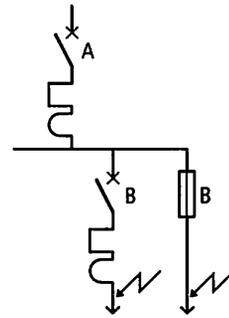
La sélectivité est liée aux réglages des déclencheurs magnétiques.

a) Principe

Pour réaliser la sélectivité sur un court-circuit entre un disjoncteur amont (A) et un disjoncteur aval (B) ou des fusibles, on part de l'intensité de réglage du disjoncteur amont.

Deux cas peuvent se produire :

La sélectivité est totale, ou la sélectivité est partielle.



b) Réalisation

On utilise des disjoncteurs rapides et on opère sur le réglage de l'intensité de déclenchement des relais magnétiques (I_{rm}) des disjoncteurs A (I_{rma}) et B en aval (I_{rmb}).

La sélectivité totale est souvent impossible à réaliser, car l'écart entre I_{cca} et I_{ccb} est généralement insuffisant.

Dans ce cas la sélectivité est partielle et limitée à l'intensité de réglage magnétique du disjoncteur amont.



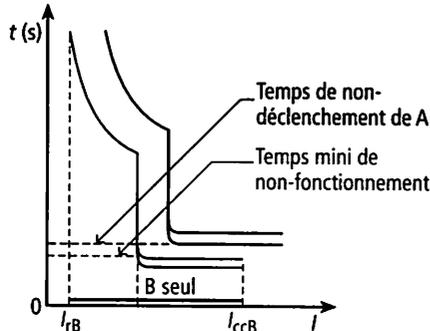
3 - Protection et commande

4. Sélectivité chronométrique

4.1. Principe

On retarde le déclenchement du disjoncteur amont par rapport à celui du disjoncteur aval.

Le disjoncteur amont est appelé **disjoncteur sélectif**.

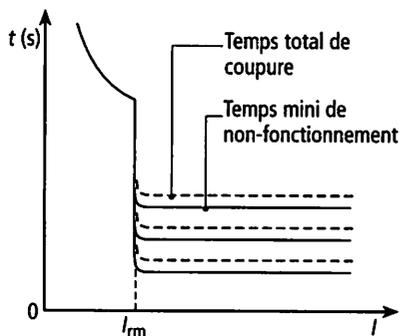


4.2. Réalisation

Le disjoncteur sélectif est muni d'une temporisation réglable à plusieurs crans.

On distingue le temps total de coupure et le temps minimal de fonctionnement.

Un disjoncteur sélectif peut posséder jusqu'à 4 crans de réglage.



5. Choix des dispositifs de protection

Pour la protection contre les surcharges et les courts-circuits on utilise essentiellement des fusibles et des disjoncteurs.

5.1. Fusibles

- **Type gG** : protège contre les surcharges et les courts-circuits.
- **Type aM** : accompagnement moteur, protège uniquement contre les courts-circuits.

L'examen des courbes de fusion des fusibles, $t = f(I_f)$, permet de définir les temps de coupure des fusibles et de les comparer aux temps de déclenchement des disjoncteurs.

5.2. Disjoncteurs

Le relais thermique protège contre les surcharges, le relais magnétique protège contre les courts-circuits.

Il existe trois types principaux de disjoncteurs :

a) Disjoncteurs rapides

Ils disposent d'un déclencheur instantané et leurs temps d'ouverture sont très courts ($t < 25$ ms).

b) Disjoncteurs sélectifs

Ils sont pourvus de déclencheurs temporisés permettant de régler leur temps de fonctionnement lors de l'apparition d'un défaut. Les retards à l'ouverture sont de l'ordre de 30 ms à 500 ms selon réglage.

c) Disjoncteurs limiteurs

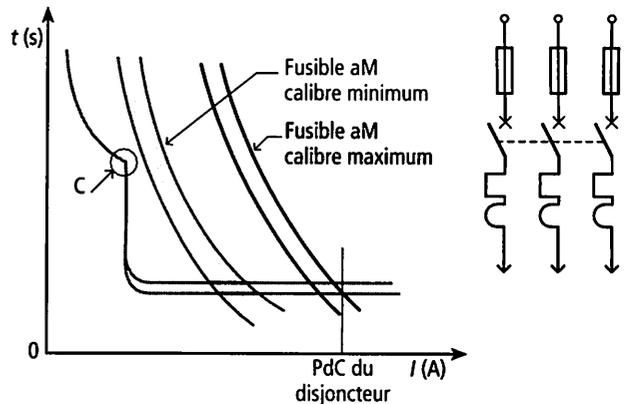
Ils utilisent l'impédance de l'arc pour limiter la valeur du courant de court-circuit au moment de la coupure.

Leurs temps d'ouverture sont inférieurs à 15 ms.

6. Association fusibles-disjoncteur

Pour protéger plusieurs départs ou pour répondre aux exigences de certaines installations, on peut associer des fusibles à un disjoncteur.

La courbe de fusion du fusible aM ou gI du fusible doit se trouver au-delà du point C (point de rencontre des courbes relais thermique, relais magnétique).



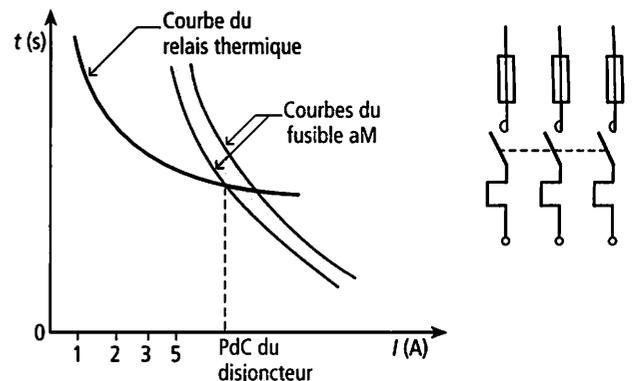
Remarques :

- Le fusible aM ne protège pas contre les surcharges.
- Les fusibles doivent être placés en amont du disjoncteur, car ils ont un plus grand pouvoir de coupure que le disjoncteur.
- Il ne faut pas mettre de fusible sur le conducteur neutre.

7. Association discontacteur-fusibles

Pour la commande des moteurs, on associe un relais thermique à un contacteur pour obtenir un discontacteur.

Le discontacteur a un pouvoir de coupure compris entre 7 et 15 fois l'intensité nominale, ce qui n'est pas suffisant sur certaines installations. Il doit donc être associé à des fusibles type aM qui interviennent au-delà du pouvoir de coupure du discontacteur et évitent ainsi sa détérioration.



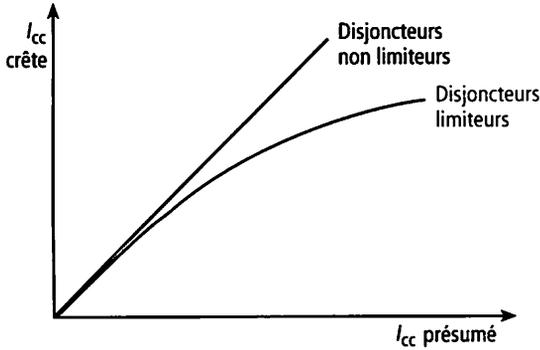
Au point de rencontre des courbes relais thermique et fusion des fusibles, on a une valeur de courant qui doit être au plus égale au pouvoir de coupure du contacteur, sinon il y a risque de détérioration des pôles du contacteur.

La tendance est à remplacer les ensembles fusibles-contacteur-relais thermique par des disjoncteurs-moteur associés à un contacteur, ou encore par un disjoncteur contacteur qui regroupe les fonctions précédentes.

1. Disjoncteur limiteur

La limitation du courant de court-circuit est réalisée par l'apparition d'un arc électrique entre les contacts lors de l'ouverture du disjoncteur.

- La limitation est d'autant plus grande que :
 - le temps d'intervention du déclencheur est court ;
 - la croissance de la tension d'arc est rapide ;
 - la valeur maximale de la tension d'arc est grande.



2. La filiation

C'est l'utilisation d'un disjoncteur limiteur en amont qui permet d'installer un disjoncteur aval avec un pouvoir de coupure inférieur au courant de court-circuit présumé en son point d'installation.

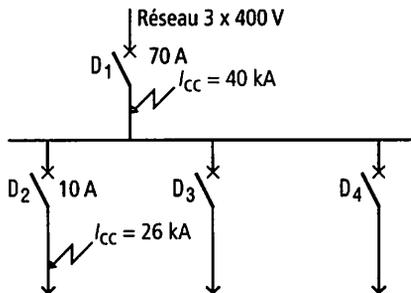
Le pouvoir de coupure du disjoncteur limiteur doit rester supérieur au courant de court-circuit à ses bornes. Un disjoncteur limiteur permet une filiation avec tous les disjoncteurs placés en aval.

La filiation permet de renforcer le pouvoir de coupure des disjoncteurs aval, d'où un gain financier important.

La filiation est vérifiée en laboratoire par les constructeurs et les pouvoirs de coupures renforcés selon les associations sont donnés par des tableaux (voir tableau I, page 66).

2.1. Filiation à 2 étages

Le schéma suivant indique les intensités nominales et les courants de court-circuit

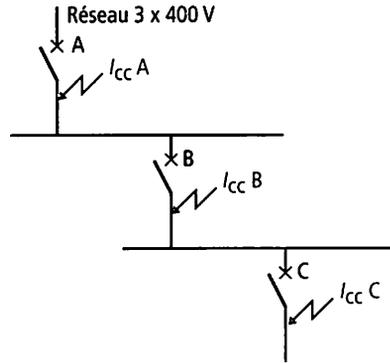


En utilisant les données du tableau de filiation page 66, on trouve :

- D_1 : NS 100 H Pouvoir de coupure : 70 kA ($Pdc > 40$ kA).
- Si l'on n'utilise pas la filiation, il faut choisir pour D_2 un disjoncteur de calibre 10A ayant un pouvoir de coupure supérieur à 26 kA. Dans la gamme Schneider ceci nous conduit à choisir un disjoncteur NC100LH calibre 10 A et Pdc de 50 kA.
- En utilisant le tableau de filiation, dans la colonne du disjoncteur NS100H on peut choisir pour le disjoncteur aval un C60N qui a un pouvoir de coupure renforcé de 30 kA ($Pdc r > 26$ kA). On note que le C60N utilisé seul n'a qu'un pouvoir de coupure de 10 kA.
- D_2 : C60N calibre 10A Pdc renforcé par filiation à 30 kA.

- La technique de filiation est très intéressante pour les départs de faible intensité directement reliés à un point où le courant de court-circuit présumé est élevé. La filiation s'étend également aux disjoncteurs D_3 et D_4 .

2.2. Filiation à trois étages



La filiation est assurée entre les 3 disjoncteurs A, B et C, si l'une OU l'autre des conditions suivantes est vérifiée :

- La filiation est assurée entre A et B ET entre A et C
- OU
- La filiation est assurée entre A et B ET entre B et C

Exemple 1 :

Disjoncteur	I_{cc} (kA)	Pdc (kA)	Pdc renforcé (kA)		
			A - B	A - C	B - C
A : NS250L	80	150	-	-	-
B : NS100N	50	25	150	-	-
C : C60N	26	10	-	30	25

Pdc renforcé de B = 150 kA supérieur à I_{ccb} .
 Pdc renforcé de C = 30 kA (filiation A-C) supérieur à I_{ccc} .
 L'association des 3 disjoncteurs est correcte car la première condition est vérifiée, même si la seconde ne l'est pas.

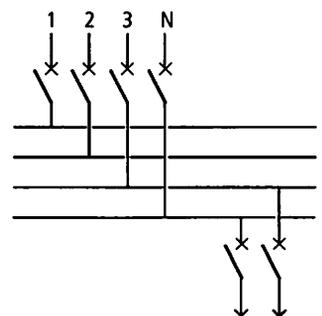
Exemple 2 :

Disjoncteur	I_{cc} (kA)	Pdc (kA)	Pdc renforcé (kA)		
			A - B	A - C	B - C
A : NS400H	50	70	-	-	-
B : NS100N	40	25	70	-	-
C : C60N	15	10	-	NON	25

Pdc renforcé de B = 70 kA supérieur à I_{ccb} .
 Pdc renforcé de C = 25 kA (filiation B-C) supérieur à I_{ccc} .

L'association des 3 disjoncteurs est correcte car la deuxième condition est vérifiée, même si la première ne l'est pas.

Dans le cas d'utilisation d'un disjoncteur monophasé 230 V en aval d'un réseau triphasé 400 V, il faut utiliser les tableaux de filiation pour réseau 230 V.



3 - Protection et commande

Tableau I - Tableau de filiation, réseau 380/415 V (d'après Schneider)

Amont : Compact NS
Aval : Compact et Multi 9

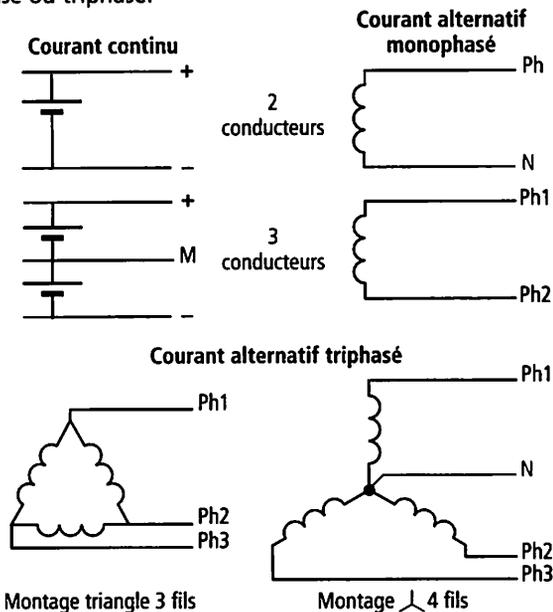
disjoncteur amont 380/415 V kA eff									
150				NS100L			NS160L		NS250L
70									
65			NS100H				NS160H		NS250H
50									
45									
36									
30	NS125N					NS160N		NS250N	
25									
16			NS100N						
disjoncteur aval kA eff									
150				NS100N NS100H C101N C101H NC100LH NC100LMA GV3M Intégral 18 Intégral 32 Intégral 63			NC100LH NC100LMA NS100N NS100H NS160N NS160H C101N C101H C161N C161H GV3M Intégral 18 Intégral 31 Intégral 63		NC100LH NC100LMA NS100N NS100H NS160N NS160H NS250N NS250H C101N C101H C161N C161H C250N C250H GV3M Intégral 32 Intégral 33
70			NC100LH NC100LMA NS100N GV3M Intégral 18 Intégral 32 Intégral 63			NC100LH NC100LMA NS100N NS160N C101N C101H C161N C161H Intégral 18 Intégral 32 Intégral 63		NC100LH NC100LMA NS100N NS160N NS250N C101N C101H C161N C161H C250N C250H Intégral 32 Intégral 63	
65									
50			GV2M P25M	GV2M P25M		NSA125N GV2M P25M	NSA125N GV2M P25M		NSA125N NSA125N
45									
42									
40			C60H C60L	C60H C60L		C60L	C60L		C60L≤40A C60L≤40A
35/36						NSA125N NS100N C101N C161N		NSA125N NS100N C101N C161N C250N	
30			C60N NC100H SC/XC40	C60N NC100H SC/XC40	C60H C60L	C60N C60H NC100H NS125E SC/XC40	C60N C60H NC100H NS125E SC/XC40	C60H C60L	C60N C60H C60L≤63A NC100H NS125E SC/XC40
25	C60N C60H C60L NC100H	C60N C60H C60L NC100H SC/XC40 GV2M P25M			C60N NC100H NS125E SC/XC40			C60N NC100H NS125E SC/XC40	
20			C60a	C60a		C60a			C60a
15	C60a				C60a			C60a	
10			C60a						

Les réseaux de distribution sont caractérisés essentiellement par la nature du courant et le nombre de conducteurs actifs, ainsi que par les liaisons à la terre ou régimes de neutre.

La sécurité des personnes et du matériel est assurée différemment en fonction du régime de neutre utilisé dans une installation électrique.

1. Différents systèmes de distribution

Les réseaux ou installations basse tension les plus courants sont réalisés en fonction de l'alimentation des récepteurs, soit en courant continu, soit en courant alternatif monophasé ou triphasé.



2. Les trois régimes de neutre

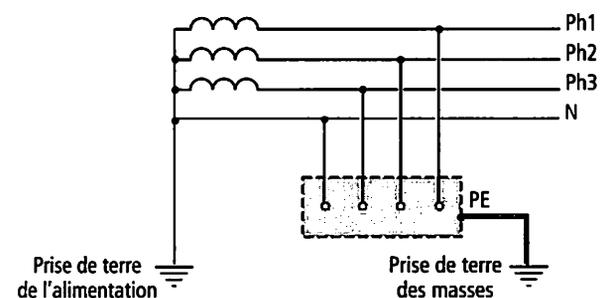
La norme C 15.100 définit trois régimes de neutre qui sont caractérisés par deux lettres :

- **1^{re} lettre** : Situation de l'alimentation par rapport à la terre :
T : liaison d'un point avec la terre ;
I : isolation de toutes les parties actives par rapport à la terre, ou liaison d'un point avec la terre à travers une impédance.
- **2^e lettre** : Situation des masses de l'installation par rapport à la terre :
T : masses reliées directement à la terre ;
N : masses reliées au neutre de l'installation, lui-même relié à la terre.

2.1. Neutre à la terre : TT

Le neutre de l'alimentation est relié à la terre. Les masses de l'installation sont aussi reliées à la terre. Cette solution simple à l'étude et à l'installation est celle qui est employée par EDF pour les réseaux de distribution basse tension.

Aussitôt qu'un défaut d'isolement survient, il doit y avoir coupure : c'est la coupure au premier défaut.

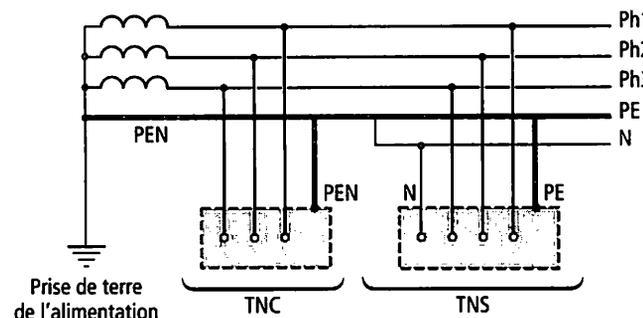


2.2. Mise au neutre : TN

Le neutre de l'alimentation est relié à la terre et les masses sont reliées au neutre.

a) Schéma TNC

Le neutre et le conducteur de protection sont confondus. Ce type de schéma est interdit pour des sections de conducteurs inférieures à 10 mm² ; en aval du schéma TNS, on utilise l'appareillage tripolaire.



b) Schéma TNS

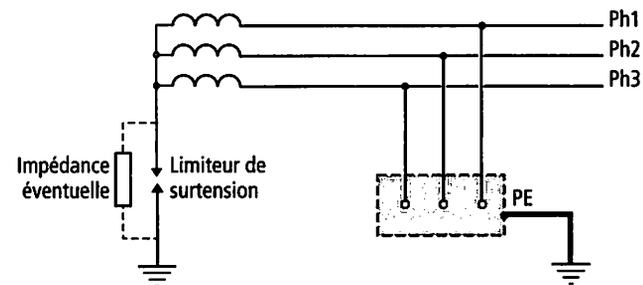
Le neutre et le conducteur de protections ont séparés. Il faut utiliser des appareils tétrapolaires.

Dans les deux cas, la protection doit être assurée par coupure au premier défaut.

2.3. Neutre isolé : IT

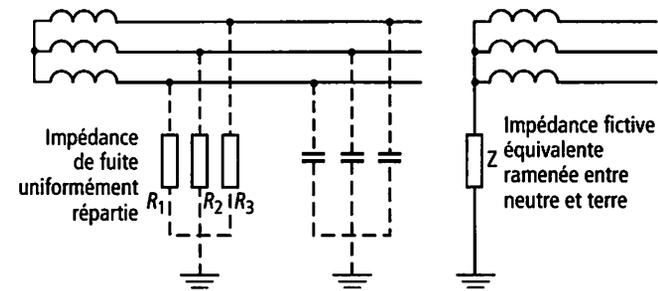
Le neutre est isolé ou relié à la terre par une assez forte impédance (1 500 à 2 200 Ω).

Le premier défaut ne présente pas de danger. Le courant phase-masse est très faible et aucune tension dangereuse n'est à craindre. Mais il doit être signalé et recherché pour être éliminé. La coupure est obligatoire au deuxième défaut.



Remarque :

À partir d'une certaine extension (environ 1 km), un réseau triphasé présente des résistances de fuite et des capacités par rapport à la terre, uniformément réparties.



Les résistances R_1 , R_2 , R_3 et les capacités C_1 , C_2 , C_3 peuvent être représentées par une impédance équivalente Z ramenée entre neutre et terre ($Z \approx 3$ ou $4\ 000\ \Omega$ pour un réseau de 1 km).



3 - Protection et commande

Le système de distribution TT est le régime de neutre employé par EDF pour toute la distribution d'énergie publique du réseau basse tension.

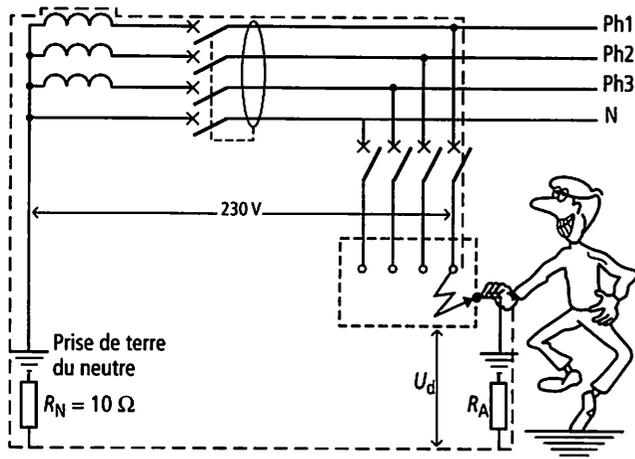
1. Principe

Dans ce système de distribution :

- le neutre de la source d'alimentation est mis à la terre ;
- les masses sont reliées entre-elles et mises à la terre.

Exemple :

Soit le réseau TT de distribution ci-dessous.



Lorsqu'une phase touche la masse, il y a élévation du potentiel de cette masse.

Soit : R_d = résistance de défaut = 0Ω .

R_N = résistance de la prise de terre du neutre = 10Ω

R_A = résistance de la prise des masses = 20Ω

Il s'établit dans le circuit en pointillés rouges un courant :

$$I_d = \frac{230}{R_d + R_N + R_A} = \frac{230}{0 + 10 + 20} = 7,66 \text{ A}$$

La tension de la masse par rapport à la terre sera :

$$U_d = R_A \times I_d = 20 \times 7,66 = 153,3 \text{ V (tension mortelle)}$$

Lorsque, dans un réseau TT, survient un défaut d'isolement, il y a une élévation dangereuse du potentiel des masses métalliques (qui habituellement sont au potentiel 0 volt).

2. Règles à observer

• 1^{re} règle :

Toutes les masses des matériels protégés par un même dispositif de protection doivent être interconnectées et reliées par un conducteur de protection (PE) à une même prise de terre.

• 2^e règle :

La condition de protection doit satisfaire à la relation suivante :

$$R_A I_a \leq U_L \quad I_a : \text{courant de fonctionnement du dispositif de protection (A) ;}$$

R_A : résistance de la prise de terre des masses ;

Tension limite $U_L = 50 \text{ V}$ ou 25 V ou 12 V selon les locaux.

• 3^e règle :

Dans les schémas TT, on assurera la protection par un dispositif courant différentiel résiduel. Dans ce cas, le courant I_a est égal au courant différentiel résiduel du disjoncteur.

La sensibilité d'un disjoncteur différentiel résiduel est indiquée par le symbole $I_{\Delta n}$, qui indique le système de protection, lequel peut être un interrupteur ou un disjoncteur.

3. Choix des caractéristiques de disjoncteurs

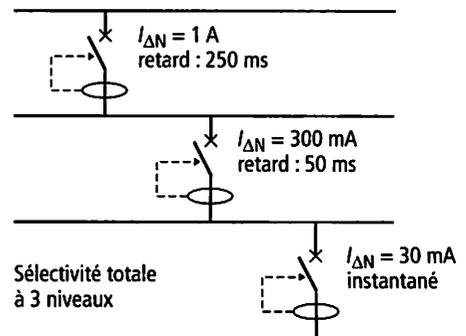
Courant nominal du dispositif différentiel ($I_{\Delta n}$)	Résistance maximale de la prise de terre	
	$U_L = 50 \text{ V}$	$U_L = 25 \text{ V}$
3 A	16 Ω	8 Ω
1 A	50 Ω	25 Ω
500 mA	100 Ω	50 Ω
300 mA	166 Ω	83 Ω
30 mA	1 660 Ω	833 Ω

La résistance de la prise de terre doit toujours vérifier la relation :

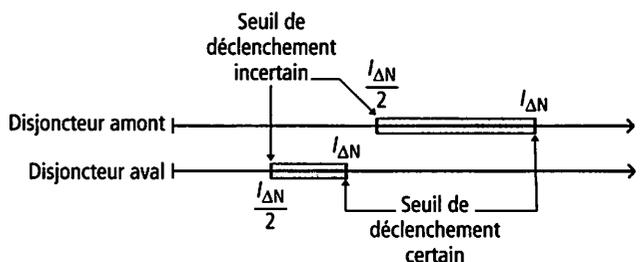
$$R_a \leq \frac{U_L}{I_{\Delta n}}$$

$I_{\Delta n}$: calibre du dispositif différentiel placé en tête d'installation.

4. Sélectivité des déclencheurs différentiels



a) Sélectivité ampèremétrique



La sélectivité ampèremétrique est assurée si :

$$I_{\Delta n} \text{ disjoncteur aval} \leq \frac{I_{\Delta n}}{2} \text{ disjoncteur amont}$$

b) Sélectivité chronométrique

La sélectivité chronométrique est obtenue en retardant le dispositif différentiel placé en amont.

Le disjoncteur différentiel peut avoir un retard fixe (type S : 50 ms) ou réglable par crans.

La sélectivité chronométrique est assurée si :

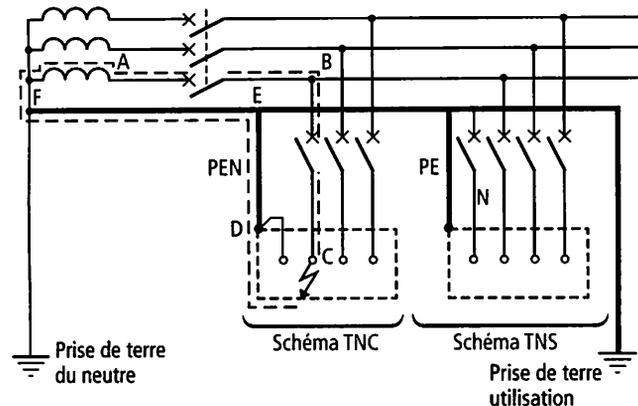
$$\text{Temps de retard du disjoncteur amont} \geq \text{temps d'ouverture du disjoncteur aval}$$

1. Principe

Le neutre de l'alimentation est mis à la terre et les masses sont reliées au neutre ; ainsi, tout défaut d'isolement est transformé en un défaut entre phase et neutre.

1.1. Exemple

Le défaut entre C et la masse se referme par le circuit DEF du conducteur de protection électrique PEN :



On appelle **boucle de défaut** le circuit A, B, C, D, E, F. Les fusibles ou disjoncteurs doivent assurer la protection et couper le circuit dans un temps inférieur à celui défini par la courbe de sécurité.

- **Schéma TNC** : masses reliées au neutre, et neutre relié à la terre. Le conducteur neutre et la protection électrique sont communs (PEN).

Le conducteur PEN doit être raccordé aux masses des récepteurs ; il ne doit pas être coupé, ni comporter d'appareillage (appareils de protection uniquement tripolaire).

- **Schéma TNS** : le conducteur neutre est séparé d'avec le conducteur de protection électrique PE.

En schéma TNS, le conducteur PE n'est pas coupé, mais le neutre peut être coupé ; on utilise un appareillage tétrapolaire.

Un schéma TNS peut suivre un schéma TNC, mais on ne doit pas reprendre ensuite en TNC.

Ce type de schéma est obligatoire pour les sections inférieures à 10 mm² en cuivre (16 mm² en aluminium) et pour les canalisations mobiles.

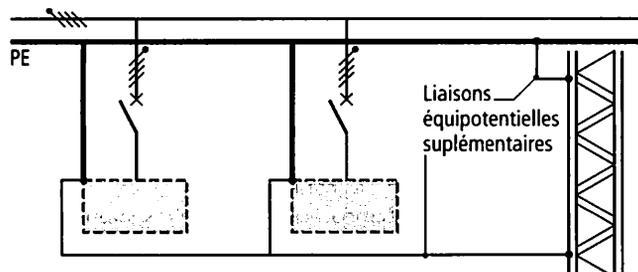
- **Explication de la protection :**

Lorsqu'un défaut d'isolement survient entre une phase et la masse, le fait que cette masse soit reliée au neutre produit une forte différence de potentiel. Celle-ci a tendance à provoquer le claquage de l'isolant et à transformer le défaut d'isolement en un court-circuit phase-neutre.

L'élévation du potentiel de la masse devient rapidement dangereuse et les systèmes de protection contre les surintensités (fusibles-disjoncteurs) doivent couper le circuit dans le temps défini par les courbes de sécurité.

1.2. Liaisons équipotentielles

Elles assurent les liaisons électriques entre les masses et permettent de rendre encore moins résistante la boucle de défaut.



2. Courbes de sécurité

Le normalisateur, utilisant les travaux réalisés dans le domaine médical sur les courants dangereux pour le corps humain, a défini des courbes de sécurité qui tiennent compte :

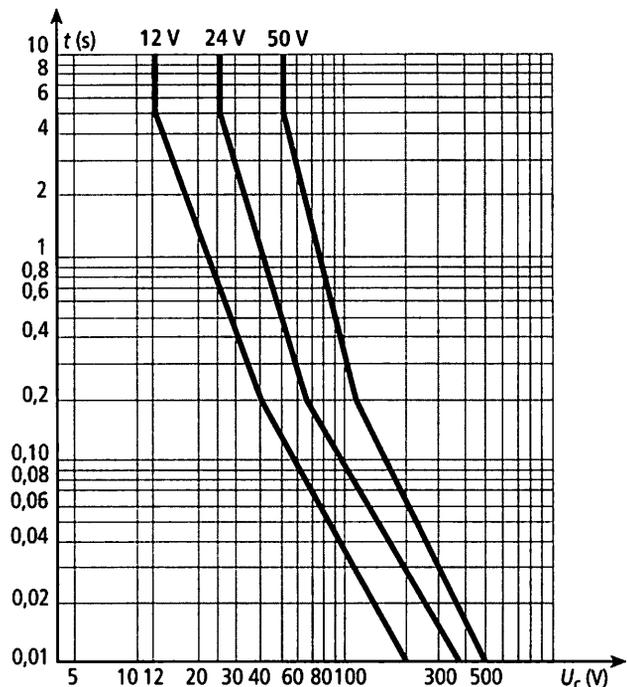
- des tensions limites à ne pas dépasser ;
- des temps maximaux supportables par le corps humain ;
- des conditions d'environnement relatives à l'humidité ;
- de la nature du courant, continu ou alternatif.

Plus la tension est élevée, plus le temps de passage possible du courant doit être court.

- La **tension limite de sécurité U_L** : est la tension de contact la plus élevée qui puisse être maintenue sans danger pour les personnes.

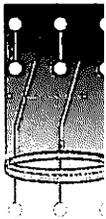
Courbes de sécurité en courant alternatif

Tensions limites U_L	$U_L = U_2 = 50 \text{ V}$	$U_L = U_3 = 25 \text{ V}$	$U_L = U_4 = 12 \text{ V}$	Temps maximal de fonctionnement de la protection (s)
Conditions	Normales BB1 BB2	Mouillées BB2 + BC4 ou BB3 + BC3	Immergées BB4 ou BB3 + BC4	
Valeur de la tension de contact (V)	< 50	< 25	< 12	Permanente
	50	25	12	5
	75	40	21	1
	90	50	27	0,5
	110	65	37	0,2
	150	96	55	0,1
	220	145	82	0,05
	280	195	110	0,03
350	250	135	0,02	



Courbes de sécurité en courant continu

Tensions limites U_L	$U_L = U_2 = 100 \text{ V}$	$U_L = U_3 = 50 \text{ V}$	$U_L = U_4 = 25 \text{ V}$	Durée maximale de maintien de la protection (s)
Conditions	Normales BB1 BB2	Mouillées BB2 + BC4 ou BB3 + BC3	Immergées BB4 ou BB3 + BC4	
Valeur de la tension de contact (V)	< 100	< 50	< 25	Permanente
	100	50	25	5
	130	70	35	1
	150	83	45	0,5
	170	100	57	0,2
	200	128	73	0,1
	250	165	93	0,05
	310	215	122	0,03
	370	260	140	0,02



3 - Protection et commande

3. Conditions de protection

La protection en régime TN est effectuée par disjoncteur ou fusible. Deux valeurs sont à prendre en compte : l'intensité de défaut par rapport à l'intensité de la protection, et le temps de coupure.

3.1. Protection par disjoncteur

• Un disjoncteur assure la protection des personnes dans un schéma TN à condition que le courant de défaut I_d soit supérieur au courant de fonctionnement du déclencheur magnétique.

$I_d > I_{mag}$. I_d : courant de défaut ;
 I_{mag} : courant de réglage du déclencheur magnétique

En général I_{mag} a une valeur comprise entre 5 et 10 I_n .

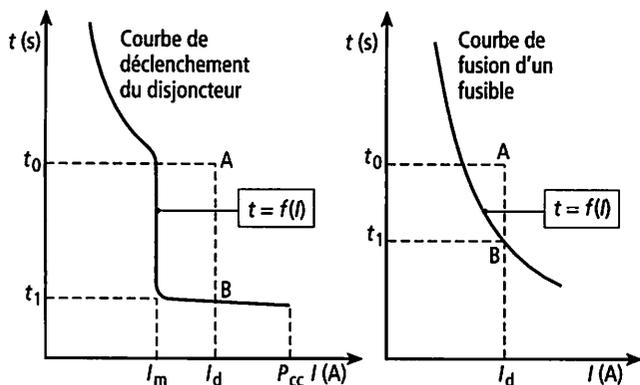
• La valeur du temps de coupure est fonction de la tension du réseau, pour un circuit terminal ; cette durée est donnée par le tableau ci-dessous.

Temps de coupure maximaux dans le schéma TN

Tension nominale phase/neutre U_0 (volts)	Temps de coupure (secondes)
120, 127	0,8
200, 230	0,4
380, 400	0,2
> 400	0,1

Remarque :

Dans certains cas prévus par la norme C 15 100, le temps de coupure peut être plus important mais il ne doit jamais excéder 5 s.



La figure ci-dessus montre que le temps de fonctionnement du disjoncteur t_1 est très inférieur au temps t_0 prescrit par la norme en schéma TN.

Exemple :

Distribution en 230 V, le temps de coupure imposé est de $t_c = 0,4$ s soit 400 ms. Le disjoncteur coupe en 20 ms.

3.2. Protection par fusibles

Un fusible assure la protection des personnes à deux conditions :

- que le courant de défaut soit supérieur au courant assurant la fusion I_f du fusible,
- que le temps t_0 prescrit pour le courant de défaut I_d se trouve au-dessus de la limite supérieure de la zone de fonctionnement du fusible.

t_1 est le temps réel de fusion du fusible du fait du courant I_d .

Remarques :

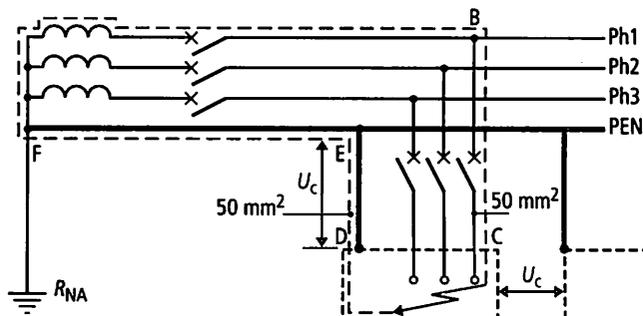
La protection des personnes repose essentiellement sur les conditions de fonctionnement des protections du réseau (disjoncteur, fusibles) en présence d'un défaut d'isolement, il faut impérativement :

- prendre toutes les dispositions pour faciliter l'établissement d'un courant de défaut élevé, le conducteur PE ou PEN fait partie du même câble que les conducteurs actifs ;

- interconnecter toutes les masses et éléments conducteurs ;
- vérifier par des calculs la bonne adaptation des protections ; si possible, faire des mesures de contrôle.

4. Calcul simplifié

Dans le schéma ci-dessous, qui représente un départ basse tension, la boucle de défaut B, C, D, E est alimentée par une tension estimée à 0,8 fois la tension simple.



$V_{BE} = 0,8 \times 230 = 184$ V (réseau 230/400 V).

L'impédance de cette boucle de défaut dans un calcul approché est ramenée à la valeur de la résistance des câbles.

Z_d = impédance de la boucle de défaut B, C, D, E.

On considère que le conducteur PEN suit le même parcours que le conducteur de phase BC, donc $BC = DE$, soit une longueur de 40 m.

$Z_d = 2R$ de BC d'où $Z_d = 2\rho \frac{L}{S} = 2 \times 22,5 \frac{40}{50} = 36$ mΩ

$\rho = 22,5$ mΩmm²/m pour le cuivre.

Le courant de défaut I_d est donné par la relation :

$I_d = \frac{V_{BE}}{Z_d} = \frac{184}{36 \times 10^{-3}} = 5111$ A

La tension de contact (U_c) peut être considérée comme la moitié de la tension aux bornes de la boucle de défaut, soit :

$U_c = V_{DE} = \frac{V_{BE}}{2} = \frac{184}{2} = 92$ V (tension dangereuse)

Donc, en cas de défaut franc (phase-masse) dans le régime de neutre TN, il faut couper immédiatement le circuit en défaut.

Si la protection du circuit est assurée par un disjoncteur de calibre 160 A avec un relais magnétique qui déclenche à 7 fois l'intensité nominale,

$I_{mag} = 7 \times 160 = 1120$ A
 5111 A > 1120 A

$I_d > I_{mag}$ provoque le déclenchement du disjoncteur.

Il faut aussi s'assurer que le temps de déclenchement du disjoncteur est inférieur au temps maximal donné par le tableau précédent.

$t_{disj.} < t_{sécurité}$

• Temps de déclenchement du disjoncteur 160 A donné par le constructeur : 0,025 s soit 25 ms ;

• Temps donné par le tableau précédent pour une tension de 220 V : 0,4 s :

$t_{sécurité} = 0,4$ s ou 400 ms
 25 ms < 400 ms

Les deux conditions (courant de défaut suffisant pour faire déclencher le disjoncteur et temps de déclenchement du disjoncteur suffisamment court) sont réalisées dans le cas de calcul approché.

Remarque : Si les conditions de déclenchement n'étaient pas assurées, il y aurait lieu :

- d'augmenter la section des conducteurs ;
- de réaliser des connexions équipotentielles supplémentaires ;
- d'agir sur le réglage du calibre du relais magnétique.

5. Calcul des conditions de déclenchement

Le calcul exact du courant s'établissant en cas de défaut d'isolement est assez complexe, car il fait intervenir les impédances, directes, inverses, et homopolaires, des composants du circuit.

La norme C 15.100 prévoit une méthode simplifiée qui donne les longueurs maximales des circuits, en fonction :

- du type de protection (fusibles gG, aM, ou petits disjoncteurs) ;
- du calibre de la protection ;
- de la section des phases et du conducteur de protection ;
- du régime de neutre.

5.1. Hypothèses simplificatrices

Pour le départ à calculer, on applique la loi d'Ohm, en faisant les hypothèses suivantes.

- La tension entre la phase en défaut et le conducteur PE ou PEN à l'origine du circuit est prise égale à 80 % de la tension simple nominale.

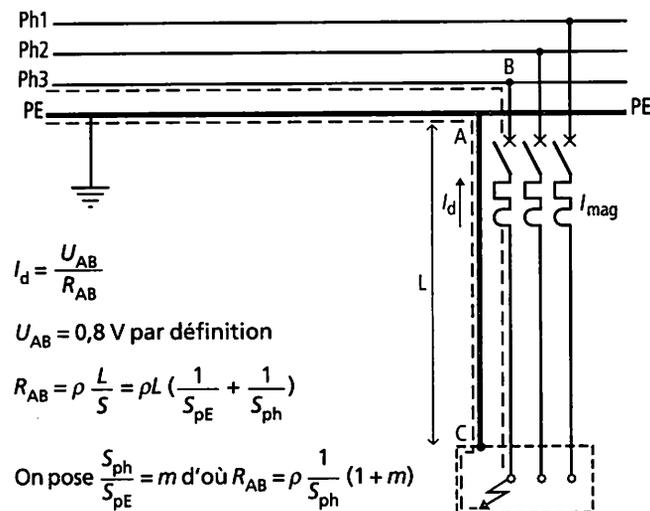
- On néglige les réactances des conducteurs devant leur résistance, sauf pour les sections supérieures à 120 mm². Au-delà, on majore les résistances des valeurs suivantes :

$$S = 150 \text{ mm}^2, \text{ prendre } R + 15 \%$$

$$S = 185 \text{ mm}^2, \text{ prendre } R + 20 \%$$

$$S = 240 \text{ mm}^2, \text{ prendre } R + 25 \%$$

- Le conducteur de protection chemine à côté des conducteurs de phases correspondants.



Sachant que $I_d > I_{mag}$, pour que la protection des personnes soit assurée on en déduit :

$$I_{mag} < \frac{0,8 V S_{ph}}{\rho L (1 + m)} \text{ d'où : } L_{max} = \frac{0,8 V S_{ph}}{\rho (1 + m) \cdot I_{mag}}$$

5.2. Méthode de calcul

Le calcul conduit à vérifier que la longueur du circuit est inférieure à la valeur donnée par la relation :

$$L_{max} = \frac{0,8 V S_{ph}}{\rho (1 + m) I_{mag} \text{ (ou } I_f)}$$

- L_{max} : longueur maximale de la canalisation (en m)
- V : tension simple nominale (en V)
- S_{ph} : section des conducteurs de phase (en mm²)
- ρ : résistivité des conducteurs à température normale
soit : $22,5 \times 10^{-3} \Omega \text{mm}^2/\text{m}$ pour le cuivre
 $36 \times 10^{-3} \Omega \text{mm}^2/\text{m}$ pour l'aluminium
- m : rapport entre section des phases et section du conducteur de protection ; $m = S_{ph} / S_{pe}$
- I_{mag} : courant (en A) de fonctionnement du déclencheur magnétique

I_f : courant (en A) assurant la fusion du fusible correspondant, sur les courbes de sécurité, à la tension de contact calculée par la relation :

$$U_c = 0,8 V \frac{m}{1 + m}$$

5.3. Exemples

a) Application : protection par disjoncteur

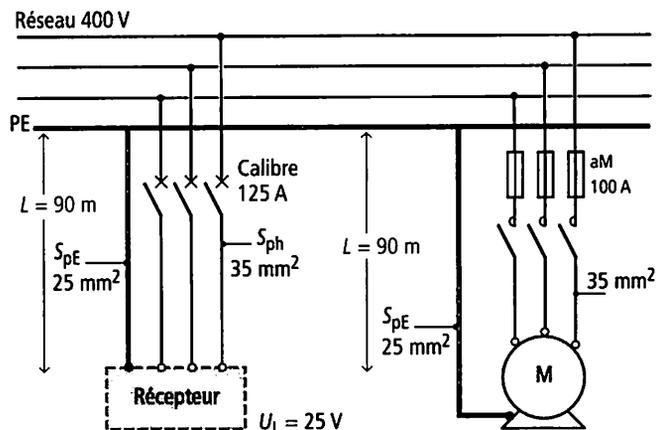
Un réseau 230/400, de régime TN, alimente un récepteur situé à 90 m de la dérivation ; ce départ est protégé par un disjoncteur de calibre 125 A ($I_{mag} = 8I_n$). Section de phase 35 mm², section PE 25 mm².

Vérifions si la condition de protection contre les contacts indirects est bien réalisée :

$$L_{max} = \frac{0,8 V S_{ph}}{\rho (1 + m) I_{mag}}$$

$$L_{max} = \frac{0,8 \times 230 \times 35}{22,5 \times 10^{-3} (1 + \frac{35}{25}) (125 \times 8)} = 119 \text{ m}$$

La longueur de 90 m < 119 m (L_{max}) convient.



b) Application : protection par fusibles

On a remplacé le disjoncteur par des fusibles aM 100 A, les sections et longueurs de câbles sont identiques ; $U_L = 25 \text{ V}$; réseau TN 230/400 V. Vérifions la condition de protection.

Solution : Pour connaître l'intensité de fusion du fusible, il faut calculer la tension de contact :

$$U_c = 0,8 V \frac{m}{1 + m} \text{ avec } m = \frac{35}{25} = 1,4$$

$$U_c = 0,8 \times 230 \times \frac{1,4}{2} = 129 \text{ V}$$

Le tableau des temps de coupure donne 400 ms.

La courbe de fusion du fusible aM 100 A indique, pour un temps de 400 ms, une intensité de fusion de 900 A.

Calcul de L_{max} :

$$L_{max} = \frac{0,8 \times 230 \times 35}{22,5 \times 10^{-3} (1 + 1,4) \times 900} = 126 \text{ m}$$

La longueur L_{max} de 126 m est supérieure aux 90 m de la canalisation.

La protection contre les contacts indirects est assurée.

- **Résumé :** En régime TNC ou TNS, le défaut d'isolement est transformé en défaut phase-neutre. Le courant de défaut a pour valeur : $I_d = V / Z_d$

La coupure est faite par la protection contre les surintensités.

Fusibles : $I_d > I_f$; disjoncteur : $I_d > I_{mag}$.

Dans ces deux cas, le temps de coupure doit être inférieur au temps donné par la courbe de sécurité.

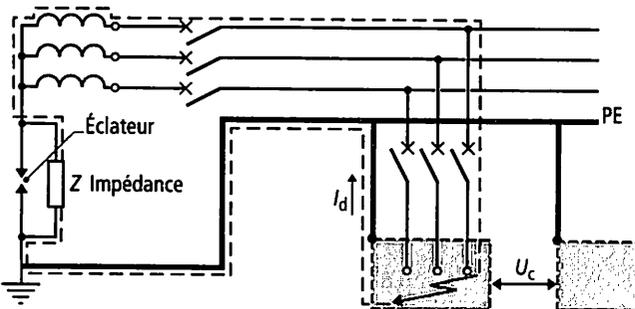


3 - Protection et commande

1. Principe de la protection

Dans le régime du neutre isolé :

- le neutre est isolé de la terre, ou relié à la terre par une impédance élevée ;
- les masses sont reliées à une prise de terre.



1.1. Premier défaut

Un premier défaut n'est pas dangereux, mais il doit être recherché et éliminé. Au deuxième défaut, il faut impérativement couper le circuit en défaut.

a) Exemple de calcul sans impédance :

Données :

- réseau à neutre isolé, impédance d'isolement $Z_i = 50\ 000\ \Omega$;
- résistance du défaut $r = 0\ \Omega$ (défaut franc).

Calculs :

En parcourant la boucle de défaut (en bleu pour le schéma), on applique la loi d'Ohm, afin de déterminer le courant de défaut :

$$I_d = \frac{230}{10 + 0 + 50\ 000} = 0,005\ A$$

Le courant est très faible du fait de la forte impédance d'isolement du neutre.

La tension de défaut est alors $V = 0,005 \times 10 = 0,05\ V$; elle est inoffensive.

Tout se passe comme si l'on se trouvait devant un réseau ayant 1 phase à la terre, et les 2 autres phases ainsi que le neutre isolés.

Remarque :

Dans une installation à neutre isolé (IT), l'impédance équivalente ramenée entre neutre et terre est d'environ $3\ 500\ \Omega$ par km de lignes ; elle est due aux capacités et aux fuites à la terre qui se font par les isolants.

b) Exemple de calcul avec impédance :

Le réseau comporte une impédance $Z_n = 2\ 300\ \Omega$.

R défaut = $2\ \Omega$; $R_n = 10\ \Omega$, $R_u = 10\ \Omega$.

Calculs :

$$I_d = \frac{V}{Z_{totale}} = \frac{230}{2\ 300 + 2 + 10 + 10} = 0,1\ A$$

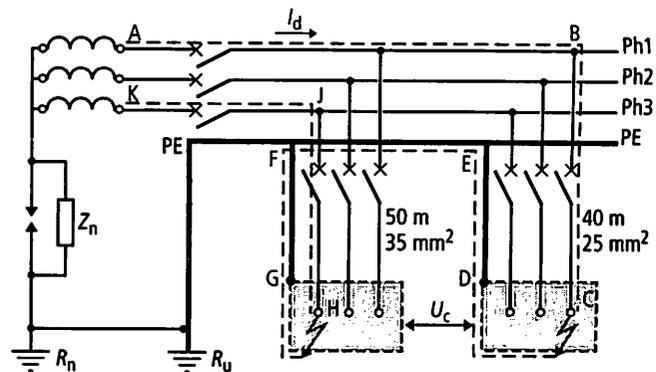
La tension de défaut est :

$$V = R_u I_d = 10 \times 0,1 = 1\ V$$

Le potentiel est inoffensif.

1.2. Cas d'un deuxième défaut

Soit le jeu de barres du schéma ci-dessous qui alimente deux départs, et sur lequel il existe deux défauts : l'un sur la phase 1, l'autre sur la phase 3.



Calcul simplifié de la protection :

En cas de défaut double, il s'établit un courant de défaut I_d dans la boucle A, B, C, D, E, F, G, H, J, K.

Données :

- Z_b = impédance boucle B, C, D, E, F, G, H, J
- réseau 400 V triphasé

Calculs : $U_{BJ} = Z_b I_d$ d'où $I_d = \frac{U_{BJ}}{Z_b}$

U_{BJ} = tension entre phases estimée à $0,8\ U$ comme en TN d'où : $U_{BJ} = 0,8 \times 400 = 320\ V$.

Si l'on néglige la réactance, l'impédance de boucle peut être égale à :

$$Z_b = 2 (R_{BC} + R_{HJ}) = 2 \times 2,25 \left(\frac{40}{25} + \frac{50}{35} \right) = 135\ m\Omega$$

L'intensité de défaut est alors de :

$$I_d = \frac{U_{BJ}}{Z_b} = \frac{320}{135 \times 10^{-3}} = 2\ 370\ A$$

La tension de contact est alors de : $U_c = U_{BJ}/2 = 160\ V$. C'est une tension de contact dangereuse.

À travers ces résultats, on voit qu'en cas de défaut double, en régime de neutre IT, on est en présence d'un fort courant de court-circuit et d'une tension de contact dangereuse.

2. Protection en cas de double défaut

Les temps maximaux de coupure en cas de deuxième défaut sont donnés dans le tableau ci-dessous.

Tension nominale U_0/U en volts	Temps de coupure	
	Neutre non distribué	Neutre distribué
127/220	0,8	5
230/400	0,4	0,8
400/690	0,2	0,4
580/1 000	0,1	0,2

2.1 Protection par disjoncteur

Dans le cas d'un défaut double deux disjoncteurs sont concernés D_1 et D_2 . La protection des personnes est assurée si l'un des deux disjoncteurs ouvre le circuit sous l'effet du relais magnétique pour que l'on soit ramené au cas du premier défaut :

$$I_d > I_{mag1} \quad \text{ou} \quad I_d > I_{mag2}$$

2.2. Protection par fusibles

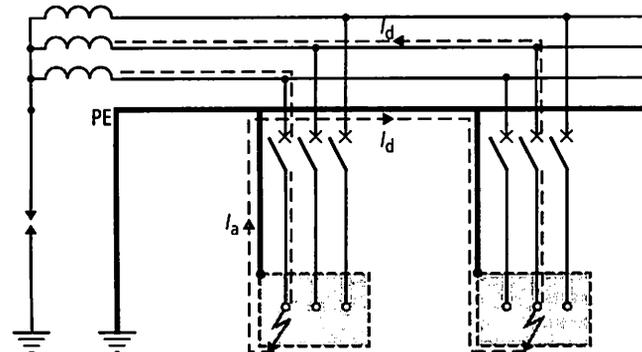
La protection des personnes est assurée au deuxième défaut si I_d est supérieur à l'un ou l'autre des courants assurant la fusion des fusibles dans le temps prescrit par le tableau ci-dessus.

$$I_d > I_{f1} \quad \text{ou} \quad I_d > I_{f2}$$

3. Calcul des conditions de déclenchement

Dans une installation à neutre isolé (IT), en cas de deuxième défaut, on est ramené au cas du schéma TN avec cependant deux particularités :

- le neutre n'est pas forcément distribué ;
- il est impossible d'effectuer la vérification pour tous les cas de défauts doubles ; on suppose une répartition identique de la tension entre chacun des deux défauts.



3.1. Relations

a) Le neutre n'est pas distribué

$$L_{max} = \frac{0,8 U S_{ph}}{2\rho(1+m) I_{mag} \text{ (ou } I_f)}$$

$$U_c = \frac{0,8 U m}{1+m}$$

b) Le neutre est distribué

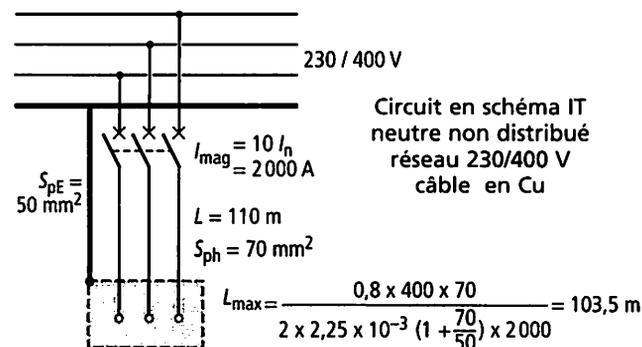
$$L_{max} = \frac{0,8 V S_1}{2\rho(1+m) I_{mag} \text{ (ou } I_f)}$$

$$U_c = \frac{0,8 V m}{1+m}$$

- L_{max} : longueur maxi du départ (en m)
- V : tension simple en volts (en V)
- U : tension composée (en V)
- S_{ph} : section de phase (en mm²)
- S_1 : section du neutre (en mm²)
- ρ : résistivité $22,5 \times 10^{-3} \Omega\text{mm}^2/\text{m}$ (cuivre)
 $36 \times 10^{-3} \Omega\text{mm}^2/\text{m}$ (aluminium)
- I_{mag} : courant de déclenchement du relais magnétique
- I_f : courant de fusion du fusible, dans le temps calculé par les courbes de sécurité
- m : rapport S_{ph} (ou S_1)/ S_{PE} .

La norme C 15 100 recommande de ne pas distribuer le neutre dans le cas du schéma IT, car il diminue considérablement les longueurs protégées et pénalise ce mode de distribution.

3.2. Exemple de calcul

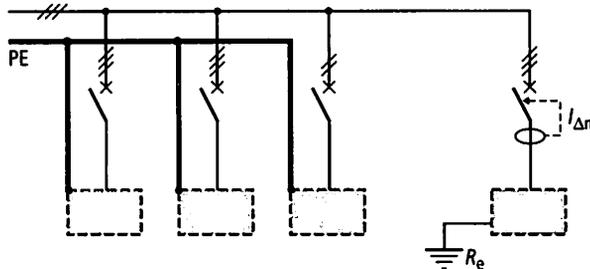


La protection contre les contacts indirects n'est pas assurée car $110 > 103,5$ longueur maxi.
Par contre, en réglant le disjoncteur magnétique à 1 600 A, on sera protégé ($I_{mag} = 8 I_n$).

3.3. Cas des masses séparées

Dans le cas d'un défaut double, si les masses sont séparées, on se retrouve dans la situation du régime de neutre TT.

Il faut alors installer une protection différentielle à courant résiduel de défaut en tête de chaque groupe de masses relié à une prise de terre distincte.



La sensibilité doit être adaptée à la résistance de la prise de terre ; on applique la relation :

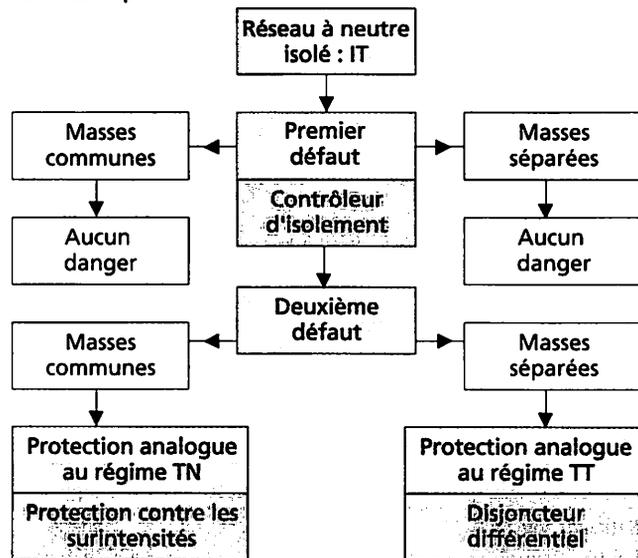
$$R_e \leq \frac{U_L}{I_{\Delta n}}$$

R_e = valeur en ohms de la résistance de terre éloignée.

4. Caractéristiques du régime IT

Ce type de régime de neutre permet surtout d'assurer une bonne continuité de service, mais il nécessite impérativement que les conditions suivantes soient respectées :

- l'installation est alimentée par un poste de transformation privé ;
- un service d'entretien électrique compétent est présent pour la recherche du premier défaut ;
- l'installation est munie d'un ensemble de détection du premier défaut (contrôleur permanent d'isolement CPI) et d'un limiteur de surtension ;
- les protections au deuxième défaut sont assurées sur chacun des départs.



3 - Protection et commande

5. Contrôleur permanent d'isolement

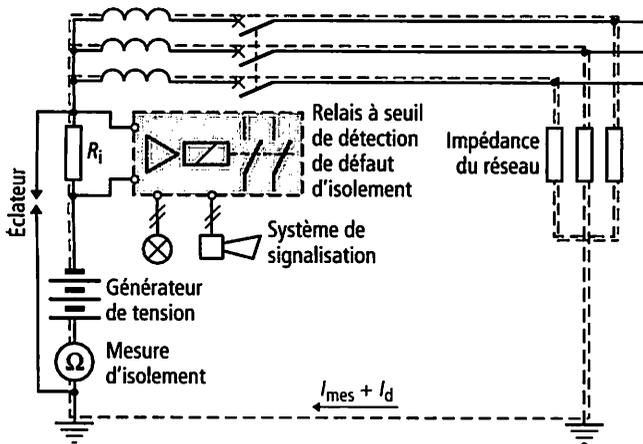
Ce dispositif est utilisé pour contrôler et mesurer l'isolement global des réseaux alternatifs à neutre isolé ou impédant.

5.1. Principe

Un générateur de courant injecte une tension continue entre le réseau et la terre ; cette tension crée un courant de fuite connu dont la mesure donne la résistance d'isolement.

5.2. Constitution

Il comprend essentiellement un générateur de tension continue (réseau alternatif) ou un générateur de tension alternative à 10 Hz (réseau continu) et un relais de détection à seuil pour le courant de défaut.



• **Fonctionnement** : En l'absence de défaut, l'isolement de l'installation fait qu'aucun courant continu ne circule dans le réseau. Dès qu'un défaut survient, un faible courant indique dans l'appareil de mesure la valeur de l'isolement ; la tension aux bornes de la résistance \$R_i\$ est amplifiée et enclenche le relais de seuil qui indique, par une signalisation visuelle et sonore, la présence d'un premier défaut.

5.3. Recherche d'un défaut

Le défaut d'isolement doit être éliminé le plus rapidement possible.

Pour le localiser, on peut :

- couper successivement chacun des départs jusqu'à la disparition de l'alarme ; le départ concerné fait alors l'objet d'une réparation ;
- injecter dans l'installation un courant basse fréquence (environ 10 Hz) qui est détecté dans le circuit en défaut par un système à tores magnétiques fixes ou mobiles.



Contrôleur permanent d'isolement Vigilohm TR22 A (neutre isolé ou mis à la terre) (doc. Schneider Electric).



Kit Vigilohm : ensemble pour la recherche de défauts d'isolement (1 récepteur, 1 générateur et 3 pinces) (doc. Schneider Electric).

Tableau 1 : Le régime de neutre est imposé par une réglementation officielle

Type d'installation	Régime de neutre	Exemples
Bâtiment alimenté par un réseau de distribution public	Neutre à la terre (TT)	Boulangerie Habitation
Établissement d'enseignement avec locaux de travaux pratiques	Neutre à la terre (TT) (note technique n° 5 du 20.12.73 du ministère de l'Intérieur)	Collège LP LT
Salle d'opération ou d'anesthésie des hôpitaux ou cliniques	Neutre isolé (IT) Alimentation avec transformateur d'isolement	Bloc opératoire
Circuits de sécurité	Neutre isolé (IT) (arrêté du 10.11.76)	Éclairage de secours
Mines et carrières	Neutre isolé (IT) ou (TT) (décret 76-48 du 9.1.76)	Alimentation d'engins mobiles

6. Choix d'un régime de neutre

Sur le plan de la protection des personnes, les trois régimes sont équivalents, si on respecte toutes les règles d'installation et d'exploitation.

Il est néanmoins erroné de vouloir exploiter un réseau à neutre isolé (IT) dans une installation où l'isolement est faible, par exemple dans des installations anciennes, étendues, avec des lignes extérieures.

Le choix d'un régime de neutre peut s'effectuer selon trois stades qui sont résumés dans les trois tableaux suivants :

- tableau 1 : cas où le régime de neutre est imposé ;
- tableau 2 : problème de la continuité de service ;
- tableau 3 : choix en fonction du réseau ou des récepteurs.

Tableau 2 : Continuité de service

		La continuité de service est impérative	
		OUI	NON
Entretien assuré par un personnel électricien qualifié	OUI	Neutre isolé (IT) Le seul qui autorise la coupure 2 ^e défaut	Neutre isolé (IT) Neutre à la terre (TT) Mise au neutre (TN) D'autres critères de choix doivent intervenir
	NON	Aucun régime n'est satisfaisant Incompatibilité entre les deux critères	Neutre à la terre Le plus simple à mettre en œuvre et à contrôler

Tableau 3 : Choix d'un régime de neutre en fonction du réseau et des récepteurs

	Nature du réseau ou des récepteurs	Régimes de neutre			Observations
		TT	IT	TN	
R	Réseau très étendu avec de bonnes prises de terre des masses d'utilisation (10 Ω maxi)	■	×	○	Il est illusoire de parler de réseau isolé par rapport à la terre lorsque celui-ci est sur plus de 10 km
	Réseau très étendu avec de mauvaises prises de terre de masses d'utilisation (\$R_u > 30 \Omega\$)	■	×	×	
S	Réseau en zone orageuse	○	×	■	Risques d'amorçage du limiteur de surtension transformant le réseau (IT) en TT
A	Réseau avec courants de fuite importants (> 500 mA)	○	×	■	Si possible isoler la partie perturbatrice. Risque de déclenchement des disjoncteurs différentiels
	Réseau avec lignes aériennes extérieures	■	×	○	En (IT) l'isolement est incertain à cause de l'humidité et des poussières
R	Récepteurs sensibles aux grands courants de défaut (moteurs)	○	■	×	Courant de défaut en TN peut atteindre plusieurs fois l'intensité nominale
C	Récepteurs à faible isolement : fours électriques - thermo-plongeurs - soudeuses - équipement de cuisines	○	○	■	Pour la sécurité et la continuité du service un transfo d'isolement permet de séparer ces récepteurs du reste du réseau
E	Nombreux récepteurs monophasés entre phase et neutre (semi-fixes - mobiles)	■	×	×	Risque de diminution de l'isolement des appareils dans le temps
R	Nombreux auxiliaires : machines-outils	×	○	■	Emploi de transformateur de séparation avec mise au neutre locale

■ conseillé

○ possible

× déconseillé

Une chaîne départ moteur est constituée des éléments suivants :

- un sectionneur (éventuellement cadenassable) ;
- une protection contre les courts-circuits (dispositif magnétiques ou fusibles) ;
- une protection thermique (relais thermique) ;
- un contacteur assurant la mise en marche et l'arrêt du moteur.

Pour simplifier cette chaîne les constructeurs proposent des appareils rassemblant en un seul module plusieurs de ces fonctions.

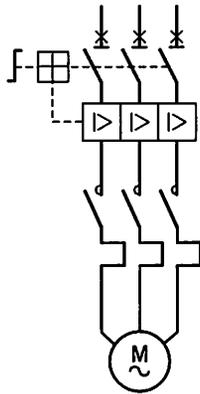
1. Le disjoncteur moteur magnétique

• Schéma de puissance :

Cet appareil regroupe un sectionneur cadenassable avec possibilité de commande sur porte et un disjoncteur magnétique. Le déclencheur magnétique a un réglage fixe à $14 I_n$ pour accepter le courant de démarrage du moteur.



Disjoncteur GV2L (doc. Schneider Electric).

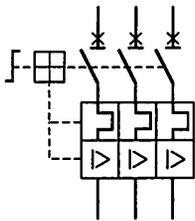


2. Le disjoncteur moteur magnéto-thermique

Cet appareil regroupe les mêmes fonctions que le disjoncteur moteur magnétique plus une protection thermique.

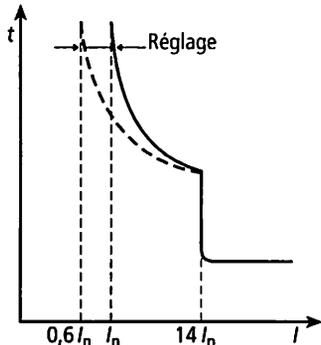
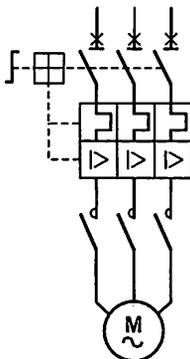


Disjoncteur GV2M (doc. Schneider Electric).



• Schéma de puissance :

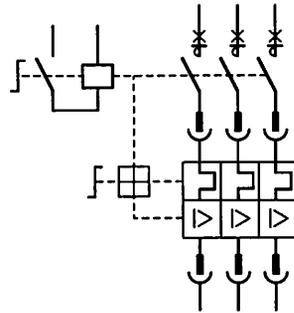
• Courbe de déclenchement :



Le déclencheur magnétique est fixé à $14 I_n$, par contre le thermique est réglable de $0,6$ à $1 I_n$. Il assure la protection contre la marche en monophasé.

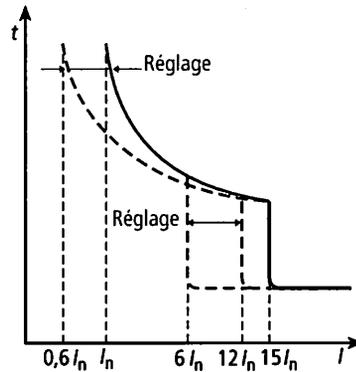
3. Les contacteurs-disjoncteurs

Cet appareil regroupe les fonctions d'un disjoncteur moteur magnéto-thermique et d'un contacteur. L'ensemble disjoncteur et contacteur est réalisé à partir du même jeu de contacts, ce qui permet une diminution de l'encombrement.



Contacteur-disjoncteur à 1 sens de marche (doc. Schneider Electric).

• Courbe de déclenchement :

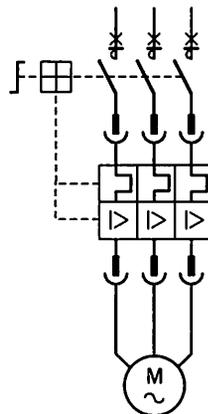


Le déclencheur magnétique peut être fixée à $15 I_n$ ou réglable de 6 à $12 I_n$. Le déclencheur thermique est réglable de $0,6$ à $1 I_n$. L'ensemble déclencheur magnéto-thermique est débrochable, ce qui permet un changement de calibre sans décâblage et facilite la maintenance.

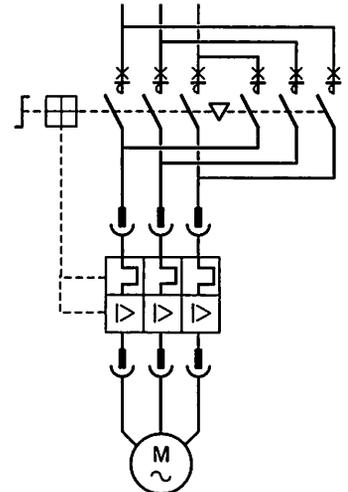
• Fonctionnement :

- Bouton sur position 0. Les contacts sont ouverts et bloqués dans cette position. Il n'est pas possible de les commander par l'électroaimant, le circuit est isolé du réseau.
- Bouton sur position 1. Les contacts sont déverrouillés. Ils sont commandés par l'électroaimant comme dans un contacteur.
- Bouton en position déclenché. Le bouton est arrivé dans cette position suite à un déclenchement thermique ou magnétique. Les contacts sont bloqués en position ouverte. L'utilisateur doit réarmer l'appareil manuellement pour le remettre en fonctionnement.

• Schéma de puissance : 1 sens de marche



• Schéma de puissance : 2 sens de marche



3 - Protection et commande

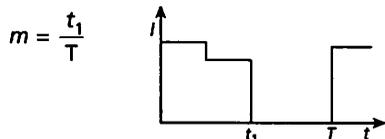
Le choix d'un contacteur est essentiel pour la commande d'un récepteur de puissance. Un contacteur doit être capable d'établir, supporter et interrompre le courant du récepteur sans échauffement excessif et usure de ses contacts.

Les principaux critères de choix sont :

- la nature de l'alimentation, alternatif ou continu ;
- la valeur nominale de la tension ;
- la nature du récepteur (résistif, pointe de courant, etc.) ;
- le courant nominal du récepteur ;
- les contraintes d'exploitation (catégorie d'emploi, cycles) ;
- la température ambiante et l'altitude.

1. Définitions

- **Tension assignée d'emploi U_e** : c'est la tension sous laquelle le contacteur sera employé. En triphasé, elle correspond à la tension entre phases du réseau raccordé aux contacts de puissance du contacteur.
- **Courant assigné d'emploi I_e** : c'est le courant nominal que le contacteur peut commander dans des conditions de fonctionnement définies, sans échauffement excessif.
- **Courant thermique conventionnel I_{th}** : c'est le courant que peut supporter le contacteur en position fermée pendant 8 h sans échauffement excessif.
- **Puissance assignée d'emploi** : c'est la puissance normalisée du moteur qui peut être commandée par le contacteur.
- **Pouvoir assigné de coupure** : c'est la valeur du courant que peut couper le contacteur sous sa tension d'emploi.
- **Pouvoir assigné de fermeture** : c'est le courant que peut établir le contacteur lors de la fermeture des pôles.
- **Durabilité électrique** : c'est le nombre de cycles de manœuvres en charge que les contacts peuvent effectuer sans entretien.
- **Durabilité mécanique** : c'est le nombre de cycles de manœuvres à vide que le contacteur peut effectuer sans défaillance mécanique.
- **Facteur de marche** : c'est le rapport entre la durée de passage du courant t_1 et la durée d'un cycle T .



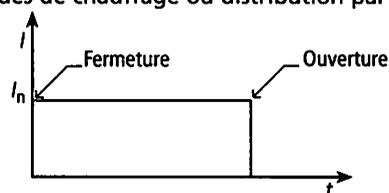
2. Les catégories d'emploi

Les catégories d'emploi précisent les domaines d'applications des contacteurs et leurs conditions d'utilisation selon le courant d'emploi. Elles dépendent notamment de la nature des récepteurs et des conditions d'ouverture et de fermeture des contacts.

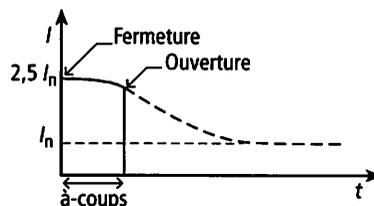
Ils existent des catégories d'emploi pour les récepteurs à courant alternatif (catégories AC) et pour les récepteurs à courant continu (catégories DC). Pour un contacteur la catégorie d'emploi AC ou DC représente la nature du courant de la charge et non celle du courant de la bobine de commande. Un contacteur de catégorie AC peut très bien avoir une alimentation de sa commande en continu et inversement.

2.1. Courant alternatif

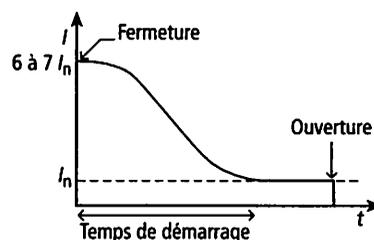
- **Catégorie AC1** : elle s'applique aux récepteurs dont le facteur de puissance est supérieur ou égal à 0,95 ($\cos \varphi \geq 0,95$). Commandes de chauffage ou distribution par exemple.



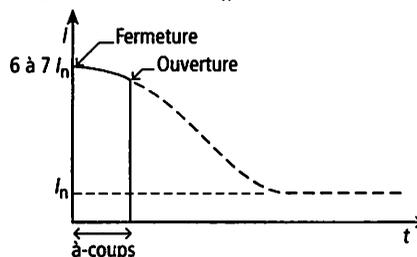
- **Catégorie AC2** : elle correspond aux démarrages, freinages en contre-courant et marche par à-coups des moteurs à bagues. Le courant de démarrage est considéré égal à 2,5 fois le courant nominal du moteur.



- **Catégorie AC3** : elle concerne les démarrages des moteurs à cage. La fermeture s'effectue avec le courant de démarrage égal à 6 ou 7 fois I_n . L'ouverture se fait moteur lancé avec un courant égal à I_n .



- **Catégorie AC4** : elle correspond aux démarrage, freinages, marches par à-coups des moteurs à cage. La fermeture comme l'ouverture des contacts se font avec le courant de démarrage égal à 6 ou 7 fois I_n .



- **Catégorie AC5** : elle concerne la commande des lampes. AC5a pour les lampes à décharges, AC5b pour les lampes à incandescence.

- **Catégorie AC6** : elle concerne les récepteurs à fort appel de courant. AC6a pour les transformateurs, AC6b pour les condensateurs.

- **Catégorie AC7** : elle concerne les applications domestiques.
- **Catégorie AC8** : elle concerne les compresseurs de réfrigération.

- **Catégorie AC14** : elle concerne les contacteurs auxiliaires qui commandent des charges inductives (bobines de contacteurs), de puissance inférieure à 72 VA.

- **Catégorie AC15** : idem AC14, mais pour des bobines de puissance supérieure à 72 VA.

2.2. Courant continu

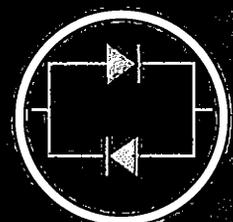
- **Catégorie DC1** : elle concerne la commande des récepteurs à courant continu dont la constante de temps L/R est inférieure à 1 ms.

- **Catégorie DC3** : elle concerne le démarrage, freinage, marche par à-coups des moteurs shunt.

- **Catégorie DC5** : elle concerne le démarrage, freinage, marche par à-coups des moteurs série.

- **Catégorie DC13** : elle concerne les contacteurs auxiliaires qui commandent des charges inductives dont la puissance d'appel est de 6 fois la puissance nominale (bobine de contacteur en courant continu sans résistance d'économie).

4 - Électronique de puissance



Sommaire

4 - 1 - Composants électroniques

- 41. Composants et fonctions de l'électronique de puissance p. 78
- 42. Diodes de redressement p. 79
- 43. Caractéristiques des thyristors p. 80
- 44. Diac et triac p. 83
- 45. Transistors bipolaires de puissance p. 85
- 46. Transistors MOS et IGBT p. 87
- 47. Amplificateur opérationnel p. 88

4 - 2 - Fonctions de l'électronique

- 48. Redressement par diodes p. 90
- 49. Redressement contrôlé .. p. 94
- 50. Hacheurs p. 97
- 51. Onduleurs p. 100
- 52. Gradateurs p. 103
- 53. Alimentations à découpage p. 105

4 - 3 - Vitesse variable

- 54. Rappels de mécanique p. 106
- 55. Asservissement et régulation p. 108
- 56. Variateur de vitesse pour machines à courant continu p. 110
- 57. Variateur pour moteurs asynchrones triphasés p. 112
- 58. Symboles en électronique de puissance p. 113

1. Évolution

L'électronique de puissance se situe à la charnière entre l'électronique (courants faibles) et l'électrotechnique (courants forts). C'est la mise au point des semi-conducteurs de puissance (diodes, thyristors et transistors) qui a permis son développement.

2. Les groupes convertisseurs

L'électronique de puissance permet de remplacer les transformations d'énergie effectuées autrefois par des groupes de machines tournantes :

- le redresseur à diodes est équivalent à la commutatrice ;
- les redresseurs contrôlés sont analogues à un groupe moteur asynchrone génératrice à courant continu ;
- les gradateurs remplacent les auto-transformateurs à prise variable ou à curseur ;
- l'onduleur autonome était réalisé par l'ensemble moteur à courant continu couplé à un alternateur ;
- le hacheur, exécuté en petite puissance avec des relais vibreurs, peut maintenant être exécuté en très forte puissance avec des thyristors.

L'électronique de puissance travaille presque toujours en commutation, c'est l'une de ses caractéristiques principales. Cela permet d'obtenir de très bons rendements compatibles avec les puissances mises en jeu.

Les signaux de commande sont aujourd'hui générés par des systèmes à microprocesseurs en logique programmée qui remplacent de plus en plus souvent la commande analogique par amplificateurs opérationnels.

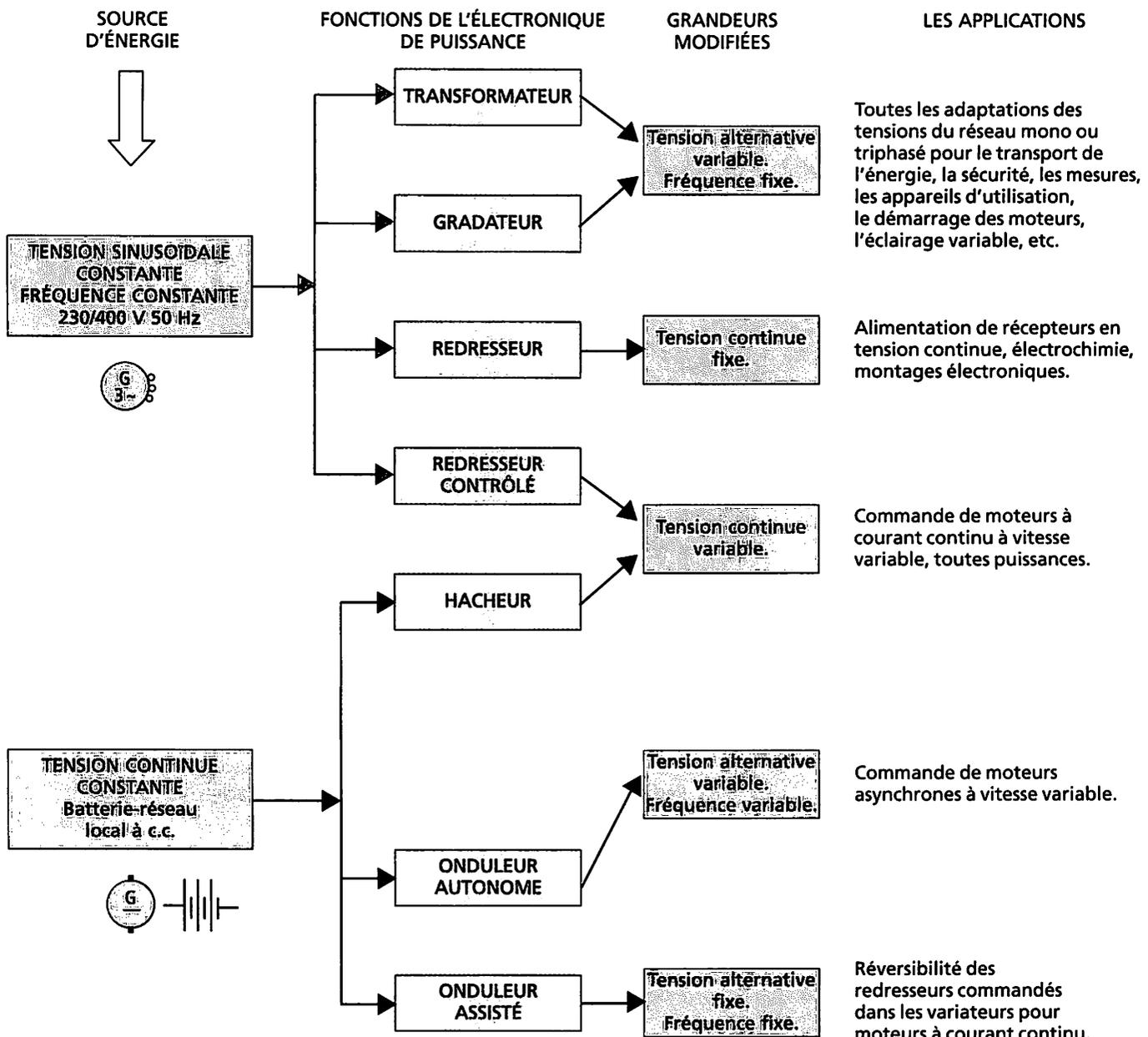
Dans tous ces cas, le rendement en énergie a été considérablement augmenté avec l'électronique de puissance, qui condamne les groupes tournants.

3. Les applications

Dans tous les domaines industriels, de l'électro-ménager à la traction électrique, on rencontre des applications de l'électronique de puissance ; c'est notamment le cas dans les réalisations de :

- variateurs de vitesse pour les moteurs à courant continu ;
- variateurs de vitesse pour les moteurs à courant alternatif ;
- alimentations sans coupure.

La tendance est à l'association de l'électronique de puissance avec le moteur.

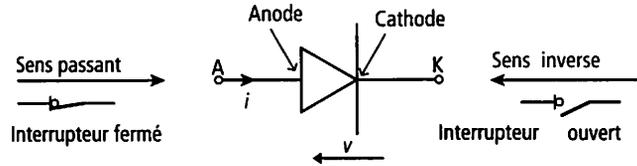


Parmi toutes les diodes existantes : diodes de signal, Zéner, électro-luminescente (DEL), nous ne retenons que les diodes de redressement ou diodes de puissance.

1. Rappels théoriques

Les diodes à semi-conducteurs sont réalisées à partir d'une jonction PN, la représentation symbolique indique le sens du courant.

• **Sens direct (ou sens passant) :** la diode est parfaitement conductrice, elle présente une faible chute de tension (0,5 à 1,5 V), elle est analogue à un interrupteur fermé.

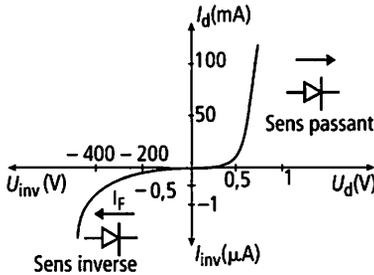


• **Sens inverse (ou sens bloqué) :** la diode est parfaitement isolante, un très faible courant résiduel la traverse (quelques micro-ampères) ; elle est analogue à un interrupteur ouvert.

• **Courbes caractéristiques :** les caractéristiques directes et inverses données sur le même graphique sont à des échelles très différentes.

Dans l'étude des circuits de redressement, on suppose une diode parfaite :

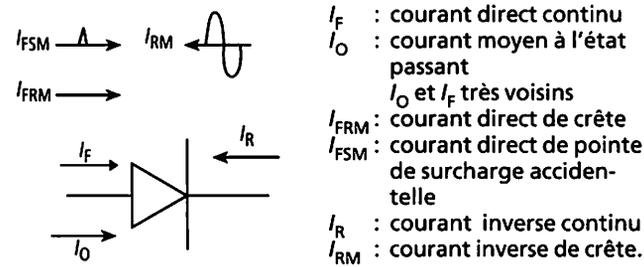
- chute de tension directe nulle ;
- courant inverse nul.



2. Caractéristiques des diodes

Elles sont données par les constructeurs sous formes d'abréviations en lettres :

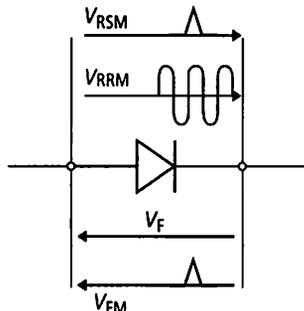
• **Les courants :**



- I_F : courant direct continu
- I_O : courant moyen à l'état passant
- I_O et I_F très voisins
- I_{FRM} : courant direct de crête
- I_{FSM} : courant direct de pointe de surcharge accidentelle
- I_R : courant inverse continu
- I_{RM} : courant inverse de crête.

• **Les tensions :**

- V_F : tension directe continue
- V_{FM} : tension directe de crête
- V_R : tension inverse continue
- V_{RM} : tension inverse de crête
- V_{RRM} : tension inverse de pointe répétitive.



• **Les températures :**

- T_{amb} : température ambiante
- T_{case} : température du boîtier
- T_j : température de jonction.

3. Les boîtiers

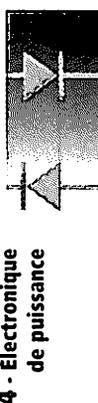
La jonction PN est protégée par un boîtier qui peut être en verre, en matière plastique ou en métal. Pour les types DO2, le repérage anode-cathode s'effectue par un anneau côté cathode ; pour les types DO4 - DO5, la cathode est généralement fixée sur le boîtier. Dans certains cas, pour faciliter le montage en pont des diodes, l'anode peut être reliée au boîtier (repère R). Généralement, le symbole porté sur la diode indique les positions de l'anode et de la cathode.

Caractéristiques de diodes de redressement standard (SG Microelectronics).

Types	I_O (A)	V_{RRM}	I_{FSM} (A)	V_F / I_F (V) (A)	I_R / T_j (mA) (°C)	BOÎTIER
1 N 5401 1 N 5402 5404 5406 5407	3	100 200 400 600 800	200	1,2 3	0,5 150	DO 27 A plastique (CB 197)
BY 214 - 50 100 200 400 600 800	6	50 100 200 400 600 800	400	1,2 20	0,25 100	AG plastique (CB 257)
BY 239 - 200 400 600 800	10	200 400 600 800	140	1,45 30	0,5 125	DO 220 AB plastique (CB 227)
BY 88 - 50 100 200 300 400 600 800 1000	12	50 100 200 300 400 600 800 1000	230	1,25 35	3 125	DO 4 métal (CB 33)
1 N 248 B 249 B 250 B 1 N 1195 A	20	50 100 200 300	450	1,5 70	5 150	DO 5 métal (CB 34)
1 N 1198 RN 820 1120		600 800 1000				
1 N 1183		50 à 1000				
1 N 1190 1 N 3766 1 N 3768	40	600 800 1000	700	1,5 110	5 150	DO 5 métal (CB 34)

Tableau de sélection ($V_{RRM} = 200$ à $1\ 000$ $V_{I_O} < 100$ A)

I_O (A)	BOÎTIER	RÉFÉRENCE DIODE	V_{RRM} (V)
3 A		DO 27 A	200
		1 N 540 - 4	400
		6	600
		7	800
6 A		AG	200
		BY 214 - 400	400
		600	600
		800	800
10 A		DO 220 AB	200
		BY 239 - 400	400
		600	600
		800	800
12 A	DO 4	BYW 88-400	de 100 - 200 à 1 000 V
20 A		DO 5	200
		1 N 1195	400
		1 N 1196	600
		1 N 1197	800
40 A		DO 5	50 V
		1 N 1183	400 V
		1 N 1188	600 V

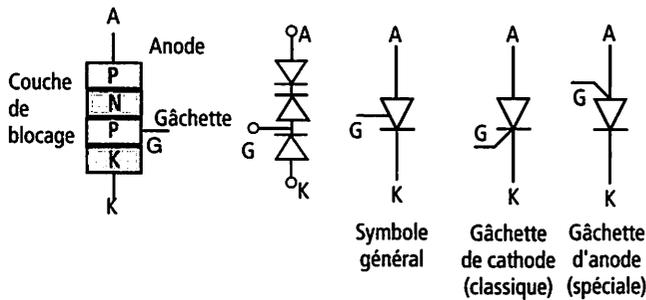


Pour faire varier la tension d'un redresseur à diodes, il faut agir sur la tension d'entrée, par exemple en faisant varier le nombre de spires du transformateur. Avec les thyristors, il est possible de faire varier la tension de sortie en agissant sur le temps de conduction du semi-conducteur ; on obtient alors un redressement contrôlé.

1. Rappels théoriques

Le thyristor est une diode commandée qui possède une gâchette en plus de l'anode et de la cathode.

1.1. Représentation



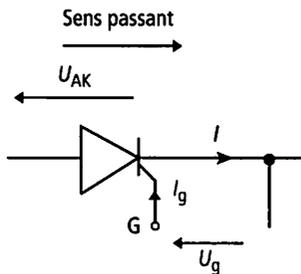
Les différentes couches PN peuvent se représenter sous la forme de 3 jonctions PN avec les sorties (A) anode, (K) cathode, (G) gâchette, c'est-à-dire trois diodes dont l'une est à l'inverse des deux autres.

1.2. Principe de fonctionnement

a) États du thyristor

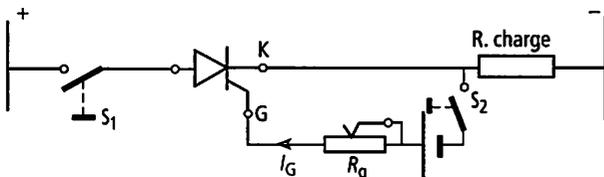
Le thyristor est tout d'abord une diode avec un sens passant et un sens bloqué.

- **Amorçage** : pour que le thyristor s'amorce, il faut :
 - que la tension U_{AK} soit positive ;
 - envoyer un courant de gâchette I_g .
 Une fois le thyristor amorcé, on peut supprimer le courant I_g .
- **État passant** : une fois amorcé, le thyristor se comporte comme une diode passante. La tension à ses bornes est de l'ordre de 1 V. Le courant I circule dans le sens anode-cathode.
- **Blocage** : pour bloquer le thyristor, il faut interrompre le courant I et lui appliquer une tension anode-cathode négative.
- **État bloqué** : une fois bloqué, le courant I dans le thyristor est nul quel que soit le sens de la tension U_{AK} .



b) Analyse du fonctionnement

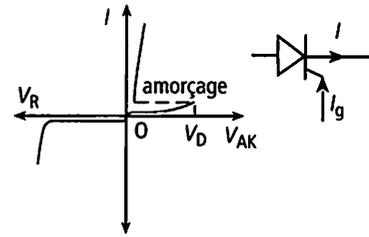
Étant donné le montage ci-dessous, si on ferme l'interrupteur S_1 , alors que S_2 est ouvert, le thyristor est alimenté sous une tension V_{AK} positive mais il ne conduit pas. À la fermeture de S_2 , on établit un courant de gâchette et on provoque alors l'amorçage du thyristor, qui devient conducteur et se comporte comme une diode.



Une fois le thyristor amorcé, la gâchette n'a plus aucune influence sur le thyristor qui se comporte comme une diode.

c) Caractéristique statique

Pour un courant de gâchette I_g , on a représenté le courant direct dans le thyristor.



1.3. Temps de commutation

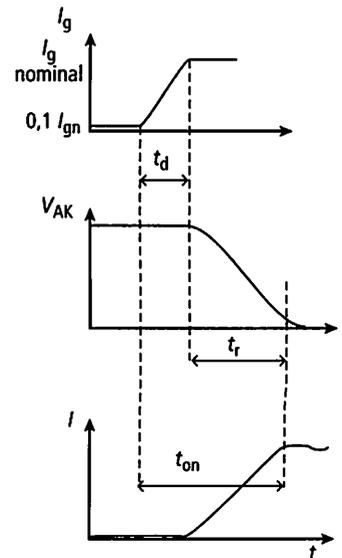
Au moment de l'amorçage, on peut représenter la variation des courants et des tensions. Les temps d'amorçage des thyristors sont loin d'être négligeables.

t_d : Temps de déclenchement, établissement du courant de gâchette (time delay).

t_r : Temps d'amorçage au niveau de la jonction (time rise).

t_{on} : Temps total d'amorçage.

t_q : Temps de désamorçage.



2. Caractéristiques constructeurs

Le tableau de la page 82 donne les principales caractéristiques des thyristors standard ; les abréviations employées sont relatives aux :

• Courants

- $I_{T(RMS)}$: Courant efficace à l'état passant d'un thyristor exemple : 12 A_(RMS) ;
- I_O : Courant moyen à l'état passant ;
- I_{TSM} : Courant de surcharge de pointe accidentelle à l'état passant pendant 10 ms ;
- I_{RM} : Courant inverse de crête ;
- I_{DM} : Courant de crête à l'état bloqué ;
- I_{TM} : Courant de crête à l'état passant.

• Tensions

- V_{RRM} : Tension inverse de pointe répétitive
 - V_{DRM} : Tension de pointe répétitive à l'état bloqué
 - V_{TM} : Tension de crête à l'état passant
- Tension maximale

• Gâchette

- V_{GT} : Tension de gâchette à l'amorçage
 - I_{GT} : Courant d'amorçage par la gâchette
- Commande de gâchette

• Température

- T_{case} : Température du boîtier
 - T_j : Température de la jonction
 - T_{amb} : Température ambiante
- Choix du radiateur

• Autres caractéristiques

- $\rho^2 t$: Contrainte thermique (A² s) ;
- dv/dt : Vitesse critique de croissance de la tension à l'état bloqué ;
- di/dt : Vitesse critique de croissance du courant à l'état passant.

Ces différentes caractéristiques permettent d'effectuer les choix des thyristors.

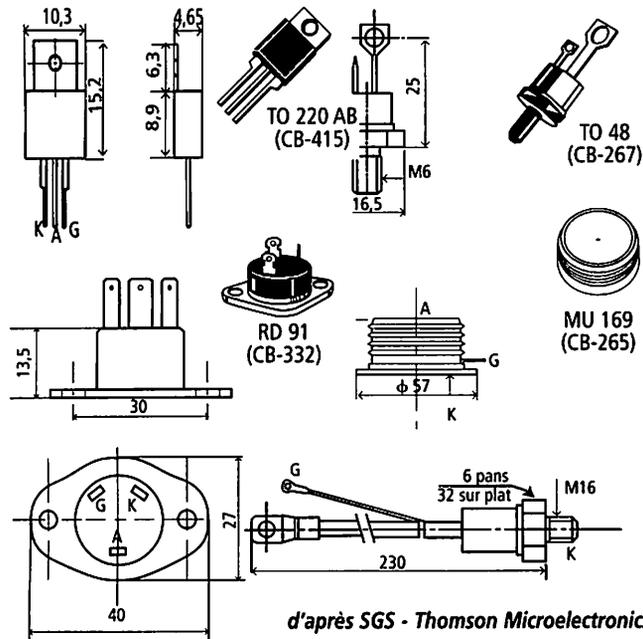
3. Dispositions technologiques

3.1. Repérage et encombrement des boîtiers

Il existe une très grande variété de boîtiers contenant les thyristors ; on peut les classer en :

- boîtiers plastique (en général jusqu'à 50 A maxi) ;
- boîtiers métalliques (depuis 20 A).

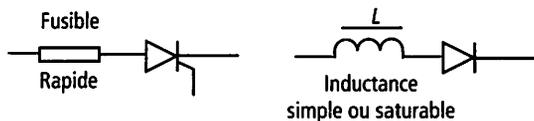
À titre indicatif, la figure ci-dessous montre différentes présentations de ces boîtiers et le repérage des bornes.



3.2. Protection des thyristors

a) Contre les surintensités

La protection peut être assurée soit par un fusible rapide, soit par un système limiteur électronique.

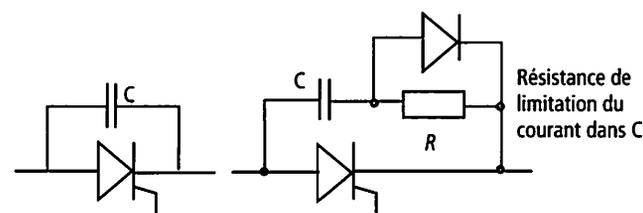


b) Contre les amorçages trop rapides di/dt

Une inductance montée en série avec le thyristor limite le di/dt.

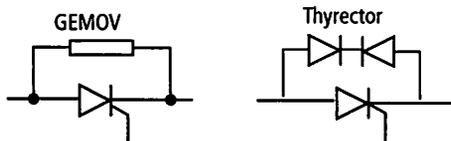
c) Contre les blocages trop rapides dv/dt

On emploie soit un condensateur, soit un ensemble condensateur avec une résistance pour limiter le courant.



d) Contre les surtensions

On peut mettre en parallèle avec le thyristor soit un demi-conducteur (GEMOV) (Métal oxyde varistor), soit un ensemble de deux diodes tête-bêche ou sélénium (thyrector).



3.3. Thyristors GTO (gate turn off)

Ce sont des thyristors appelés aussi à blocage. Une impulsion négative sur la gâchette assure le blocage des thyristors. Il existe des thyristors GTO jusqu'à 400 A sous 2 500 V.

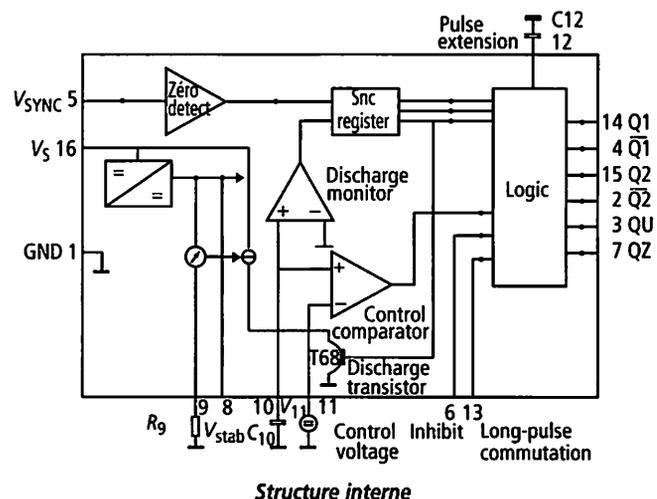
4. Circuits d'amorçage des thyristors

Le circuit d'amorçage a pour but d'appliquer sur la gâchette du thyristor une tension positive ; en redressement commandé, cette tension devra être synchronisée pour que l'amorçage s'effectue à des instants précis, en général, sous forme d'impulsions.

Exemple de circuit spécialisé : le TCA 785 (d'après Siemens).

Broche	Symbole	Fonction
1	GN _D	Masse
2	Q ₂	Sortie 2 Inversée
3	Q _U	Sortie U
4	Q ₁	Sortie 1 inversée
5	V _{SYNCR}	Tension de synchro.
6	I	Inhibition
7	QZ	Sortie Z
8	V _{REF}	Tension stabilisée
9	R ₉	Résistance de rampe
10	C ₁₀	Capacité de rampe
11	V ₁₁	Tension de contrôle
12	C ₁₂	Extension d'impulsion
13	L	Impulsion longue
14	Q ₁	Sortie 1
15	Q ₂	Sortie 2
16	V _S	Tension d'alimentation

Valeurs limites	Limite inférieure	Limite supérieure
Tension d'alimentation	- 0,5 V	18 V
Courant de sortie aux broches 14 et 15	- 10 mA	400 mA
Tension d'inhibition	- 0,5 V	V _S
Tension de contrôle	- 0,5 V	V _S
Tension pour impulsion courte	- 0,5 V	V _S
Courant de synchronisation	- 200 µA	± 200 µA
Tension de sortie aux broches 14, 15		V _S
Courant de sortie aux broches 2, 3, 4, 7		10 mA
Tension de sortie aux broches 2, 3, 4, 7		V _S
Température de jonction		125 °C
Température de stockage	- 55 °C	125 °C
Résistance thermique (système-air)		80 °C/W
Plage de fonctionnement		
Tension d'alimentation	8 V	18 V
Fréquence	10 Hz	500 Hz
Température ambiante	- 25 °C	85 °C



4 - Electronique de puissance

Caractéristiques des thyristors de 6 à 63 A

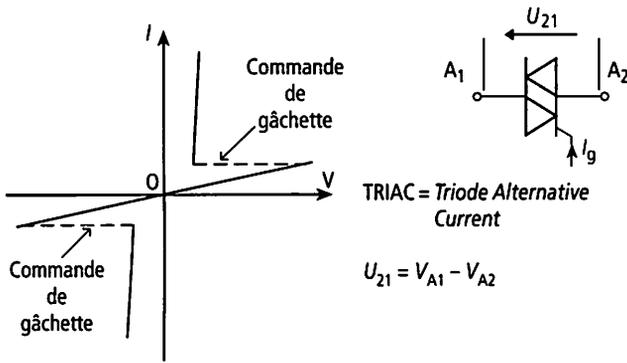
Types	I_o (A)	V_{RRM} $= V_{DRM}$ (V)	U_{TSM} 10 ms (A)	I_{RM} et V_{RRM} I_{DM} et V_{DRM} T_j max (mA)	$T_{amb} = 25^\circ C$			$dv/dt @$ T_j min 67 % V_{DRM} min (V/ μ s)	dI/dt max (A/ μ s)	Boîtier
					V_{GT} max (V)	I_{GT} max (mA)	V_{TM} / I_{TM} max (V)			
6 Arms / $T_{case} = 75^\circ C$ $T_j = 110^\circ C$										
TYN 056		50								 TO 220 AB (CB-415)
TYN 106		100								
TYN 206		200								
TYN 406	3,8	400	80	2	1,5	1,6	12	50	50	
TYN 806		800								
TYN 1006		1 000								
12 Arms / $T_{case} = 75^\circ C$ $T_j = 125^\circ C$ $\beta t = 72 A^2 s$										
TYN 0512		50								 TO 220 AB (CB-415)
TYN 112		100								
TYN 212		200								
TYN 412	7,6	400	120	3	1,5	1,6	24	50	100	
TYN 812		800								
TYN 1012		1 000								
25 Arms / $T_{case} = 65^\circ C$ $T_j = 125^\circ C$ $\beta t = 200 A^2 s$										
TYN 682		50								 TO 220 AB (CB-415)
TYN 683		100								
TYN 685	16	200	200	3	1,5	1,4	50	50	100	
TYN 688		400								
TYN 690		600								
40 Arms / $T_{case} = 65^\circ C$ $T_j = 110^\circ C$ $\beta t = 1250 A^2 s$										
BTW 67- 200		200								 RD 91 (CB-332)
BTW 67- 400		400								
BTW 67- 600	25	600	500	6	3	2	80	50	100	
BTW 67- 800		400								
BTW 67-1000		600								
BTW 67-1200		1 200								
25 Arms / $T_{case} = 70^\circ C$ $T_j = 125^\circ C$ $\beta t = 200 A^2 s$										
2N 681		25								 TO 48 (CB-267)
2N 682		50								
2N 683		100								
2N 685		200								
2N 687	16	300	200	3	1	2	50	50	20	
2N 688		400								
2N 689		500								
2N 690		600								
2N 691		700								
2N 692		800								
50 Arms / $T_{case} = 85^\circ C$ $T_j = 125^\circ C$ $\beta t = 1 250 A^2 s$										
BTW 48- 200		200								 TO 48 (CB-267)
BTW 48- 400		400								
BTW 48- 600	32	600	500	5	3	1,8	100	200	100	
BTW 48- 800		800								
BTW 48-1200		1 200								
63 Arms / $T_{case} = 105^\circ C$ $T_j = 125^\circ C$ $\beta t = 4 150 A^2 s$										
BTW 50- 100		100								 TO 65 (CB-269)
BTW 50- 200		200								
BTW 50- 400	40	400	910	12	3	3	500	200	100	
BTW 50- 600		600								
BTW 50- 800		800								
BTW 50-1000		1 000								
BTW 50-1200		1 200								

1. TRIAC (TRIode Alternative Current)

C'est un composant constitué comme deux thyristors montés « tête-bêche », mais il ne comporte qu'une seule gâchette ; il est essentiellement utilisé dans les gradateurs.

1.1. Caractéristiques électriques

Elles correspondent aux caractéristiques de 2 thyristors dans deux quadrants opposés.



1.2. Amorçage

L'amorçage peut être utilisé avec un courant de gâchette positif ou négatif, que la tension U_{21} soit positive ou négative ; il y a donc quatre combinaisons possibles :

Tension U_{21}	U_{21} positif		U_{21} négatif	
Courant gâchette	$I_g > 0$	$I_g < 0$	$I_g > 0$	$I_g < 0$
Commutation	Très bonne	Moyenne	Mauvaise	Bonne

On choisira de préférence un courant de gâchette positif. Dans le cas où on travaille suivant toutes les conditions de signe, il faut que la commande fonctionne dans le cas le plus défavorable (tension U_{21} négatif, courant de gâchette négatif).

Le blocage est obtenu après suppression du courant de gâchette et application d'une tension inverse à celle qui maintenait la conduction.

Le circuit d'amorçage peut être effectué :

- par diac : voir l'étude sur les diacs (paragraphe suivant) ;
- par transformateur d'impulsions, comme pour les thyristors ;
- par circuits intégrés spécialisés : ces circuits permettent la détection de passage à 0 de la tension à contrôler et une génération de train d'ondes pour la commande de gâchette.

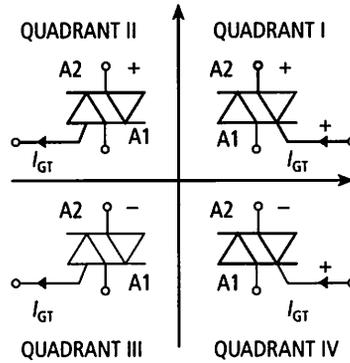
Exemple : Constructeur : Signetics, circuit TDA 1024.

1.3. Caractéristiques constructeurs (page 84)

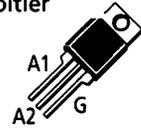
Le courant de gâchette est indiqué en fonction des quatre quadrants, un suffixe permet de repérer sa valeur.

Suffixe	Quadrants			
	I ++	II +-	III --	IV -+
T	5	5	5	5
D	5	5	5	10
S	10	10	10	10
A	10	10	10	25

Les autres valeurs sont identiques à celles données pour les thyristors.



Repérage boîtier



Ex : TO 220AB ou CB-415

1.4. Utilisation

Les triacs permettent de remplacer les deux thyristors dans les gradateurs. Ils peuvent contrôler des courants de 1 à 60 A avec des tensions inverses de 700 à 1 000 V. Leurs principales applications sont :

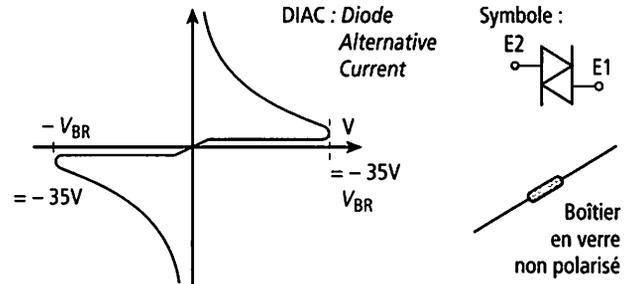
- les gradateurs de lumière ;
- les alimentations de radiateurs de chauffage électrique ;
- la commande de petits moteurs universels alimentés en courant alternatif.

2. DIAC (DIode Alternative Current)

C'est un élément semi-conducteur analogue à deux diodes montées en inverse, c'est-à-dire réunies par leur cathode.

2.1. Caractéristiques électriques

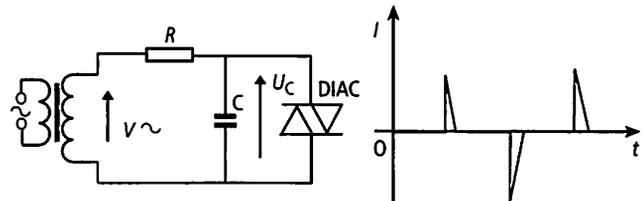
Le diac peut être considéré aussi comme un triac mais sans électrode de commande. Il s'amorce automatiquement dès que sa tension atteint environ 35 V (de 32 à 42 V selon les modèles). Dès qu'il est amorcé, la tension à ses bornes baisse considérablement.



2.2. Fonctionnement

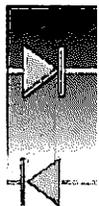
Le diac est surtout employé pour fournir des impulsions tantôt positives, tantôt négatives.

Étant donné le montage ci-dessous, l'ensemble R, C, diac est alimenté par une tension alternative $V > 50$ V.



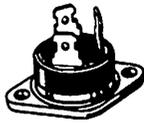
Lorsque la tension U_C est inférieure à la tension V_{BR} (tension d'avalanche), le diac présente une résistance infinie. Dès que $U_C = V_{BR}$, cette résistance devient très faible (équivalente à celle d'un interrupteur fermé), ce qui a deux conséquences :

- le courant ne passe plus par le condensateur, mais par le diac ;
- le condensateur se décharge à travers le diac ; on obtient ainsi une impulsion à chaque alternance.





Caractéristiques des triacs

Types	V_{DRM} ± (V)	I_{TSM} (A)	I_{DRM}^* et V_{DRM} max (mA)	I_{GT} (mA) max				I_H max (mA)	V_{TM} / I_{TM} max (V) (A)	$(dv/dt)_c^*$ min (V/μs)	dv/dt^* 67 % V_{DRM} type (V/20 m μs)	Boîtier	
				I ++	II +-	III --	IV -+						
10 Arms / $T_{case} = 75^\circ C$ $T_j = 110^\circ C$ $\rho t = 66 A^2 s$ Tension d'isolation = 2 500 V_{RMS}													
Isolée BTA 10-200 BTA 10-400 BTA 10-600 BTA 10-700 Avec suffixes B, C	Non isolée BTB 10-200 BTB 10-400 BTB 10-600 BTB 10-700	200 400 600 700	115	0,5	B	50	50	50	100	50 1,45 14	10 5	100 50	 TO 220 AB (CB-415)
16 Arms / $T_{case} = 80^\circ C$ $T_j = 125^\circ C$ $\rho t = 162 A^2 s$ Tension d'isolation = 2 500 V_{RMS}													
Isolée BTA 16-200 B BTA 16-400 B BTA 16-600 B BTA 16-700 B	Non isolée BTB 16-200 B BTB 16-400 B BTB 16-600 B BTB 16-700 B	200 400 600 700	180	0,5	B	50	50	50	100	50 1,6 22,5	10	100 min	
25 Arms / $T_{case} = 90^\circ C$ $T_j = 125^\circ C$ $\rho t = 450 A^2 s$ Tension d'isolation = 2 500 V_{RMS}													
Isolée BTA 26-200 BTA 26-400 BTA 26-600 BTA 26-700 Avec suffixes A ou B	Non isolée BTB 26-200 BTB 26-400 BTB 26-600 BTB 26-700	200 400 600 700	300	6	B	50	50	50	100	80 1,7 35	5 typ 5	150 150	 TOP 3 (CB-244)
30 Arms / $T_{case} = 80^\circ C$ $T_j = 125^\circ C$ $\rho t = 450 A^2 s$ Tension d'isolation = 2 500 V_{RMS}													
Isolée BTA 25-200 BTA 25-400 BTA 25-600 BTA 25-700 Avec suffixes A ou B		200 400 600 700	300	6	B	50	50	50	100	80 1,8 42	5 typ 5	150 150	 RD 91 (CB-332)
40 Arms / $T_{case} = 75^\circ C$ $T_j = 125^\circ C$ $\rho t = 800 A^2 s$ Tension d'isolation = 2 500 V_{RMS}													
Isolée BTA 40-200 BTA 40-400 BTA 40-600 BTA 40-700 Avec suffixes A ou B		200 400 600 700	400	6	B	50	50	50	100	80 1,8 60	5 typ 5	150 150	
25 Arms / $T_{case} = 60^\circ C$ $T_j = 100^\circ C$ $\rho t = 270 A^2 s$													
TRAL 1125 D TRAL 2225 D TRAL 3325 D TRAL 3825 D	200 400 600 700	230	3	100	100	100	150	100	2	35	5	100 min	 TO 48 (CB-267)
35 Arms / $T_{case} = 60^\circ C$ $T_j = 110^\circ C$ $\rho t = 450 A^2 s$													
TRAL 1135 D TRAL 2235 D TRAL 3335 D TRAL 3835 D	200 400 600 700	300	4 §	100	150	100	150	100	2	53	5	100	
60 Arms / $T_{case} = 75^\circ C$ $T_j = 125^\circ C$ $\rho t = 1 250 A^2 s$													
TGAL 602 TGAL 604 TGAL 606 TGAL 608 TGAL 610	200 400 600 800 1 000	500	10	100	150	100	150	100	2	100	5	100	 TO 65 (CB-269)

(d'après STMicroelectronics.)

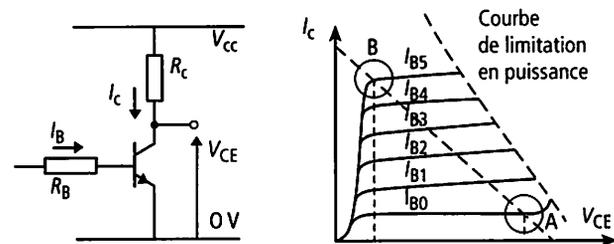
Les progrès réalisés dans la mise en œuvre des semi-conducteurs permettent de réaliser des transistors de puissance capables de contrôler des courants de plusieurs centaines d'ampères sous des tensions allant jusqu'à 1 000 V.

Les transistors de puissance sont donc employés en commutation dans deux domaines, celui des hacheurs et celui des onduleurs qui demandent des fréquences de commutation plus importantes.

1. Caractéristiques

On préfère utiliser les transistors NPN qui sont plus rapides et ont une meilleure tenue en tension que les transistors PNP.

1.1. Caractéristiques $I_C = f(V_{CE})$



Pour différentes valeurs de I_B , on obtient un réseau de courbes $I_C = f(V_{CE})$.

En commutation, on retient deux points de fonctionnement, A et B : A : transistor bloqué ; B : transistor saturé.

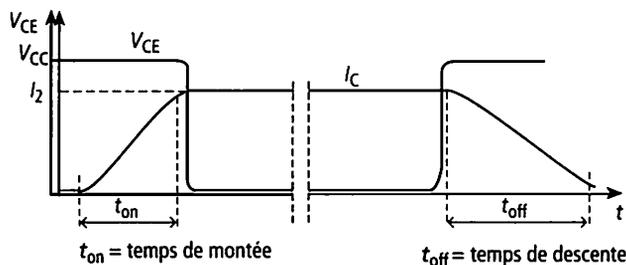
1.2. Commutation

Tout en étant très rapide, le passage de l'état bloqué à l'état saturé, et inversement, se présente de la façon suivante.

a) Passage à l'état saturé

On considère un transistor dont l'état initial est bloqué, non passant : $V_{CE} = V_{CC}$ et $I_C = 0$.

À l'application d'une tension sur la base, le courant I_C augmente et la tension V_{CE} s'annule lorsque I_C atteint la valeur I_2 au temps t_{on} .



b) Passage à l'état bloqué

Au départ, le transistor est à l'état saturé (passant) :

$$V_{CE} = 0 ; I_C = I_2$$

Au début du blocage, la tension V_{CE} prend la valeur V_{CC} et I_C décroît progressivement pendant le temps t_{off} .

c) Résultats

Lorsqu'un transistor doit couper une charge assez inductive, il en résulte une puissance de commutation non négligeable. L'énergie mise en œuvre dans le cas du graphique ci-dessus est :

$$W = \frac{V_{CC} I_2 (t_{on} + t_{off})}{2}$$

Cette énergie est d'autant plus importante que le circuit est plus inductif.

d) Conclusion

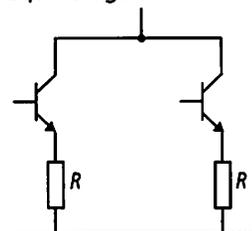
Pour augmenter le rendement de la commutation, on fait appel à des circuits d'aide à la commutation (CALC).

2. Montage des transistors

Pour obtenir des courants commutés importants, on peut être conduit à mettre des transistors en parallèle. Un déséquilibre du courant collecteur peut alors se produire, qui entraînerait la détérioration de l'un des transistors puis de l'autre. Pour éviter ce risque, on place des résistances d'équilibrage d'émetteur.

Schéma : Les résistances R d'équilibrage sont calculées pour une chute de tension de 0,5 à 1 V à leurs bornes.

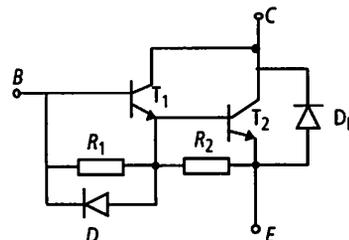
Les longueurs de connexions doivent être égales.



2.2. Montage Darlington

Ce montage permet d'obtenir un courant de commande beaucoup plus faible ; il est souvent réalisé par le constructeur sous forme intégrée.

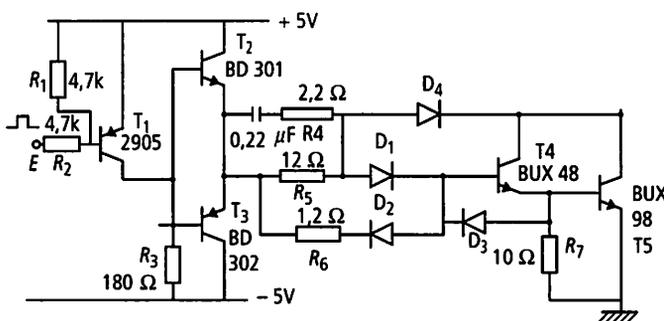
Schéma : Les résistances R_1 et R_2 avec la diode D permettent l'évacuation des charges stockées dans la jonction base-émetteur. D_1 : diode de roue libre, elle protège le transistor T_2 .



3. Commande de base

Pour réduire le temps d'amorçage du transistor, le courant I_B doit croître le plus rapidement possible. Pendant la conduction, I_B doit être suffisant pour maintenir la saturation, sans toutefois être excessif.

3.1. Exemple : Schéma de commande d'un hacheur



3.2. Explications du montage

- Le transistor BUX98 contrôle un courant d'environ 20 A sous 250 V, monté en Darlington avec un BUX48 ($I_B = 90$ mA).
- Le circuit CS, R_4 , R_5 permet de donner une pointe de courant sur la base de T_4 (overshoot).
- Le circuit R_6 , D_2 , D_3 permet d'appliquer un courant de base négatif pour extraire les charges de la jonction B-E au moment du blocage de T_4 .
- R_7 : Résistance de maintien de blocage du BUX98 ($V_{BE} = -1,5$ V).
- R_1 - R_2 : fixation du potentiel de base de T_1 .
- Le signal d'entrée est fourni en général par des portes logiques 0 + 5 V.



4. Caractéristiques des transistors de puissance

- Tensions**
 - V_{CEO} : tension continue collecteur-émetteur avec $I_B = 0$ et I_C spécifié.
 - V_{CEV} : tension continue collecteur-émetteur avec une tension de blocage V_{BE} et un courant I_C spécifié.
 - V_{CEW} : tension continue collecteur-émetteur maximale en phase de blocage avec un courant $I_{CW\ off}$ spécifié sans CALC.
- Courants**
 - I_C : courant collecteur (continu).
 - I_B : courant de base (continu).
 - I_{ERMS} : courant efficace émetteur.
 - $I_{CW\ off}$: courant collecteur maximal en phase de blocage sous une tension V_{CEW} sans réseau CALC.
 - I_{CRMS} : courant efficace collecteur.
- Temps**
 - t_r : temps de croissance.
 - $T_d + t_r$: temps total d'établissement.
 - t_{si} : retard à la décroissance du courant sur charge inductive.
 - t_s : retard à la décroissance.
 - t_{fi} : temps de décroissance du courant sur charge inductive.

• Divers

- CALC : circuit d'aide à la commutation.
- $R_{th(j-c)}$: résistance thermique jonction boîtier.
- di_c/dt : vitesse d'établissement du courant à la fermeture.
- P_{tot} : dissipation totale de puissance.
- h_{21E} : valeur statique du rapport de transfert direct du courant (émetteur commun).

5. Transistors à effet de champ de puissance

Ce sont les derniers nés des composants de puissance. Ils sont fabriqués selon la technologie MOS, ou à grille isolée et ils peuvent être à enrichissement canal N ou P.

La vitesse de commutation est dix fois supérieure à celle des transistors classiques.

La commande de ces transistors s'effectue en tension par amplificateur de puissance push-pull.

Leur champ d'application est assez vaste ; citons les alimentations à découpage, la commande des moteurs, les générateurs d'impulsions, etc.

Tableau de caractéristiques de transistors de puissance

Types NPN	V_{CEW} V_{CEO}^*	V_{CEV}	$I_{CW\ off}$	I_{ERMS} I_{Ccont}^*	$V_{CE(sat)}$		I_C / I_B		di_c/dt $t_d + t_r^*$ (1) min (A/ μ s)	t_r t_s max (μ s)	t_{si} t_f max (μ s)	t_{fi} max (μ s)	$R_{th(j-c)}$ max ($^{\circ}$ C/W)	Boîtier
					max (V)	(A)	(A)	(A)						

Transistors superswitch 2

BUX 47	400*	850	9	9*	1,5 (1)	6	1,2		1 *	4 *	0,4*	1,4	 TO 3 (CB-19) ou TO 3 modifié (CB-159)
BUX 48	400*	850	15	15*	1,5 (1)	10	2		1 *	5 *	0,4*	1	
BUX 98	400*	850	30	30*	1,5 (1)	20	4		1 *	5 *	0,4*	0,7	
BUX 348	450	850	45	45	2	30	6	150		4,5	0,4	0,58	
BUX 47 A	450*	1000	9	9*	1,5 (1)	5	1		1 *	4 *	0,4*	1,4	
BUX 48 A	450*	1000	15	15*	1,5 (1)	8	1,6		1 *	5 *	0,4*	1	
BUX 98 A	450*	1000	30	30*	1,5 (1)	16	3,2		1 *	5 *	0,4*	0,7	
BUX 348 A	450	1000	36	35	2	24	4,8	135		4,5	0,4	0,58	
BUX 48 C	700	1200	10	15*	2	6	2,4		1 *	6 (2)	0,6 (2)	1	
BUX 98 C	700	1200	20	30*	2	12	4,8		1 *	6 (2)	0,6 (2)	0,7	

Types NPN	V_{CEO}	I_{CRMS}	P_{tot} (1)	h_{21E} min	I_C (V)	$V_{CE(sat)}$ $t_d + t_r^*$ (2) max (V)		I_C / I_B t_f^* (A)		t_r t_f max (μ s)	t_{si} max (μ s)	t_{fi} max (μ s)	$R_{th(j-c)}$ max ($^{\circ}$ C/W)	Boîtier
						max (V)	(A)	(A)	(A)					

Transistors superswitch de forte puissance

ESM 3000	120	150	400	20	100	1,5	150	15	1 * typ	1,8*	0,5*	0,25	 TO 83 (CB-338)
ESM 1000 T	120	150	400	20	100	1,5	120	12	1 * typ	1,8*	0,5*		
ESM 3001	150	150	400	20	100	1,5	150	15	1 * typ	1,8*	0,5*		
ESM 3002	200	125	400	10	120	1,5	90	9	1,5*typ	2,5*	0,7*		
ESM 2060 T	200	125	400	10	120	1,5	70	7	1,5* typ	2,5*	0,7*		
ESM 3003	250	125	400	10	120	1,5	90	9	1,5* typ	2,5*	0,7*		
ESM 3304	400	120	400	3	100	1,5	65	13	1,5*	3,5*	1 *		
ESM 738 T	400	120	400	3	80	1,5	40	8	1,5*	3,5*	1 *		
ESM 3005	500	120	400	3	80	1,5	50	10	1,5*	3,5*	1 *		
ESM 3006	600	75	300	3	50	1,5	35	7	1,5* typ	5 *	1,5*		
ESM 3007	700	75	300	3	40	1,5	30	6	1,5* typ	5 *	1,5*		
ESM 4011	150	150	1200 (4)			1,5	200	20	1,5* typ	2,5*	1 *	0,13 (3) 0,08 (4)	 MU 86 (CB-263)
ESM 4014	400	150	1200 (4)	3	130	1,5	90	18	1,5 typ	4 *	1 *		
ESM 4015	500	150	1200 (4)	3	110	1,5	70	14	1,5 typ	4 *	1 *		
ESM 4016	600	120	940 (4)	3	85	1,5	60	12	1,5 typ	5 *	2 *		
ESM 4017	700	120	940 (4)	3	75	1,5	50	10	1,5 typ	5 *	2 *		
ESM 4019	900	80	940 (4)			1,5	40	10	1,8 typ	6 *	2 *		
ESM 4020	1000	80	940 (4)			1,5	36	9	1,8 typ	6 *	2 *		

(d'après STMicroelectronics.)

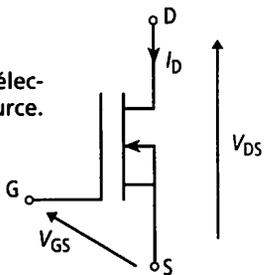
1. Transistor MOS

1.1. Symbole

Le transistor MOS possède trois électrodes nommées Grille, Drain et Source.

Contrairement au transistor bipolaire qui se commande en courant, le transistor MOS se commande en tension. Le courant dans la grille est nul en fonctionnement statique.

De part sa conception le transistor MOS possède une diode symbolisée par la flèche entre Drain et Source. Cette diode, montée en inverse, interdit toutes tensions V_{DS} négatives.



1.2. Caractéristiques statiques

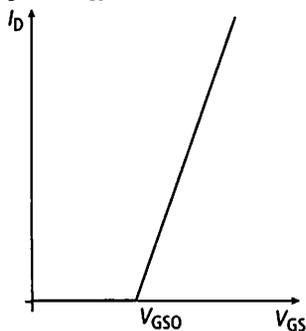
• Caractéristiques de transfert $I_D = f(V_{GS})$

Tant que la tension V_{GS} ne dépasse pas le seuil $V_{GS0} = 4V$, le transistor reste bloqué. Au-delà, le courant croît linéairement en fonction de V_{GS} .

Pour $V_{GS} \geq V_{GS0}$:

$$I_D = g(V_{GS} - V_{GS0})$$

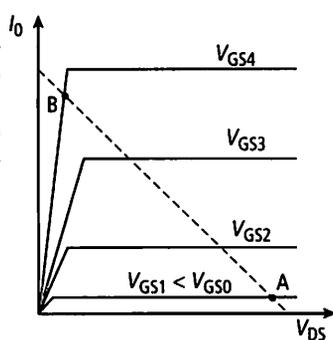
g est le gain du transistor.



• Caractéristiques de sorties

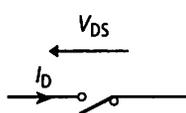
Les caractéristiques de sorties sont proches de celles des transistors bipolaires.

La commande se fait par une tension V_{GS} au lieu d'un courant i_b .

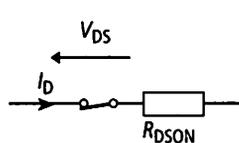


• Fonctionnement en commutation

- État bloqué (point A) : la tension V_{GS} est inférieure à V_{GS0} , le courant I_D est quasiment nul. Le transistor est équivalent à un interrupteur ouvert.



- État passant (point B) : la tension V_{GS} est suffisamment grande pour saturer le transistor. Le courant consommé par la grille est toujours nul. La tension V_{DS} est proportionnelle au courant I_D .



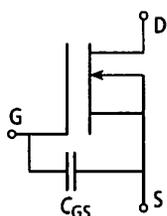
Le transistor est équivalent à un interrupteur fermé en série avec une résistance.

Cette résistance nommée R_{DSON} peut varier de quelques mΩ à plusieurs Ω selon les transistors.

1.3. Régime dynamique

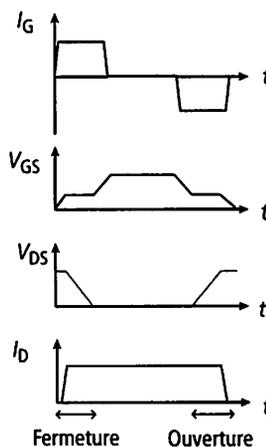
Le circuit équivalent entre G et S est une capacité. Pour commuter le transistor, il faut charger ou décharger cette capacité C_{GS} .

Pour que la commutation soit rapide, il faut que le courant de charge de C_{GS} soit important.



Pour une commande par une impulsion de courant, on remarque que V_{GS} possède une zone horizontale pendant la décroissance de V_{DS} . Ceci est dû aux capacités parasites du transistor MOS qui se chargent. Le comportement du transistor à l'ouverture est symétrique de celui à la fermeture.

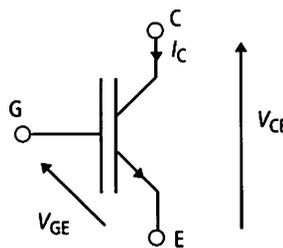
Pour une commande de grille énergétique, les transistors MOS, sont plus rapides que les transistors bipolaires lors des commutations.



2. Transistor IGBT

2.1. Symbole

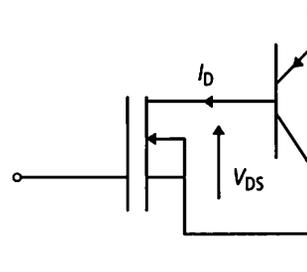
C'est un transistor bipolaire commandé par un transistor MOS. On retrouve une commande en tension entre Grille et Émetteur et les caractéristiques de sortie d'un transistor bipolaire.



• Schéma équivalent :

Bien que ce soit un transistor NPN qui apparaît sur le symbole, c'est un transistor PNP qui existe dans la structure interne.

La présence de la diode en inverse entre Drain et Source du transistor MOS fait que le transistor IGBT ne supporte pas une tension inverse collecteur-émetteur importante.

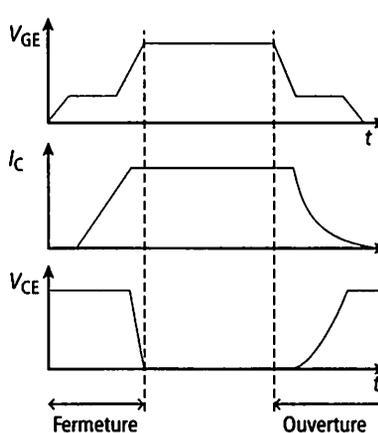


2.2. Fonctionnement dynamique

À la fermeture, le transistor IGBT se comporte comme un transistor MOS.

L'ouverture du transistor IGBT est plus longue, car une fois le transistor MOS bloqué, on n'a pas la possibilité d'extraire les charges stockées dans la base du transistor bipolaire.

Le courant I_C traîne avant de s'éteindre complètement.



Il faut retenir que :

- le transistor MOS est plus rapide à l'ouverture que l'IGBT ;
- la chute de tension à l'état conducteur est inférieure pour l'IGBT ;
- le transistor IGBT a une meilleure tenue en tension directe.

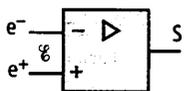


Un amplificateur opérationnel se présente sous forme d'un circuit intégré permettant de réaliser des opérations de calcul telles qu'additions, soustractions, comparaisons, etc., à partir d'un montage amplificateur comportant un grand nombre de transistors et de résistances.

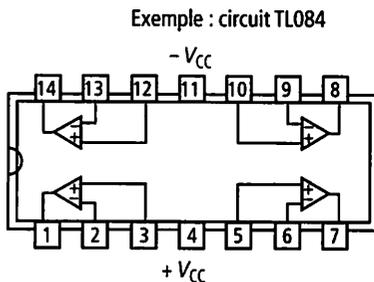
1. Présentation

C'est un amplificateur à circuit intégré linéaire comportant deux entrées et une sortie, il doit être alimenté sous une tension continue symétrique, en général + 15 V, - 15 V.

a) Symboles et branchements



e⁻ : entrée inverseuse
e⁺ : entrée non inverseuse
S : sortie



Dans les montages suivants, nous ne représenterons pas les tensions d'alimentation :

+ V_{CC} - V_{CC} ou masse.

L'amplificateur opérationnel est un circuit intégré linéaire qui amplifie la différence de tension ε entre ses entrées plus et moins.

b) Caractéristiques

• **Amplification A_d** : c'est le rapport entre la tension de sortie V_s et la tension différentielle ε.

$$A_d \approx 10^5$$

• **Résistance d'entrée R_e** : c'est la résistance entre les entrées + et -.

$$R_e \approx 10^5 \Omega$$

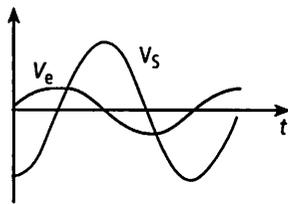
• **Résistance de sortie R_s** : c'est la résistance du générateur de sortie.

$$R_s \approx 1 \text{ k}\Omega$$

c) Régime de fonctionnement

• **Régime linéaire**

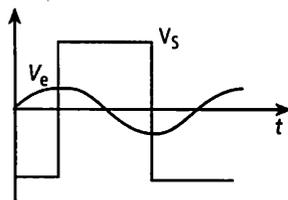
La tension de sortie V_s est une fonction de la tension d'entrée V_e. La tension V_s évolue à l'intérieur de la plage - V_{CC} ; + V_{CC}. Un montage linéaire est caractérisé par une impédance en contre-réaction entre la sortie et l'entrée -. La tension ε vaut zéro.



• **Régime non linéaire**

La tension de sortie V_s vaut soit + V_{CC}, soit - V_{CC} selon les tensions sur les entrées + et -. La tension ε est différente de zéro.

Si ε > 0 alors V_s = + V_{CC}.
Si ε < 0 alors V_s = - V_{CC}.



2. Amplification linéaire

2.1. Amplificateur inverseur

C'est le montage de base le plus utilisé, on l'appelle aussi amplificateur proportionnel.

Schéma :

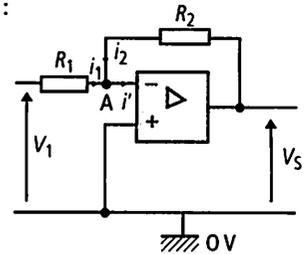
Au point A, les courants i⁻ = 0, ce qui entraîne i₁ + i₂ = 0.

D'autre part : $i_1 = \frac{V_1}{R_1}$ et $i_2 = \frac{V_s}{R_2}$

Comme i₁ = -i₂, on peut écrire :

$$\frac{V_s}{R_2} = -\frac{V_1}{R_1} \text{ ou } \frac{V_s}{V_1} = -\frac{R_2}{R_1}$$

$$V_s = -V_1 \frac{R_2}{R_1} \text{ et } A_v = -\frac{R_2}{R_1}$$



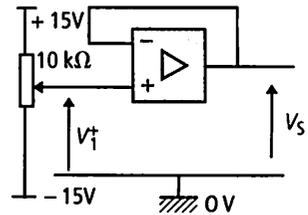
• **L'amplification est négative** ; par exemple, une tension sinusoïdale en entrée donnera une tension sinusoïdale en sortie, mais en opposition de phase.

2.2. Suiveur

Ce montage fonctionne en linéaire, aucune amplification en tension.

• **Amplification en tension A_v = 1.**

$$V_s = V_1^+$$



• **Très grande résistance d'entrée** : R_e = 10⁵ MΩ.

• **Faible résistance de sortie** : R_s = 1 kΩ.

Il est utilisé comme adaptateur d'impédance ou encore comme amplificateur en courant.

2.3. Additionneur inverseur

La tension de sortie est proportionnelle à la somme des tensions d'entrée ; la tension de sortie est inversée.

Schéma :

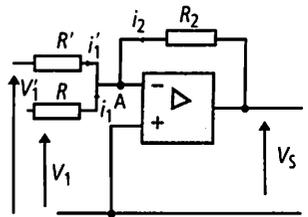
Au point A, on a : i₁ + i'₁ + i₂ = 0 où i₂ = -(i₁ + i'₁)

D'autre part :

V₁ = R₁ i₁, V'₁ = R'₁ i'₁
et V_s = R₂ i₂. On peut écrire :

$$\frac{V_s}{R_2} = -\left(\frac{V_1}{R_1} + \frac{V'_1}{R'_1}\right)$$

$$\text{d'où : } V_s = -R_2 \left(\frac{V_1}{R_1} + \frac{V'_1}{R'_1}\right)$$



L'additionneur inverseur permet surtout l'addition de tensions alternatives de même fréquence, mais qui peuvent être déphasées.

2.4. Soustracteur

Ce montage est équivalent au précédent mais il effectue la différence entre les tensions V₁ et V₂.

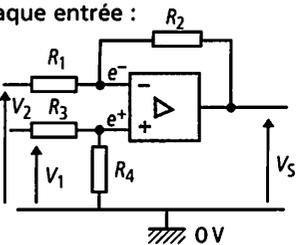
Une tension est appliquée à chaque entrée :

si R₁ = R₃ et R₂ = R₄ on a :

$$V_s = -\frac{R_2}{R_1} (V_1 - V_2)$$

L'amplification en boucle fermée est alors :

$$A_v = \frac{R_2}{R_1}$$



Les deux premiers montages sont les plus employés dans les systèmes d'électronique de puissance.

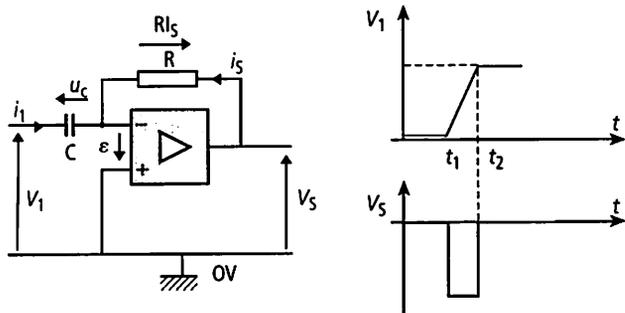
On préfère, pour les opérations de somme ou de soustraction, utiliser des systèmes numériques.

3. Dérivation - Intégration

Ce sont deux montages qui permettent d'obtenir en sortie d'ampli O.P. une tension proportionnelle à la dérivée, ou à l'intégrale de la tension d'entrée.

3.1. Dérivateur

L'ensemble condensateur C et résistance R caractérise ce montage.



• Relations

C'est un montage linéaire, on a donc $\epsilon = 0$ ce qui implique :
 $V_1 = u_c$ pour la maille d'entrée ;
 $V_s = R \cdot i_s$ pour la maille de sortie ;
 $i_1 = -i_s$ pour les courants.

Dans un condensateur, la relation qui lie le courant à la tension est :

$$i = C \frac{du_c}{dt}$$

Appliquée au montage, ceci nous donne :

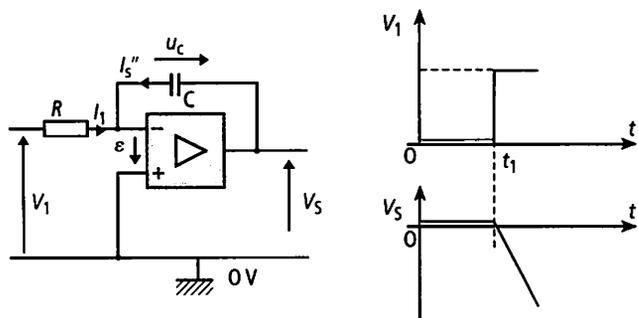
$$i_1 = C \frac{du_c}{dt} = C \frac{dV_1}{dt} \text{ et } i_1 = -i_s = -\frac{V_s}{R}$$

Soit : $-\frac{V_s}{R} = C \frac{dV_1}{dt}$ ou $V_s = -RC \frac{dV_1}{dt}$

La tension de sortie V_s est proportionnelle à la dérivée de la tension d'entrée V_1 . Le signe - signifie un changement de signe ou un déphasage de 180°.

3.2. Intégrateur

Le condensateur et la résistance sont inversés par rapport au montage précédent.



• Relations :

C'est également un montage linéaire, on a donc $\epsilon = 0$.
 $V_1 = Ri_1$ pour la maille d'entrée ;
 $V_s = u_c$ pour la maille de sortie ;
 $i_1 = -i_s$ pour les courants.

Pour le condensateur : $i_s = C \frac{du_c}{dt} = C \frac{dV_s}{dt}$

et : $i_s = -i_1 = -\frac{V_1}{R}$ soit $-\frac{V_1}{R} = C \frac{dV_s}{dt}$

$dV_s = -\frac{V_1}{RC} dt$ ou $V_s = -\frac{1}{RC} \int V_1 dt$

La tension de sortie est proportionnelle à l'intégrale de la tension d'entrée. On retrouve également le signe - de changement de signe.

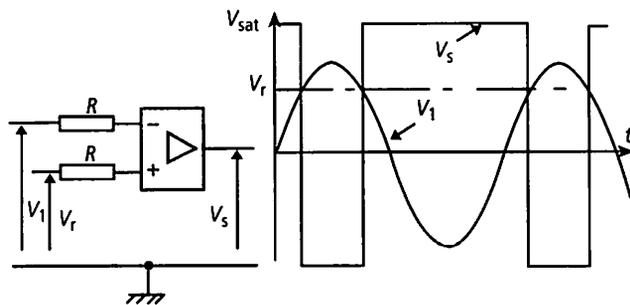
4. Fonctionnement tout ou rien

On dit encore que l'amplificateur fonctionne en régime saturé ; sa tension de sortie ne peut prendre que 2 états.

4.1. Comparateur

La tension de sortie passe de l'état $+V_{sat}$ à $-V_{sat}$ dès que l'écart entre les tensions V_1 et V_r change de signe selon la relation :

$$\epsilon > 0 \rightarrow V_s = +V_{sat} \text{ et } \epsilon < 0 \rightarrow V_s = -V_{sat}$$

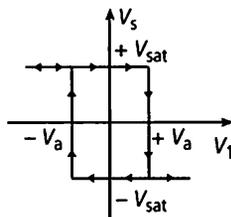
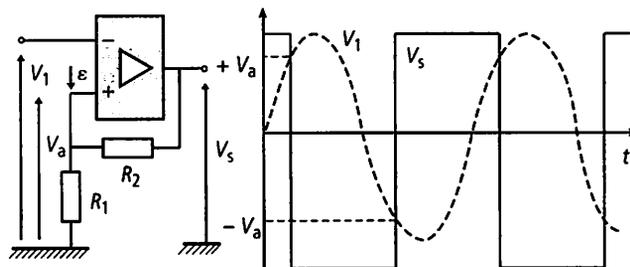


Deux états de fonctionnement :

$$V_1 > V_r \text{ entraîne } V_s = -V_{saturation}$$

$$V_1 < V_r \text{ entraîne } V_s = +V_{saturation}$$

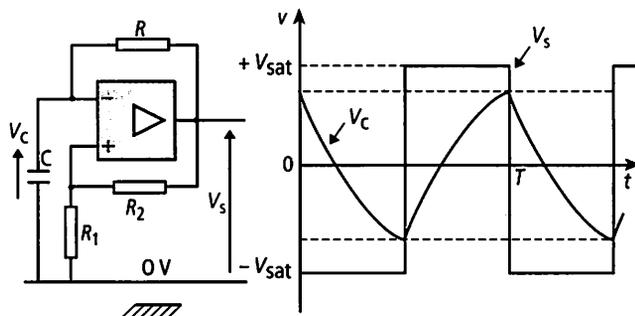
4.2. Trigger



C'est un montage non linéaire. La tension de sortie V_s est égale à $+V_{sat}$ ou à $-V_{sat}$.

4.3. Multivibrateur astable

C'est un montage qui permet d'obtenir des signaux carrés qui peuvent constituer une base de temps.



• Fonctionnement :

Aucune tension n'est appliquée en entrée, seules la charge et la décharge du condensateur font passer la tension de sortie de $+V_{sat}$ à $-V_{sat}$.

Dans le cas particulier où $R_1 = R_2$, la période du multivibrateur est :

$$T = 2,2 RC$$

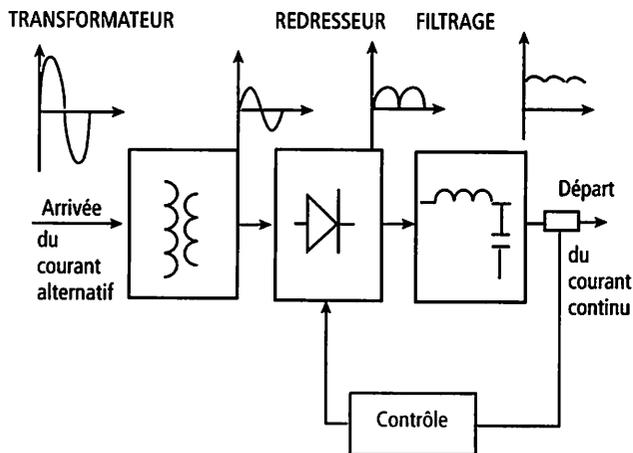


Très souvent, on souhaite disposer de courant continu à partir du réseau de distribution alternatif à 50 Hz.

La solution la plus courante fait appel aux redresseurs.

1. Constitution générale d'un redresseur

Le redresseur a pour rôle essentiel de fournir, à partir du courant alternatif, un courant continu sous une tension fixe ou réglable.



- **Le transformateur** : il adapte la tension d'entrée à la tension de sortie du redresseur ; il est déterminé en fonction de la puissance et de la tension de sortie.

- **Le redresseur** : il redresse le courant alternatif en un courant variable mais unidirectionnel.

- **Le filtre** : c'est un ensemble de condensateurs et inductances qui permet d'obtenir un lissage du courant, c'est-à-dire que le courant pulsé est transformé en un courant ondulé se rapprochant du courant continu.

- **Contrôle** : dans le cas où le redresseur est contrôlé (diodes remplacées par des thyristors), on peut réaliser une tension variable en sortie.

Le redresseur comporte également les protections de tous ses éléments.

2. Les grandeurs sinusoïdales

2.1. La fonction sinusoïdale

La fonction sinusoïdale appliquée au courant alternatif est donnée par la relation :

$$i = \hat{i} \sin \omega t$$

\hat{i} : valeur instantanée du courant
 \hat{i} : valeur maximale du courant
 ω : pulsation en radians par seconde
 t : temps en seconde

La fréquence est le nombre de sinusoïdes dans une seconde, exprimée en hertz.

La période est la durée d'une sinusoïde exprimée en seconde.

$$fT = 1 \quad \text{ou} \quad f = \frac{1}{T}$$

f : fréquence
 T : période

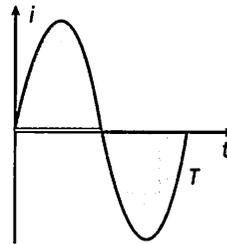
Sachant qu'une période représente un angle de 2π radians sur la sinusoïde alors :

$$\omega T = 2\pi$$

ou $\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f$

2.2. Valeur moyenne

L'intensité moyenne d'un courant variable $i = f(t)$ est égale à l'intensité que doit avoir un courant continu constant pour transporter dans le même temps la même quantité d'électricité.



La valeur moyenne est représentée par la moyenne des surfaces sur une période entre la fonction est l'axe horizontal.

Elle se note \bar{I} .

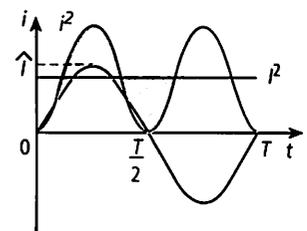
En courant alternatif sinusoïdal :

$$\bar{I} = 0$$

2.3. Valeur efficace

L'intensité efficace d'un courant variable $i = f(t)$ est l'intensité I du courant continu constant qui produirait le même dégagement de chaleur que i s'il passait pendant le même intervalle de temps dans la même résistance.

La valeur efficace au carré est représentée par la surface moyenne sur une période de la fonction au carré.



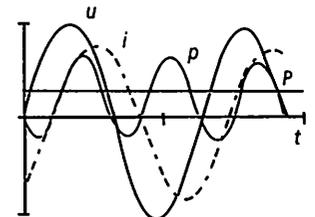
Elle se note I .

En courant alternatif sinusoïdal :

$$I = \frac{\hat{I}}{\sqrt{2}} = 0,707 \hat{I}$$

2.4. Puissance

La puissance est représentée par la surface moyenne sur une période de la fonction produit $u \times i$.

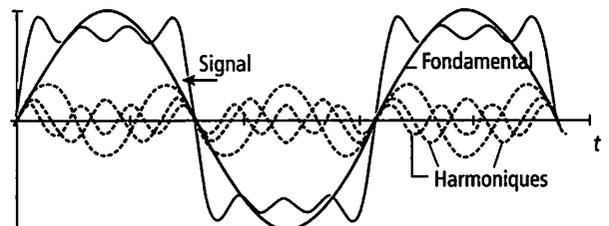


En courant et tension alternatifs :

$$P = UI \cos \varphi$$

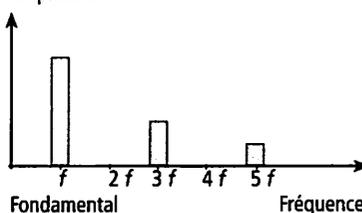
2.5. Grandeurs périodiques non sinusoïdales

En électronique de puissance, les courants ou tensions sont souvent périodiques mais non sinusoïdaux. On peut se ramener à une étude sinusoïdale en utilisant le théorème de Fourier.



Un signal périodique peut se décomposer en une grandeur continue plus une somme de grandeurs sinusoïdales de fréquences multiples de celle du signal. La sinusoïde de fréquence identique à celle du signal est appelée fondamentale. Les autres sinusoïdes se nomment les harmoniques.

Amplitude



Représentation spectrale d'un signal périodique

3. Redressement monophasé monoalternance

En général, un transformateur alimenté par le réseau fournit une tension alternative qui est redressée par des diodes ou des thyristors.

Nous désignerons par :

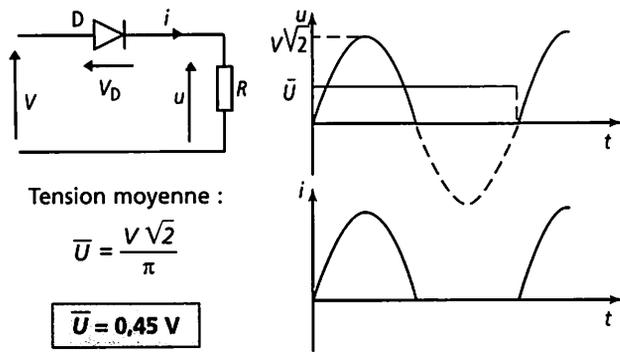
V : la tension efficace fournie par le réseau ;

\bar{U} : la tension moyenne aux bornes de la charge ;

V_D : la tension aux bornes de la diode au moment où elle n'est pas conductrice.

3.1. Charge résistante

La diode D conduit lorsque la tension V est positive. Lorsque la tension V s'inverse, la diode ne conduit plus.



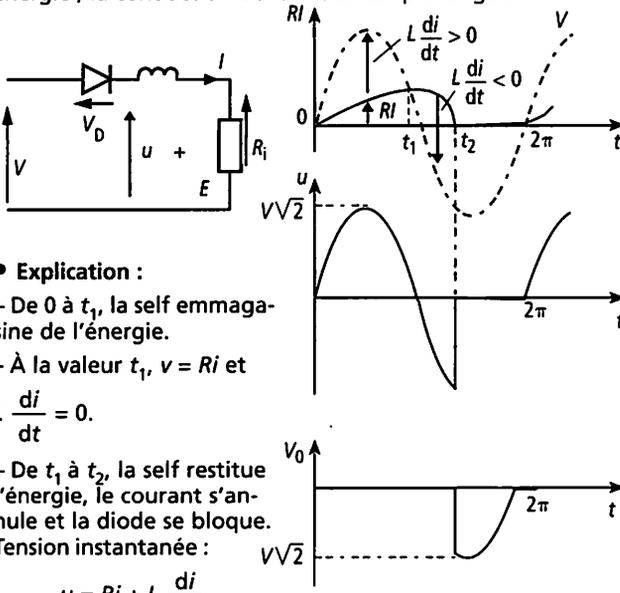
Tension inverse maximale aux bornes de la diode.

$V_{Dmax} = -V\sqrt{2}$

Courant moyen $\bar{I} = \frac{\bar{U}}{R}$

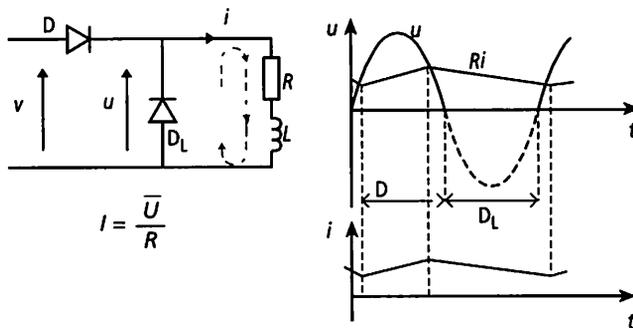
3.2. Charge inductive

La présence d'une inductance dans le circuit de charge fait qu'il y a emmagasinement d'énergie et restitution de cette énergie ; la conduction de la diode est prolongée.



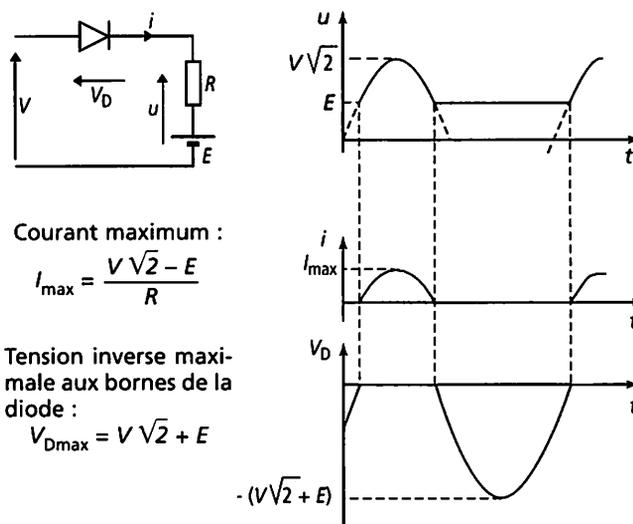
3.3. La diode de roue libre

Lorsque la charge comporte une résistance et une inductance, le montage d'une diode en inverse permet, lorsque la diode D ne conduit pas à l'énergie emmagasinée par la self de circuler dans le circuit L, D_L, R et d'y provoquer un lissage du courant.



La tension u ne peut plus devenir négative, car la diode de « roue libre » (D_L) assure la continuité du courant.

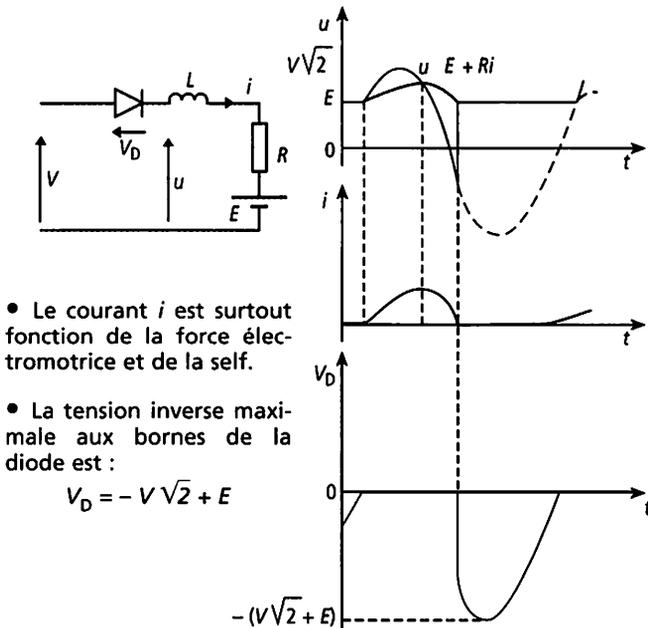
3.4. Charge avec force électromotrice (fém)



La présence d'une force électromotrice dans le circuit augmente la tension moyenne, mais diminue le courant. La tension aux bornes de la diode en inverse est augmentée.

3.5. Charge avec inductance et fém

Ce cas se rencontre chaque fois qu'un système redresseur alimente un enroulement de machine tournante.

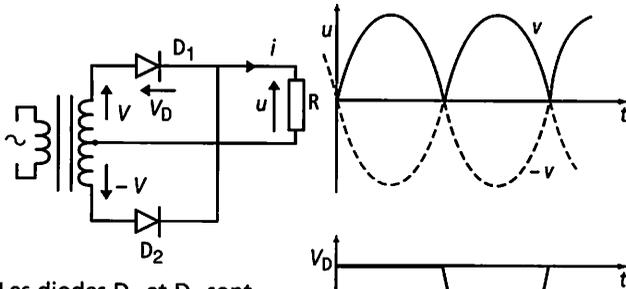


4. Redressement monophasé double alternance

Ce redressement permet de réaliser des alimentations d'une plus grande puissance et présente l'avantage d'avoir une ondulation plus faible que le monoalternance.

4.1. Redressement à point milieu

Ce montage impose un transformateur à point milieu, c'est la juxtaposition de deux redressements monoalternance.



Les diodes D₁ et D₂ sont passantes chacune pendant 1/2 période.

• Tension moyenne :

$$U = \frac{2\hat{V}}{\pi} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} V \quad \bar{U} = 0,9 V$$

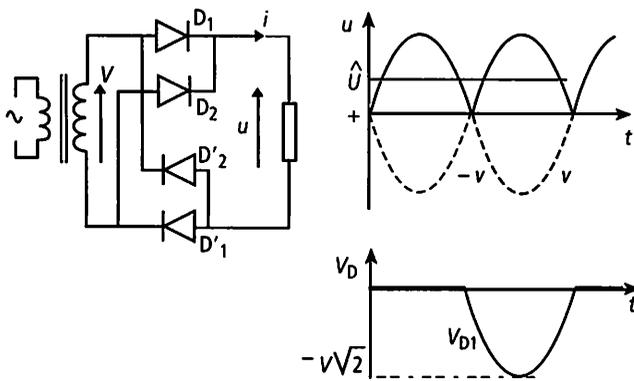
• Tension inverse maximale aux bornes d'une diode :

$$V_{Dmax} = -2 V\sqrt{2}$$

• Courant moyen : $\bar{I} = \frac{\bar{U}}{R}$

4.2. Pont de Graëtz

C'est un montage symétrique dans lequel 2 diodes conduisent en même temps.



a) Charge résistive

Les chronogrammes sont identiques au redressement à point milieu.

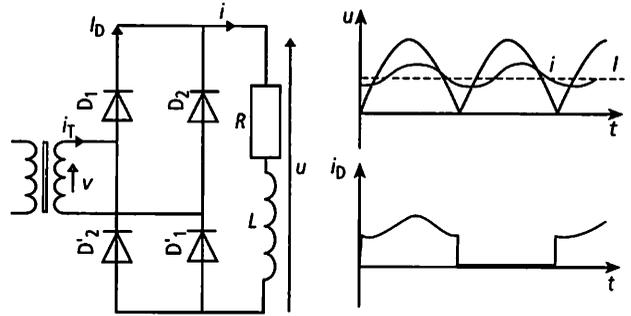
• Tension moyenne :

$$\bar{U} = \frac{2\hat{V}}{\pi} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} V \quad \bar{U} = 0,9 V$$

• Tension inverse maximale aux bornes d'une diode :

$$V_{Dmax} = -V\sqrt{2}$$

b) Charge inductive



$$\bar{U} = 0,9 V ; \bar{I} = \frac{\bar{U}}{R}$$

Le courant moyen, dans une diode est deux fois plus petit que celui dans la charge.

$$\bar{I}_D = \frac{\bar{I}}{2}$$

Si la charge est très inductive, alors le courant i est constant.

$$\bar{I} = I$$

Courant moyen : $i = \frac{\bar{U}}{R}$

Courant moyen dans une diode :

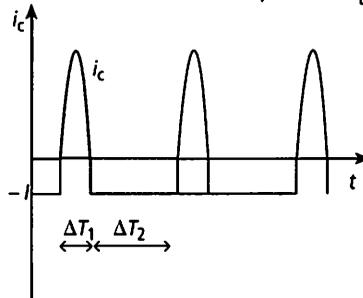
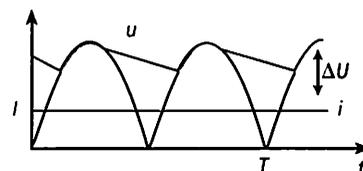
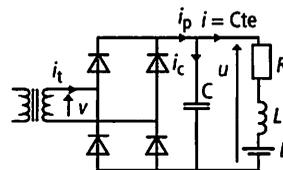
$$\bar{I}_D = \frac{I}{2}$$

Courant au secondaire du transformateur :

- pendant l'intervalle 0, T/2, le courant passe par la diode D₁ et revient par la diode D'₁. Le courant i_T circule dans le sens positif.

- pendant l'intervalle T/2, T, le courant passe par la diode D₂ et revient par la diode D'₂. Le courant i_T circule dans le sens négatif. Le courant i_T est un signal carré.

c) Charge capacitive



Durant l'intervalle ΔT_1 , le condensateur C se charge. Durant l'intervalle ΔT_2 , la tension u est supérieure à la tension secteur. Le condensateur fournit le courant i . La quantité d'électricité stockée est égale à celle qu'il fournit. Les aires situées en dessus et en dessous de l'axe sont identiques, le courant i_c a pour valeur moyenne zéro :

$$\bar{I}_c = 0$$

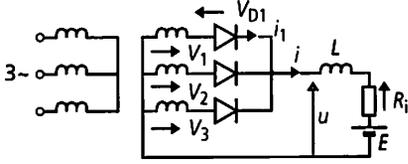
Le courant i_p est entièrement positif : $i_p = i_c + i$.

Le courant i_T est alternatif mais pulsé. Il est très riche en harmoniques d'où un mauvais facteur de puissance pour ce montage.

5. Redressement triphasé

5.1. Redressement simple alternance

a) Schéma : montage P3



b) Courbes

• Tension moyenne :

$$\bar{U} = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} \hat{V} = 3 \frac{\hat{U}}{2\pi}$$

$$\bar{U} = 1,17 \cdot V$$

• Tension inverse maximale aux bornes d'une diode :

$$V_{D \max} = \hat{U}$$

• Courant moyen dans une diode :

$$\bar{I}_D = \frac{\bar{I}}{3}$$

• Courant moyen dans la charge :

$$\bar{I} = \frac{\bar{U} - E}{R}$$

Dans ce montage, le courant moyen dans un enroulement secondaire du transformateur n'est pas nul.

$$\bar{I}_1 = \frac{\bar{I}}{3} \text{ et sa valeur efficace vaut : } I_1 = \frac{I}{\sqrt{3}}$$

• Puissance dans la charge :

$$P = \bar{U} I = \frac{3\hat{U}}{2\pi} I \quad P = \frac{3\sqrt{3}\sqrt{2}}{2\pi} V I$$

• Puissance apparente au secondaire du transformateur :

$$S = 3 V I_1 \quad S = \frac{3}{\sqrt{3}} V I$$

• Facteur de puissance au secondaire du transformateur :

$$F_p = \frac{P}{S} \quad F_p = \frac{3\sqrt{2}}{2\pi} = 0,675.$$

Le facteur de puissance de ce montage est mauvais. On peut l'améliorer au primaire du transformateur en réalisant un couplage triangle/étoile.

Le facteur de puissance au primaire passe à :

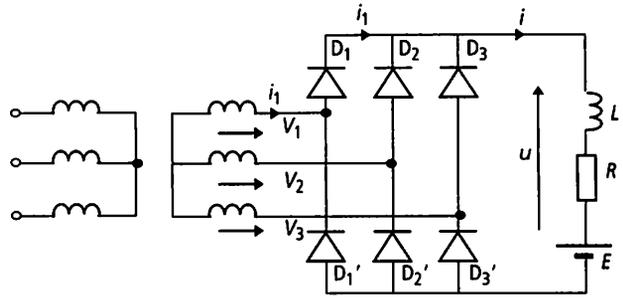
$$F_p = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} = 0,827.$$

Dans le redressement triphasé simple alternance avec débit sur une charge R, L, E, on considère le courant I_c comme continu car il est lissé par l'inductance L.

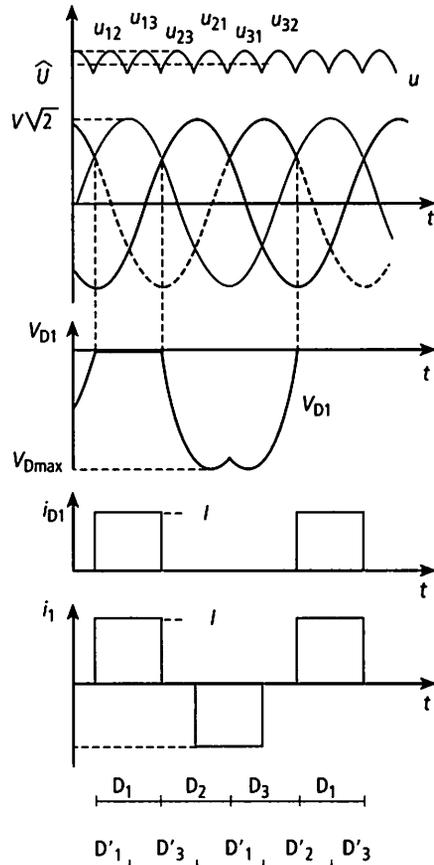
Pour que la circulation du courant soit ininterrompue, il faut que $E < \hat{U}/2$.

5.2. Redressement double alternance : pont de Graëtz

a) Schéma : montage PD3



b) Courbes



• Tension moyenne :

$$\bar{U} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} \hat{V} = \frac{3\hat{U}}{\pi} \quad \bar{U} = 2,34 V$$

• Puissances dans la charge :

$$P = \bar{U} I = \frac{3\hat{U}}{\pi} I ; S = 3 V I_1 = 3 \sqrt{\frac{2}{3}} V I$$

• Facteur de puissance au secondaire du transformateur :

$$F_p = \frac{P}{S} ; F_p = \frac{3}{\pi} = 0,955.$$

6. Classification des montages redresseurs

On distingue trois types de montages :

- P : les montages à commutation parallèle ;
- PD : les montages à commutation parallèle double ;
- S : les montages à commutation série.

L'indication du mode de commutation est suivie de celle du nombre q de phases du circuit : q = 2 : monophasé ; q = 3 : triphasé ; q = 6 : hexaphasé.



Les montages redresseurs à thyristors utilisent les mêmes schémas que les montages à diodes. En remplaçant les diodes par des thyristors, on peut retarder la conduction. Le montage est alors appelé redresseur contrôlé, alors qu'avec les diodes on est en redresseur à commutation naturelle. L'angle de retard d'amorçage sera défini par la lettre α .

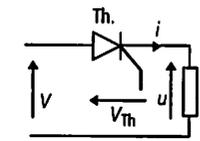
1. Redressement monophasé contrôlé

L'étude de ce mode de redressement est réalisée de façon à bien appréhender les phénomènes qui peuvent être observés sur un oscilloscope lors de l'observation de signaux sur des montages industriels.

1.1. Charge résistante

À l'apparition de l'impulsion d'amorçage, la tension s'établit aux bornes de la résistance.

Tension moyenne :

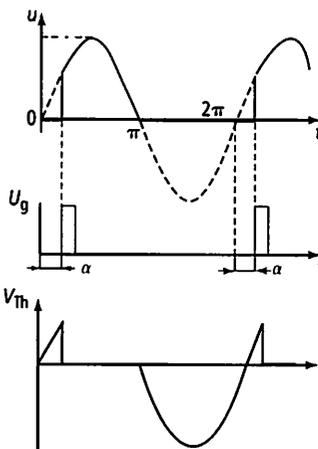


$$V_{\text{moy}} = \frac{V\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{1 + \cos \alpha}{2}$$

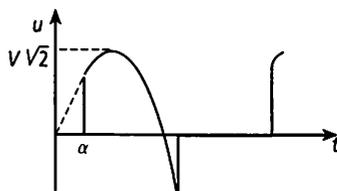
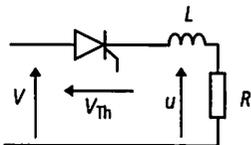
Tension efficace :

$$V = \frac{V}{\sqrt{2}} \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin^2 \alpha}{2\pi}}$$

Forme de la tension inverse :

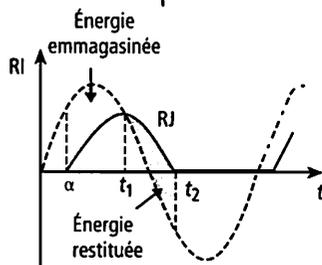


1.2. Charge inductive



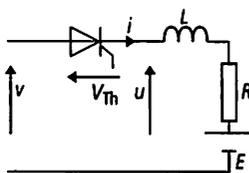
• De α à t_1 : l'inductance L emmagasine de l'énergie.

• De t_1 à t_2 : l'inductance L restitue l'énergie.

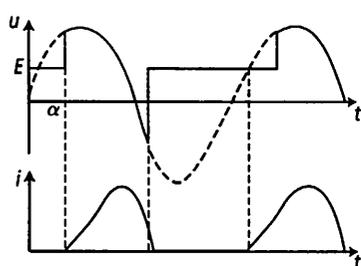


1.3. Charge R-L-E

La charge complète comprend : une résistance, une inductance, une fém ; elle peut simuler une machine tournante, moteur à courant continu.



$$u = E + Ri + L \frac{di}{dt}$$



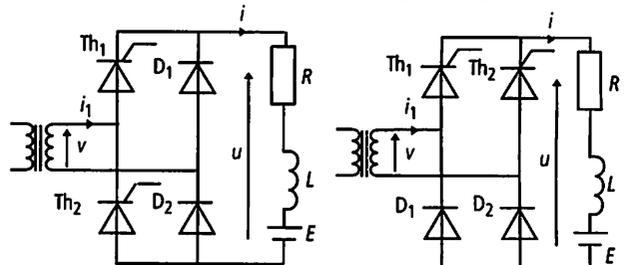
Tension inverse : $V_{\text{Th}} = V\sqrt{2} + E$

2. Pont de Graëtz mixte

C'est un pont composé de deux thyristors et deux diodes. Il existe deux structures, les ponts symétriques et les ponts asymétriques. Ils donnent tous les deux les mêmes chronogrammes au niveau de la charge.

Pont asymétrique :

Pont symétrique :



• Chronogrammes pour un pont symétrique et pour un courant i constant :

Valeur moyenne de la tension :

$$\bar{U} = \frac{\hat{V}}{\pi} (1 + \cos \alpha)$$

Courant moyen dans un thyristor :

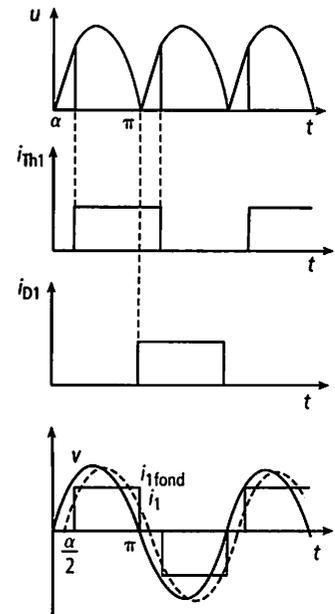
$$\bar{I}_{\text{th}} = \frac{I}{2}$$

Courant moyen dans une diode :

$$\bar{I}_{\text{D}} = \frac{I}{2}$$

Valeur efficace du courant au secondaire du transformateur :

$$I_1 = \sqrt{\frac{\pi - \alpha}{\pi}} I ;$$



Le courant i_1 peut se décomposer en un fondamental $I_{1\text{fond}}$ et des harmoniques.

• Fondamental du courant i_1 :

On démontre que la valeur maximale du courant fondamental vaut :

$$\hat{I}_{1\text{fond}} = \frac{4I}{\pi} \cos \frac{\alpha}{2}$$

On remarque également que le courant fondamental est déphasé d'un angle $\frac{\alpha}{2}$ par rapport à la tension v . Un pont mixte consomme de la puissance réactive.

• Puissance active au secondaire du transformateur :

$$P = VI_{1\text{fond}} \cos \frac{\alpha}{2}$$

$$P = VI \frac{4}{\pi\sqrt{2}} \cos^2 \frac{\alpha}{2}$$

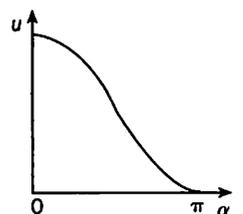
• Puissance réactive au secondaire du transformateur :

$$Q = VI_{1\text{fond}} \sin \frac{\alpha}{2}$$

$$Q = VI \frac{4}{\pi\sqrt{2}} \cos \frac{\alpha}{2} \sin \frac{\alpha}{2}$$

$$Q = \frac{2}{\pi\sqrt{2}} VI \sin \alpha$$

Évolution de la tension moyenne en fonction de α : la tension moyenne n'évolue pas linéairement en fonction de α .



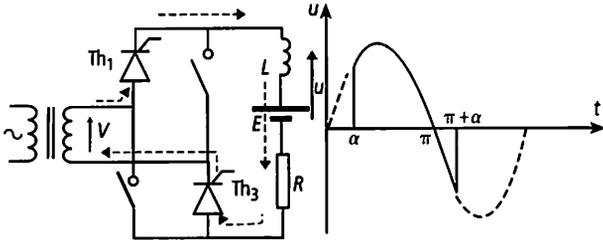
3. Pont complet

3.1. Fonctionnement

On suppose que la charge est suffisamment inductive pour maintenir un courant constant.

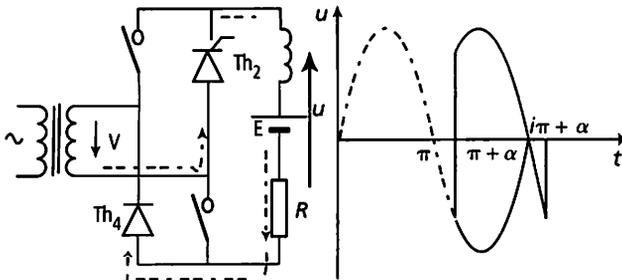
Les thyristors Th_1 et Th_3 sont amorcés au temps t correspondant à l'angle α . Les thyristors Th_2 et Th_4 sont amorcés aux temps t_1 correspondant à l'angle $\pi + \alpha$.

- Amorçage de Th_1 et Th_3



Le circuit s'établit par Th_1 , L , E , R et Th_3 ; l'inductance étant suffisamment grande, le courant se maintient dans la maille après l'angle π . Le courant n'ayant pas d'autres chemins possibles, la tension v se retrouve aux bornes de la charge bien qu'elle soit négative.

- Amorçage de Th_2 et Th_4



À l'amorçage de Th_2 et Th_4 , une tension négative apparaît aux bornes des thyristors Th_1 et Th_3 ce qui entraîne leur blocage. Le courant circule dans la maille Th_2 , L , E , R et Th_4 jusqu'à $2\pi + \alpha$ où les thyristors Th_1 et Th_3 s'amorcent de nouveau.

3.2. Chronogrammes

- Tension moyenne :

$$\bar{U} = \frac{2\hat{V}}{\pi} \cos \alpha$$

- Courant moyen dans un thyristor :

$$\bar{I}_{Th} = \frac{I}{2}$$

- Courant efficace au secondaire du transformateur :

$$I_2 = I$$

- Fondamental du courant au secondaire du transformateur :

$$\hat{I}_{1fond} = \frac{4}{\pi} I$$

- Puissance active :

$$P = \bar{U} I = V I \cos \alpha$$

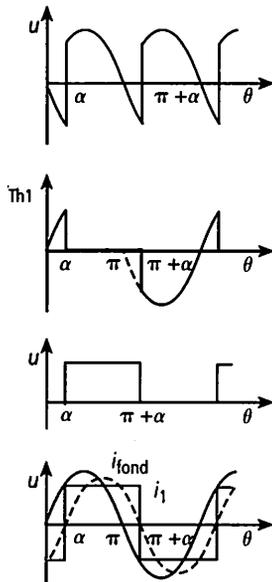
$$P = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} V I \cos \alpha$$

- Puissance réactive :

$$Q = V I_{1fond} \sin \alpha = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} V I \sin \alpha$$

- Puissance apparente :

$$S = V I_2 = V I$$



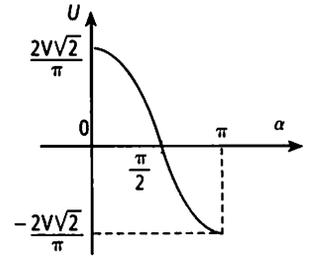
3.3. Fonctionnement en onduleur assisté

- Représentation de la tension moyenne aux bornes de la charge :

Tension moyenne :

$$U = \frac{2V\sqrt{2}}{\pi} \cos \alpha$$

$$0 \leq \alpha \leq \pi$$



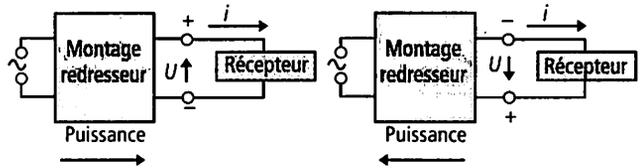
- Cas où $0 \leq \alpha \leq \frac{\pi}{2}$

La tension moyenne est positive et le courant i est positif, la puissance est positive et va du réseau vers la charge. C'est le fonctionnement en redresseur.

- Cas où $\frac{\pi}{2} \leq \alpha \leq \pi$

La tension moyenne est négative et le courant i est toujours positif car il ne peut s'inverser dans les thyristors. La puissance est négative et va de la charge vers le réseau. C'est le fonctionnement en onduleur assisté. Le fonctionnement ne peut avoir lieu que si la charge est une génératrice dont la fém (ou sens de rotation) s'inverse.

- Sens réels des courant et tension :



- Chronogrammes :

Toutes les formules sont identiques quel que soit le mode de fonctionnement.

Pour α proche de π , la tension v_{th1} au moment de l'amorçage est faible, ce qui peut compromettre sa mise en conduction. En pratique, on prévoit une butée à $\alpha = 150^\circ$.

Le fondamental du courant i_1 est déphasé de l'angle α par rapport à la tension v .

- La puissance active :

$$P = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} V I \cos \alpha$$

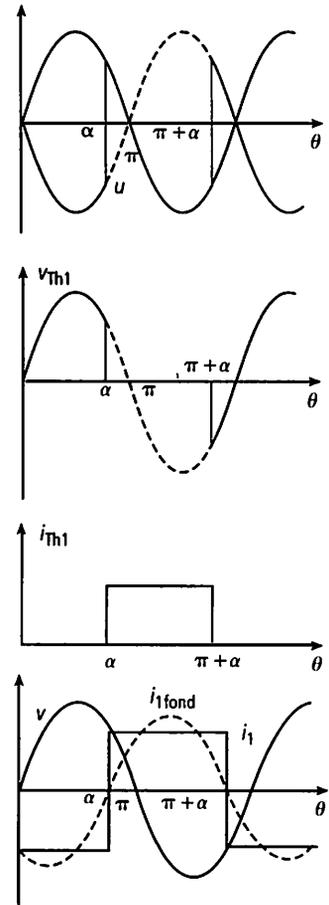
change de signe à $\alpha = \pi/2$.

Pour le point particulier $\alpha = \pi/2$, la tension moyenne et la puissance sont nulles.

- La puissance réactive :

$$Q = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} V I \sin \alpha$$

est toujours positive. Le montage consomme toujours de la puissance réactive quel que soit le mode de fonctionnement.



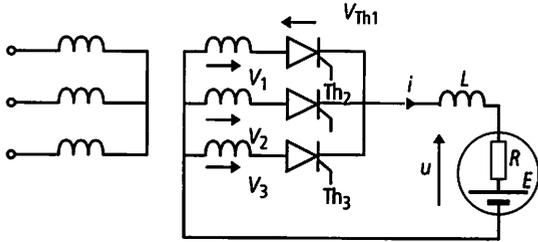
4. Redressement commandé en triphasé

Dès que l'on dépasse quelques kilowatts, on a intérêt à utiliser des montages en triphasé, qui donnent un courant continu avec un faible taux d'ondulation.

4.1. Redressement simple alternance

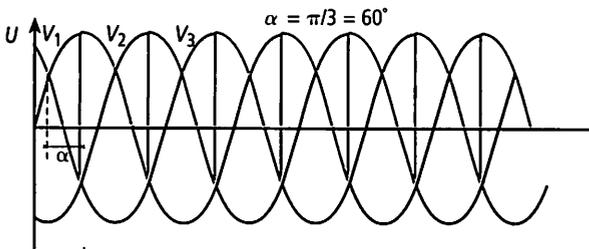
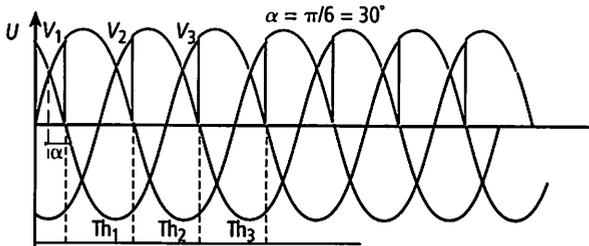
a) Schéma de montage : P₃

Les diodes sont remplacées par des thyristors.



b) Marche en redresseur

Lorsque l'angle d'amorçage est inférieur à π/2 (0 ≤ α ≤ π/2) la tension est formée de portions de sinusoides.

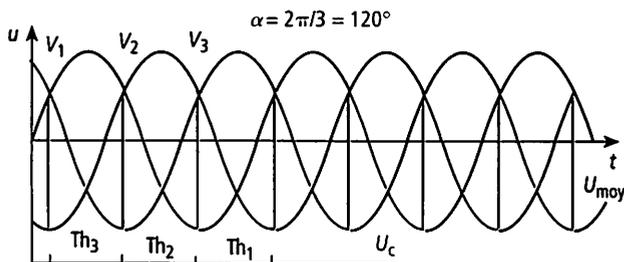


Tension moyenne :
$$\bar{U} = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} \hat{V} \cos \alpha = \frac{3\hat{U}}{2\pi} \cos \alpha$$

c) Marche en onduleur

Lorsque α > π/2, la tension moyenne \bar{U} s'inverse. La charge doit fonctionner en générateur pour obtenir ce type de marche.

Les formules sont les mêmes qu'en redresseur à condition que le courant i soit ininterrompu.

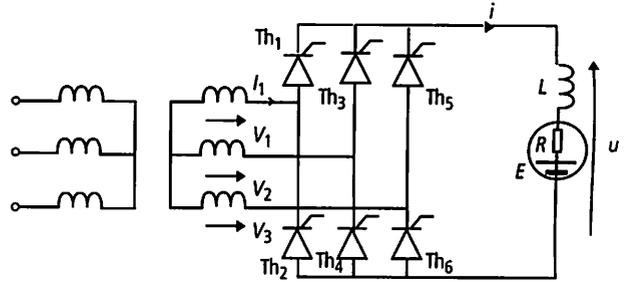


- L'extinction d'un thyristor passant est assurée par l'amorçage du thyristor suivant.

4.2. Redressement double alternance

a) Schéma de montage

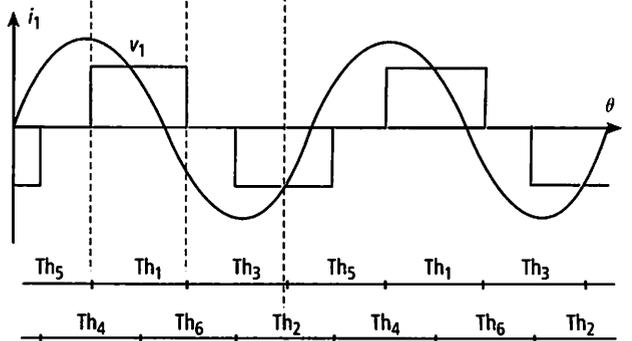
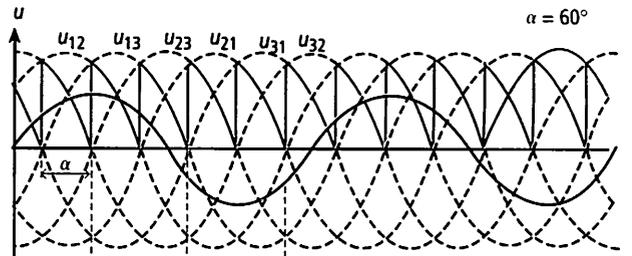
Les diodes sont remplacées par des thyristors.



b) Marche en redresseur

L'amorçage des thyristors est décalé d'un angle α par rapport aux points de commutations naturelles.

Pour un courant i constant le montage fonctionne en redresseur pour 0 ≤ α ≤ π/2.

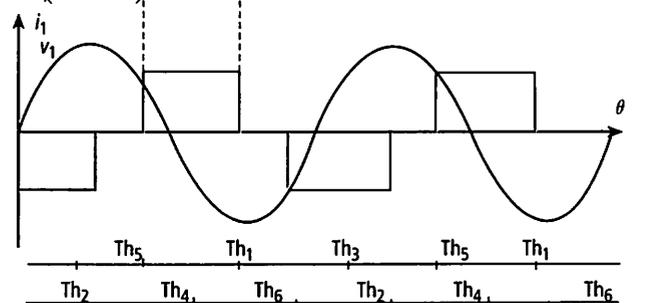
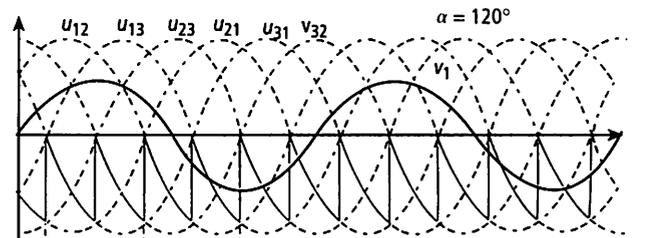


Tension moyenne :
$$\bar{U} = \frac{3\hat{U}}{\pi} \cos \alpha$$

Le fondamental de i₁ se trouve déphasé de α par rapport à v₁.

c) Marche en onduleur

Pour π/2 ≤ α ≤ π, la tension moyenne devient négative, l'énergie va de la charge vers le réseau.



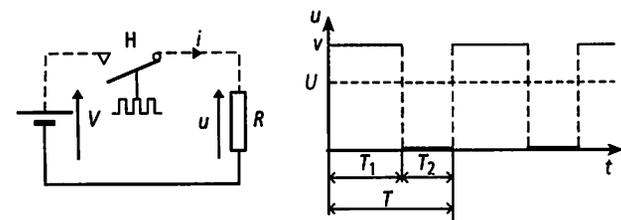
Les relations sont les mêmes qu'en marche en redresseur.

Le hacheur réalise en courant continu la même fonction que le transformateur en courant alternatif, c'est-à-dire un changement de tension avec un rendement voisin de 1, ce qui n'est pas le cas avec un montage en rhéostat ou potentiomètre.

1. Principe

1.1. Charge résistive

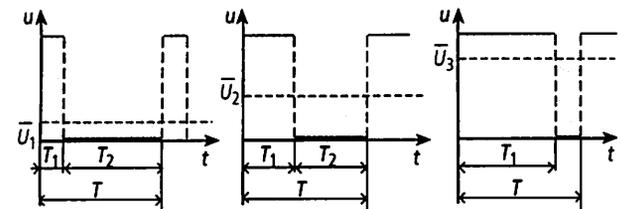
Une source à tension continue constante (batterie d'accumulateurs) de tension V alimente une résistance R par l'intermédiaire d'un interrupteur qui s'ouvre et se ferme très rapidement.



T : période ; T_1 : temps de fermeture ; T_2 : temps d'ouverture.

La tension aux bornes de la résistance a 2 valeurs :
 - H ouvert, état 0, $u = 0$ aucun courant I_C
 - H fermé, état 1, $u = V$ courant $i : V/R$.

Selon la durée de fermeture par rapport à la durée totale de la période, la tension moyenne (\bar{U}) pourra varier de 0 à V .



Si T est la période, on peut définir par T_1 la durée de fermeture et T_2 la durée d'ouverture. Si on pose $T_1 = \alpha T$, α représentant la durée de fermeture par rapport à la durée de la période,

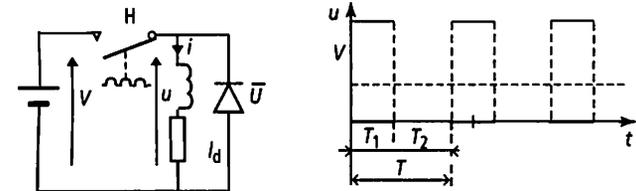
$$\alpha = \frac{\text{durée de fermeture}}{\text{durée de la période}} = \frac{T_1}{T} \quad 0 \leq \alpha \leq 1$$

La tension moyenne \bar{U} sera alors de :

$$\bar{U} T = V \alpha T \quad \text{ou encore} \quad \boxed{\bar{U} = \alpha V}$$

1.2. Charge résistive + inductive

Au montage comprenant une inductance, il est nécessaire d'ajouter une diode de roue libre ; en son absence à l'ouverture et à la fermeture de H, on observerait des surtensions importantes.



La tension moyenne est toujours $\bar{U} = \alpha V$.

Le courant varie selon une loi exponentielle ; sa valeur maxi

$$I_{\text{max}} = \frac{E}{R}$$

Pour que le courant soit presque continu, il faudrait $\frac{L}{R} \gg T$.

L'intensité dans le circuit est périodique et varie entre 2 valeurs plus ou moins éloignées selon la valeur du rapport de conduction α et de L .

1.3. Charge sur un moteur (R, L, E)

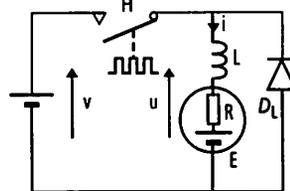
Le moteur comporte toujours une fém E , une résistance d'induit et une inductance interne ou en série avec l'induit.

En régime continu, c'est-à-dire avec $T \gg \frac{L}{R}$, la tension

$$\bar{U} = \alpha V = E + R \bar{I}$$

Courant moyen :

$$\bar{I} = \frac{\alpha V - E}{R}$$



2. Les différents hacheurs

2.1. Hacheur série

La charge est suffisamment inductive pour que le courant i soit considéré comme constant sur une période.

$$i = \bar{I} = I$$

• Tension moyenne :

$$\boxed{\bar{U} = \alpha V}$$

• Courant moyen dans le transistor :

$$\bar{I}_T = \alpha I$$

• Courant moyen dans la diode :

$$\bar{I}_D = (1 - \alpha) I$$

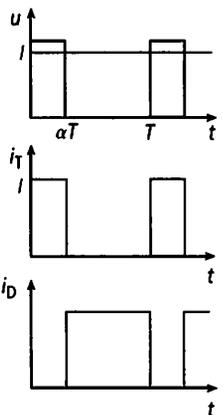
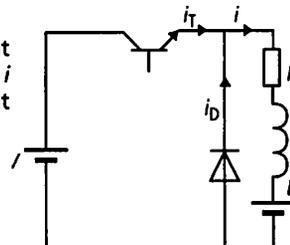
• Puissance dans la charge :

$$P = \bar{U} I = \alpha V I$$

• Puissance dans la source :

$$P = \bar{I}_T V = \alpha V I$$

En réalité, la puissance dans la charge est légèrement inférieure à celle dans la source car il y a des pertes dans le transistor et dans la diode.



2.2. Hacheur parallèle ou survolteur

Le transistor T_r est fermé pendant l'intervalle $[0; \alpha T]$. Le courant circule dans la maille V, L, T_r . La self emmagasine de l'énergie.

Durant l'intervalle $[\alpha T; T]$, le transistor est bloqué. Le courant circule par la maille V, L, D, E . La self restitue son énergie.

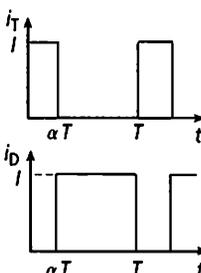
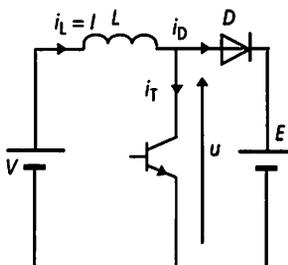
• Tension moyenne aux bornes du transistor :

$$\bar{U} = \frac{(T - \alpha T) E}{T} = (1 - \alpha) E$$

La tension moyenne aux bornes de l'inductance est nulle.

$$V = \bar{U}_L + \bar{U} = \bar{U} = (1 - \alpha) E$$

$$\boxed{E = \frac{V}{1 - \alpha}}$$



Pour $0 < \alpha < 1$, E est supérieur à V .

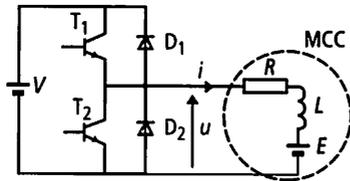
• Courant moyen dans le transistor : $\bar{I}_T = \alpha I$.

• Courant moyen dans la diode : $\bar{I}_D = (1 - \alpha) I$.

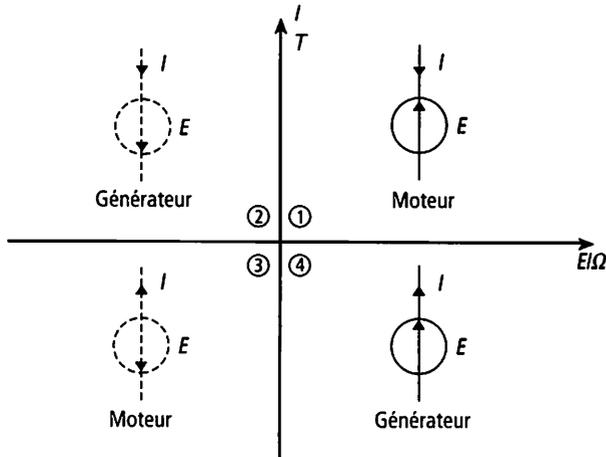
2.3. Hacheur deux quadrants

La tension u ne peut être que positive à cause de la diode D_2 . Le courant i peut être bidirectionnel.

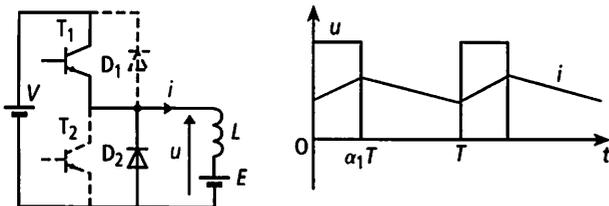
La commande des deux transistors est complémentaire.



• **Quadrant de fonctionnement :**

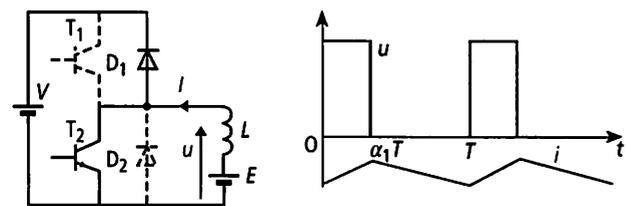


• **Fonctionnement dans le quadrant 1 :**



Le courant i est toujours positif. Pendant l'intervalle $0; \alpha T$, le courant i circule dans le transistor T_1 . Durant l'intervalle $\alpha T; T$, le courant passe dans la diode de roue libre D_2 . On retrouve le fonctionnement d'un hacheur série.

• **Fonctionnement dans le quadrant 4 :**



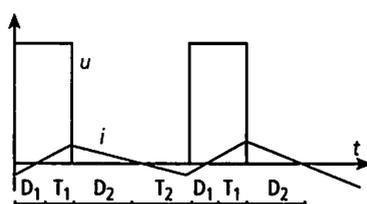
Le courant i est toujours négatif. Durant l'intervalle $\alpha_1 T; T$, le courant i passe dans le transistor T_2 . Durant l'intervalle $0; \alpha_1 T$, il passe par la diode de roue libre D_1 . On retrouve le fonctionnement d'un hacheur parallèle où le transistor est commandé pendant un temps $\alpha_2 T$.

$$V = \frac{E}{1 - \alpha_2} \quad \text{car source et charge sont inversées par rapport à l'étude du hacheur parallèle.}$$

$$\alpha_2 T = T - \alpha_1 T \Rightarrow \alpha_2 = 1 - \alpha_1 \Rightarrow V = \frac{E}{\alpha_1} \Rightarrow \boxed{E = \alpha_1 V}$$

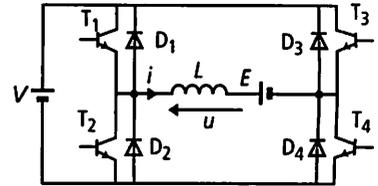
La relation $E = \alpha \cdot V$ est toujours vérifiée quel que soit le quadrant de fonctionnement.

Le passage d'un quadrant à l'autre se fait sans discontinuité de courant.



2.4. Hacheur quatre quadrants

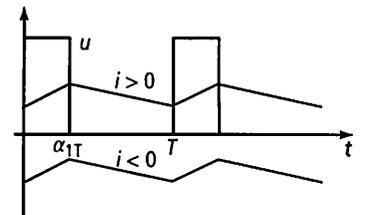
C'est l'association de deux hacheurs deux quadrants. Il existe deux modes de commande des transistors.



• **Commande séparée**

– **Fonctionnement dans les quadrants 1 et 4 :**

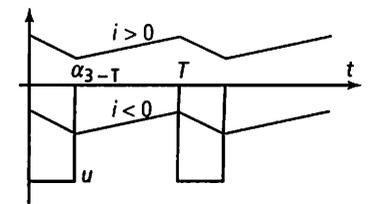
T_4 est toujours fermé, T_1 et T_2 ont des commandes complémentaires. On retrouve le fonctionnement du hacheur deux quadrants précédents. Lorsque i est positif, le courant passe dans T_4 , s'il est négatif il passe dans D_4 .



$$\boxed{\bar{U} = \alpha_1 V}$$

– **Fonctionnement dans les quadrants 2 et 3 :**

T_2 est toujours fermé, T_3 et T_4 ont des commandes complémentaires. On retrouve un hacheur 2 quadrants avec une tension de sortie négative. Lorsque le courant est positif, il passe par D_2 , s'il est négatif, il passe par T_2 .



$$\boxed{\bar{U} = -\alpha_3 V}$$

• **Commande complémentaire**

Les transistors sont commandés en croix. Durant l'intervalle $0; \alpha T$, les transistors T_1 et T_4 sont fermés, et durant l'intervalle $\alpha T; T$, ce sont les transistors T_2 et T_3 qui sont fermés.

• **Tension moyenne :**

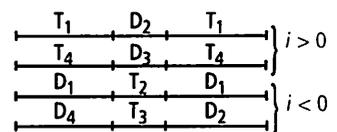
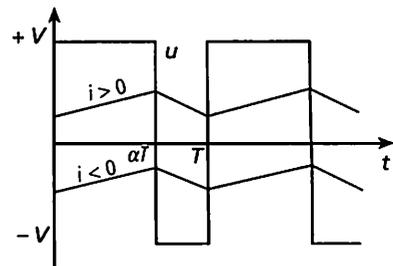
$$\boxed{\bar{U} = V(2\alpha - 1)}$$

α est le rapport cyclique appliqué au transistor T_1 .

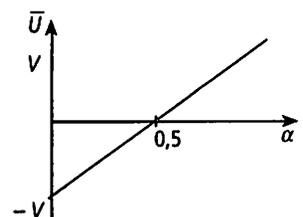
Pour $0 \leq \alpha < 0,5$ la tension moyenne est négative, on fonctionne dans les quadrants 2 ou 3.

Pour $\alpha = 0,5$, la tension moyenne est nulle.

Pour $0,5 < \alpha \leq 1$, la tension moyenne est positive, on fonctionne dans les quadrants 1 et 4.



Dans ce mode de fonctionnement, la tension instantanée u évolue entre $-V$ et $+V$, ce qui crée une ondulation de courant plus importante, mais le passage d'une tension moyenne négative à positive se fait plus naturellement.

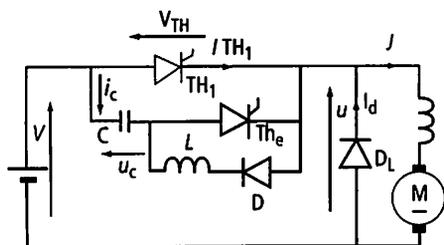


3. Hacheurs à thyristors

Pour les grosses puissances, on remplace les transistors par des thyristors qui ont la possibilité de contrôler de plus gros courants et ont une meilleure tenue en tension.

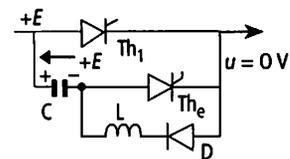
La difficulté de leur emploi provient du fait que si l'amorçage par la gâchette est facile, son blocage nécessite soit un passage du courant par zéro, soit l'application d'une tension inverse à ses bornes.

3.1. Schéma d'un circuit de blocage



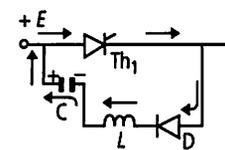
3.2. Fonctionnement

• Au départ : instant 0



Th₁ est bloqué, C est chargé à + E, D₁ conduit : le moteur débite sur la diode u = 0 V.

• Amorçage de Th₁ : on passe de 0 à T₁.



Th₁ conducteur : le courant *I* passe par Th₁ ; de plus, il y a établissement du circuit D, L, C, Th₁ qui décharge C et le charge en sens inverse (circuit LC).

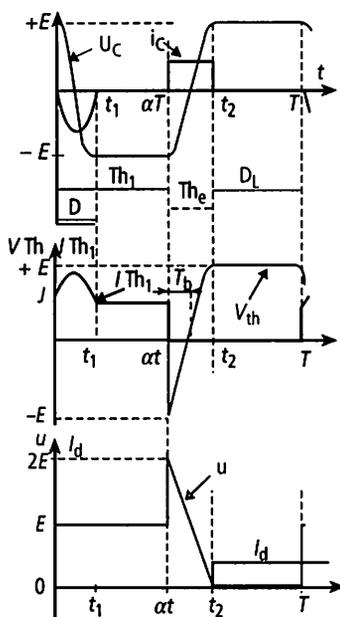
En fin de charge de C, la diode D interrompt le circuit. C est chargé un sens inverse (- E).

• Extinction de Th et charge de C :

L'amorçage de Th_e (Thyristor d'extinction) à l'instant α t provoque au point A une tension + 2E ; Th₁ se trouve à une tension inverse entre anode et cathode et se désamorç.

Le courant *i* passe par C, Th_e et le circuit moteur ; il charge linéairement le condensateur ; la tension aux bornes du condensateur atteint la valeur + E :

$$u_c = + E$$



• Conduction de D_L :

À l'instant t₂, la tension *u* s'annule et tend à devenir négative. La diode D_L devient conductrice, elle bloque Th_e et assure le passage du courant *i*.

À l'instant T, un nouveau cycle peut commencer.

3.3. Résumé du fonctionnement

Pour bloquer le thyristor principal, on utilise la décharge d'un condensateur dans un circuit oscillant comportant un redresseur.

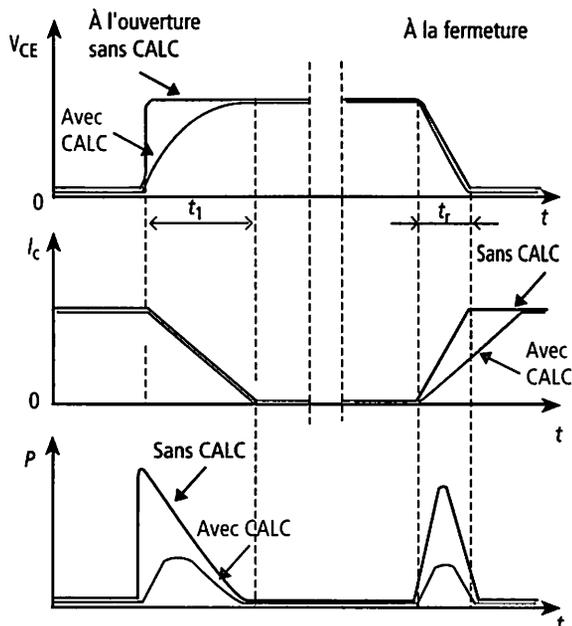
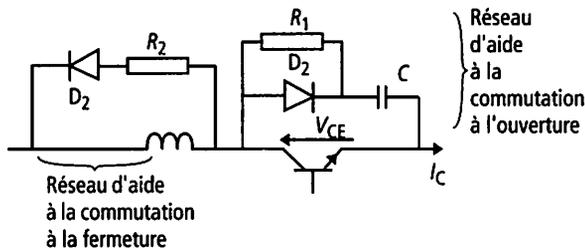
Il faut charger ce condensateur, inverser sa tension et l'appliquer à la cathode du thyristor dont on veut provoquer l'extinction.

4. Circuit d'aide à la commutation (CALC)

Ils sont utilisés sur les transistors de puissance pour réduire la puissance dissipée pendant les commutations. La fréquence de fonctionnement peut ainsi être augmentée.

Il existe deux circuits, un pour l'aide à l'ouverture et un pour l'aide à la fermeture.

Le CALC permet, pour la mise en conduction, de ralentir la montée du courant *i_c* et pour le blocage, de ralentir la croissance de VCE.



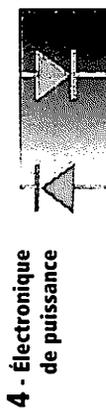
La puissance dissipée dans le transistor est inférieure avec un CALC, mais les commutations sont légèrement plus longues.

• L'inductance *L* ralentit la croissance de *i_c*, le circuit D₂ - R₂ permet d'éviter les surtensions à la coupure du courant.

• Le condensateur C se charge à l'ouverture du transistor par le circuit D₁C ; le condensateur C se décharge par R₁ lorsque le transistor est saturé.

Exemple :

Pour une fréquence de hachage de 10 kHz, V_{CEO} = 400 V et I_{cm} = 60 A, on prend : C = 20 nF - 150 V et R = 25 Ω 10 W avec une diode D1 ESM 765-600.



Un onduleur autonome est un convertisseur statique qui assure la transformation de l'énergie provenant d'une source à courant continu en une énergie à courant alternatif.

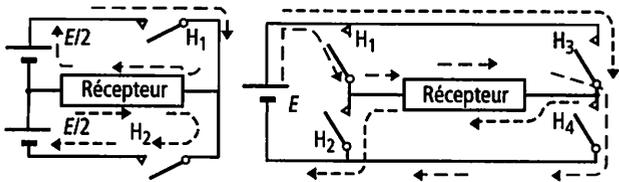
L'onduleur autonome peut être à fréquence fixe ; dans ce cas, il est utilisé comme source de secours, ou alimentation sans coupure à partir d'une batterie d'accumulateurs.

À fréquence variable, il est utilisé pour la variation de vitesse des moteurs asynchrones triphasés.

1. Principe de l'onduleur

a) Montage avec point milieu

À la fermeture de H_1 , le récepteur est alimenté dans un sens ; H_1 ouvert, H_2 se referme et le récepteur est alimenté en sens inverse. Ce montage nécessite une source continue à point milieu.



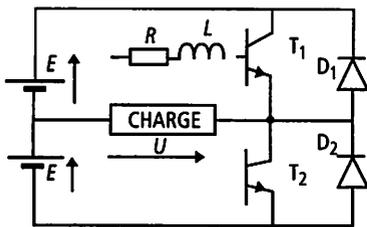
b) Montage en pont

À la fermeture de H_1 et H_4 , le courant s'établit selon les flèches en rouge, le récepteur est parcouru dans un sens. H_1 et H_4 étant ouverts, à la fermeture de H_3 et H_2 , le courant s'établit dans le récepteur, mais en sens inverse.

2. Onduleur monophasé à point milieu

2.1. Schéma de principe

Les transistors T_1, T_2 jouent le rôle d'interrupteurs. Ils fonctionnent de façon complémentaire.

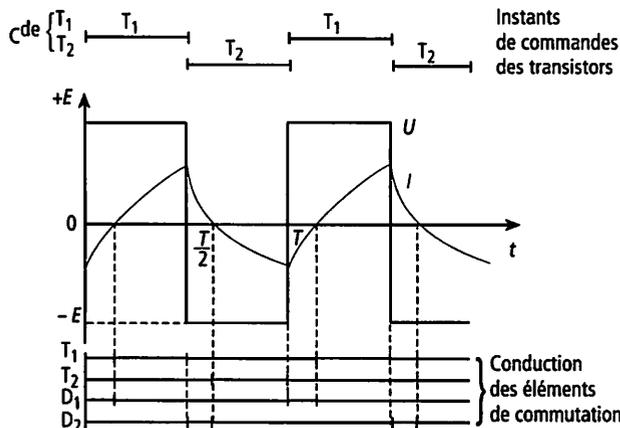


T_1, T_2 : transistors de puissance en commutation.

D_1, D_2 : diodes montées en inverse (anti-parallèle) sur T_1 et T_2 .

2.2. Fonctionnement

On considère que la charge est constituée par une inductance en série avec une résistance, ce qui a pour effet de décaler la valeur I du courant par rapport à la tension U aux bornes de la charge.



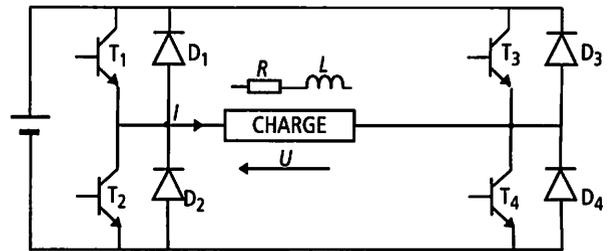
- La tension U de la charge est de forme rectangulaire.
- Le courant I est formé par des portions de courbes exponentielles (constante de temps L/R).
- La commande des transistors T_1 et T_2 est différente des temps de conduction, qui sont prolongés par l'intervention des diodes D_1, D_2 .

La tension obtenue n'est pas sinusoïdale mais le courant se rapproche un peu plus d'une sinusoïde.

3. Onduleur monophasé en pont

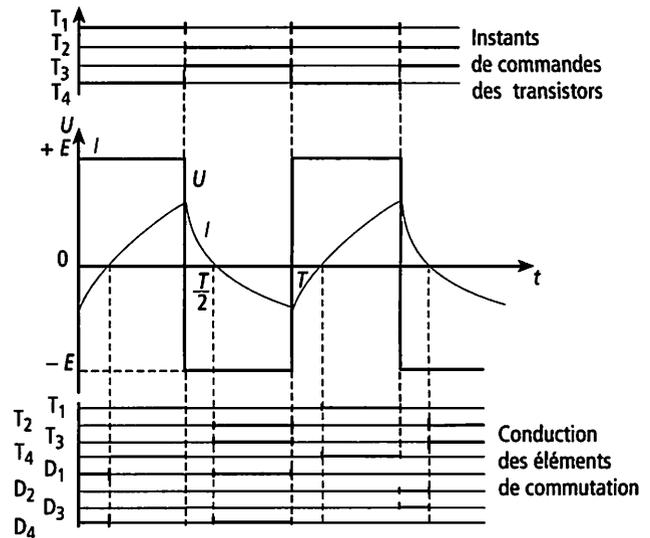
3.1. Schéma de principe

Les transistors T_1 à T_4 se comportent comme des interrupteurs unidirectionnels, les diodes sont montées en antiparallèle ; une source unique est utilisée.



3.2. Commande adjacente

- Les transistors T_1 et T_4 sont fermés pendant la première demi-période de 0 à $T/2$, alors que T_3 et T_2 sont ouverts.
- Les transistors T_2 et T_3 sont fermés pendant la deuxième demi-période alors que T_1 et T_4 sont ouverts.



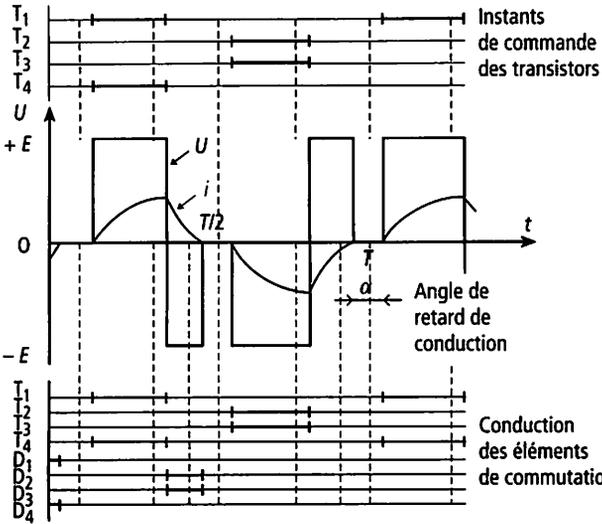
- À l'instant $T/2$, les transistors T_1 et T_4 sont ouverts, mais, du fait de l'inductance dans le circuit, le courant I retourne à la source en passant par les diodes D_2 et D_3 qui restent passants tant que I est positif.
- À l'instant T , on a le même fonctionnement en symétrique avec T_2 et T_3 .

3.3. Commande disjointe

On retarde le moment de conduction des transistors, ce qui permet :

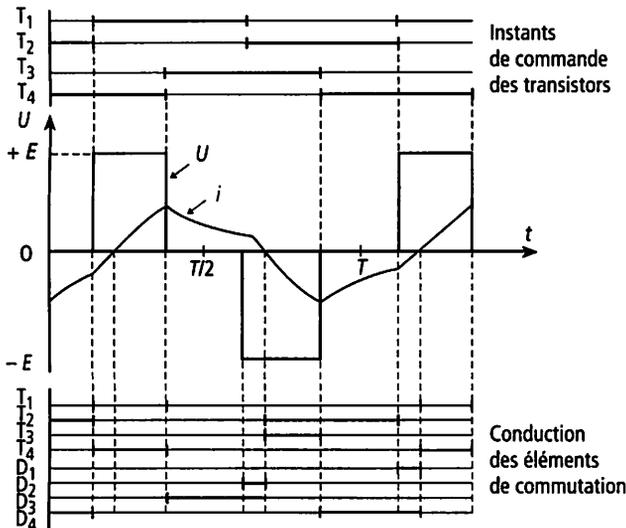
- d'éviter un court-circuit si 2 transistors d'une même branche étaient conducteurs simultanément ;
- de pouvoir faire varier la tension en sortie de l'onduleur.

La tension ondulée dépend essentiellement de la nature de la charge ; le taux d'harmonique est moins important.



3.4. Commande adjacente décalée

C'est un compromis entre les deux montages précédents, on commande T_1, T_2 en complémentaires, mais on décale T_3, T_4 qui sont eux aussi commandés en complémentaires ; dans tous les cas, il n'y a que 2 éléments semi-conducteurs qui conduisent en même temps.

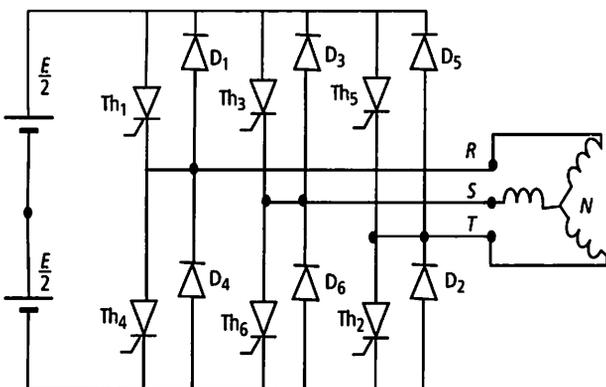


Ce type de commande est assez utilisé en monophasé. Il permet de diminuer le taux d'harmonique. On peut faire varier la tension de ce montage en faisant varier l'angle de décalage ; on obtient les meilleurs résultats, avec un décalage de $T/6$.

4. Onduleur triphasé

4.1. Schéma de principe

On peut considérer qu'un onduleur triphasé équivaut à trois onduleurs en demi-pont.



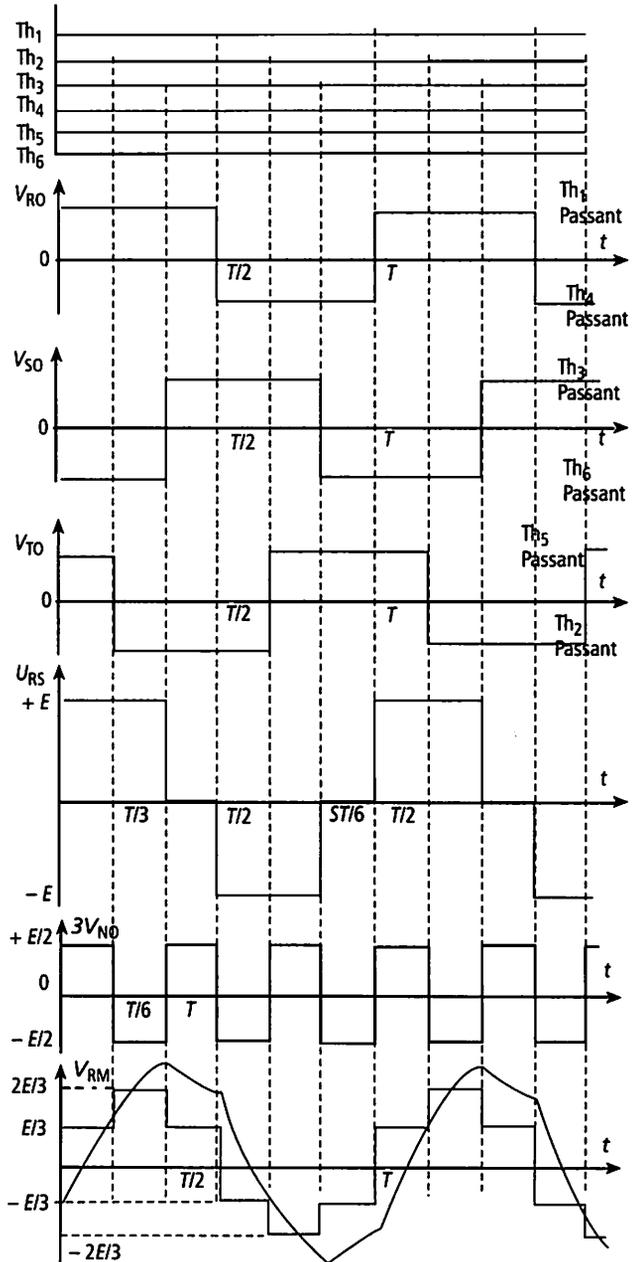
La source à point milieu est fictive ; dans la pratique, ce point n'existe pas, il est introduit ici pour faciliter l'explication.

4.2. Fonctionnement

- Chaque demi-pont est à commande adjacente.
- Chacun des 3 demi-ponts a sa commande décalée de 120° soit $T/3$.
- La charge est équilibrée (RL) entre chaque phase.

a) Tension entre R, S, T et le point milieu 0 (fictif)

La tension V_{RO} est positive quand Th_1 est passant, elle est négative quand Th_4 est passant. Elle passe de la valeur $+E/2$ à $-E/2$. Après un décalage à 120° , on a la même chose pour V_{SO} , puis pour V_{TO} après un nouveau décalage à 120° .



b) Tension entre phases (V_{RS})

La tension entre la phase R et la phase S est V_{RS} :

$$V_{RS} = V_{RO} - V_{SO}$$

En composant ces tensions graphiquement, on obtient la forme de la tension entre phases $V_{RS} = f(t)$. La valeur efficace de la tension entre phases de cet onduleur est :

$$U_{R\text{seff}} = E \sqrt{\frac{2}{3}}$$

Le raisonnement est identique pour les deux autres phases.

c) Tension entre phase et neutre

La tension entre le neutre et le point milieu s'obtient en faisant la somme : $V_{RO} + V_{SO} + V_{TO} = 3 V_{NO}$.

Graphiquement, la somme de ces trois tensions est une tension de forme rectangulaire, d'amplitude $+ E/6$ et $- E/6$ et de période $T/3$.

La tension $V_{RN} = V_{RO} - V_{NO}$. La tension V_{RN} obtenue sur le graphique est analogue à la tension délivrée par un onduleur monophasé à commande décalée.

Valeur efficace :
$$V_{RNeff} = \frac{E\sqrt{3}}{2}$$

5. Onduleur à modulation de largeur d'impulsion (MLI)

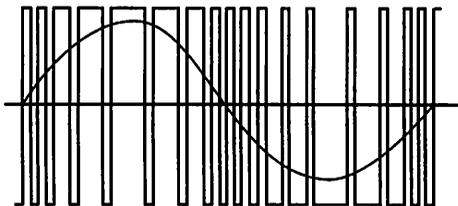
Dans les onduleurs à commande adjacente, la forme de la tension introduit des harmoniques importantes qui perturbent le fonctionnement du récepteur, surtout dans le cas du moteur asynchrone. C'est la raison pour laquelle on introduit la commande par MLI.

5.1. Schéma

Il est identique à celui du paragraphe 3.1. Seule, la commande des quatre transistors est différente.

5.2. Principe de la modulation de largeur d'impulsion

La tension continue à l'entrée est hachée de façon à créer une succession de créneaux d'amplitude égale à la tension continue et de largeur variable, suivant l'amplitude de la sinusoïde à obtenir.

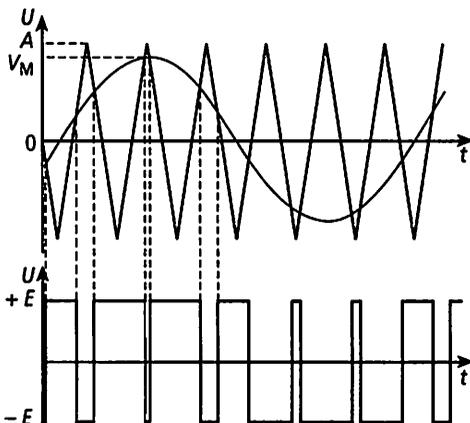


5.3. Commande analogique

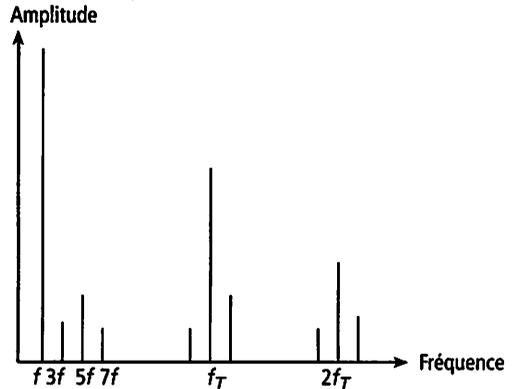
On compare la tension sinusoïdale à obtenir à une tension triangulaire symétrique, dont la fréquence est un multiple de la fréquence à obtenir.

Exemple :

Fréquence 50 Hz sinusoïdale, fréquence triangulaire 1 000 Hz.

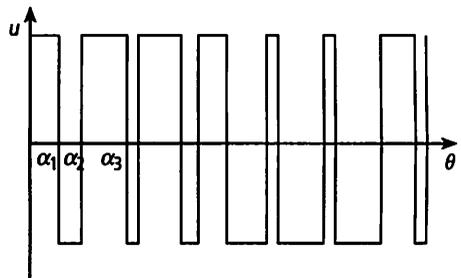


• Spectre harmonique :



La tension possède de faibles harmoniques $3f, 5f, 7f$, etc. ainsi que des paquets d'harmoniques centrés sur la fréquence du triangle f_T et ses multiples $2f_T, 3f_T$, etc. L'onde de courant est quasi sinusoïdale car les fréquences élevées sont directement filtrées par le stator.

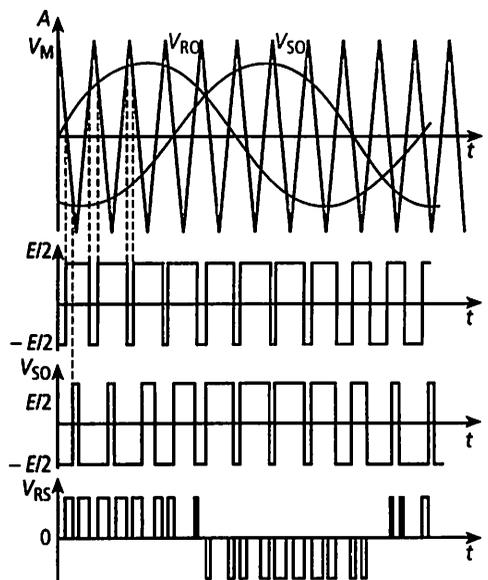
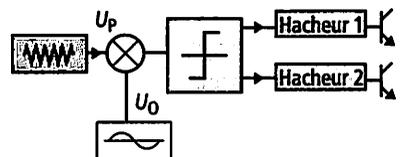
5.4. MLI calculée



Les angles $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$, etc. sont calculés par un microprocesseur de manière à éliminer les harmoniques de rang faibles $3f, 5f, 7f$, etc. Le spectre vu précédemment se trouve amélioré. Les harmoniques de rang élevé sont moins gênants car ils sont filtrés par le stator.

5.5. Commande analogique en triphasé

Le schéma du circuit de puissance est identique à celui du paragraphe 4.1. Le principe consiste à comparer trois sinusoïdes décalées de 120° à une tension triangulaire.



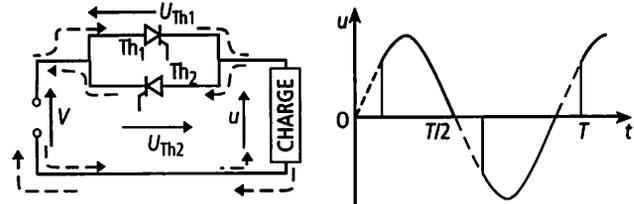
1. Gradateur monophasé à angle de phase

Le gradateur est un appareil qui permet, à partir d'une source alternative, de convertir une tension sinusoïdale de valeur efficace constante en une tension alternative de même fréquence mais de valeur efficace variable.

Les gradateurs permettent les réglages d'éclairage, du chauffage, le démarrage des moteurs à courant alternatif.

1.1. Principe

Une charge est en série avec deux thyristors montés « tête-bêche » (ou anti-parallèle). La charge est supposée résistante.



Le thyristor Th_1 est amorcé durant l'alternance positive avec un angle de retard α . Le thyristor Th_2 est amorcé durant l'alternance négative avec le même retard α par rapport à π .

La tension efficace aux bornes de la charge, par rapport à la tension du réseau en fonction de l'angle d'amorçage α compris entre 0 et π est :

$$U = V \cdot \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi}}$$

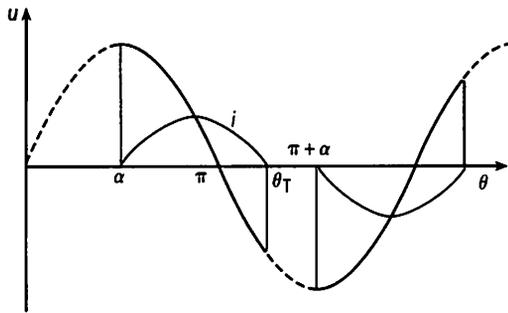
Puissance dissipée dans la résistance :

$$P = \frac{U^2}{R} = \frac{V^2}{R} \left(1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi}\right)$$

Dans ce mode de commande, ni la tension ni la puissance ne sont proportionnelles à l'angle α .

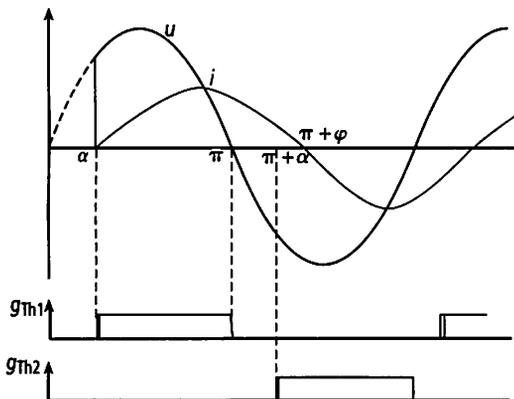
1.2. Charge résistive et inductive

• Cas où $\alpha > \varphi$ (φ : angle de déphasage de la charge)



La charge étant inductive, la restitution de l'énergie emmagasinée par la self entraîne le maintien du courant au-delà de l'angle π .

• Cas où $\alpha < \varphi$



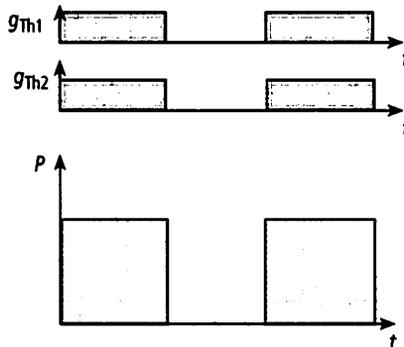
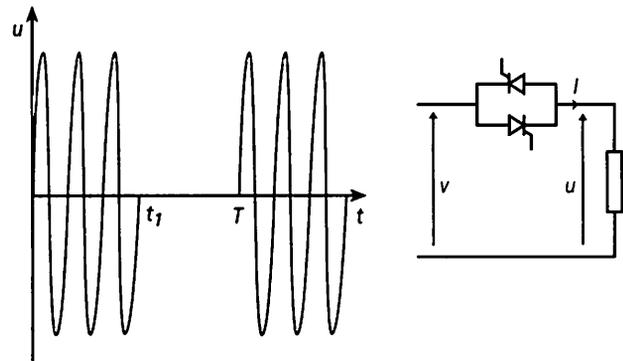
• Les commandes de gâchette des thyristors Th_1 et Th_2 sont des trains d'impulsions.

Le thyristor Th_1 est amorcé à l'instant correspondant à l'angle α . Le courant s'établit dans la maille de Th_1 et se trouve en retard sur la tension (circuit inductif). À l'instant correspondant à l'angle $\pi + \alpha$, le thyristor Th_2 reçoit ses impulsions de gâchettes, mais il n'entre pas en conduction car le courant est toujours positif. C'est à l'instant correspondant à l'angle $\pi + \alpha$ que le courant tend à s'inverser. Le thyristor Th_2 recevant toujours ses impulsions de gâchettes, il s'amorce et le courant se poursuit dans le sens négatif. La conduction est alors continue, le courant et la tension deviennent des sinusoïdes entières. On conserve le contrôle du gradateur car si α devient supérieur à φ on retrouve le fonctionnement précédent.

• Les commandes de gâchette des thyristors Th_1 et Th_2 sont des impulsions uniques.

Le thyristor Th_1 s'amorce à l'instant correspondant à l'angle α . À l'instant correspondant à l'angle $\pi + \alpha$, Th_2 reçoit une impulsion mais il ne s'amorce pas, car i est toujours positif. À l'instant correspondant à l'angle $\pi + \varphi$, le courant s'annule et Th_1 se bloque. Les 2 thyristors se retrouvent bloqué, le prochain amorçage se fera sur Th_1 à l'instant correspondant à l'angle $2\pi + \alpha$. Le courant est uniquement positif et la tension moyenne n'est pas nulle. Ce mode de fonctionnement n'est pas acceptable.

2. Gradateur monophasé à train d'ondes



Le circuit de puissance est identique au gradateur à angle de phase, c'est uniquement la commande qui diffère.

Les deux thyristors reçoivent des impulsions de gâchettes pendant un temps t_1 multiple d'une période secteur. Ils se comportent comme un interrupteur fermé. Ils sont ensuite bloqués jusqu'au temps T . La période T est généralement de quelques secondes à plusieurs minutes.

En posant $\alpha = t_1/T$, on peut définir la puissance moyenne reçue par la charge R sur une période T .

$$P = \frac{t_1}{T} P_{\max} = \alpha P_{\max} \quad \text{avec : } P_{\max} = \frac{V^2}{R}$$

Valeur efficace de la tension u : $U = V \sqrt{\alpha}$

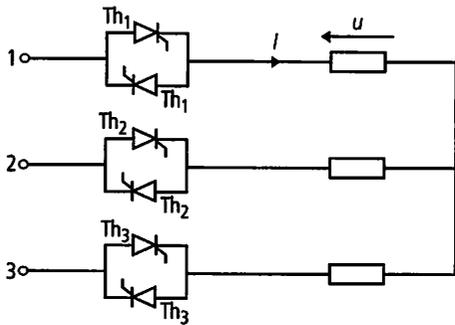
Ce type de gradateur est utilisé pour les systèmes à fortes inerties (thermique, hydraulique...).

Le facteur de puissance de la charge est conservé et il n'y a pas de génération d'harmoniques.

De plus, la puissance fournie à la charge est directement proportionnelle au rapport cyclique α .

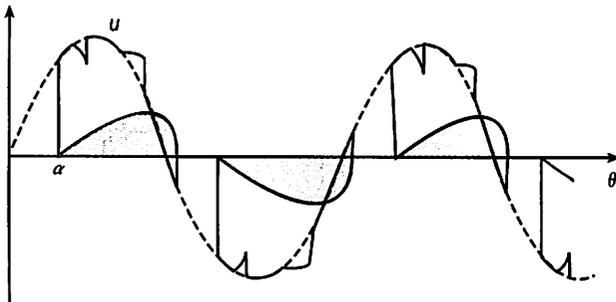
3. Gradateur triphasé

3.1. Gradateur triphasé à angle de phase



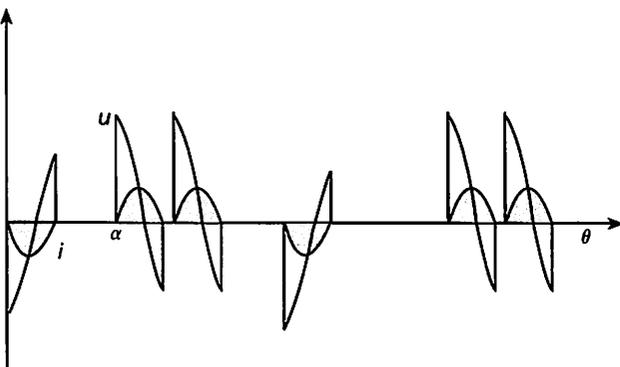
Selon la valeur de l'angle α de retard à l'amorçage de chaque thyristor, on obtient différentes formes d'ondes aux bornes de la charge.

• Forme d'onde pour α faible :



Dans ce mode de fonctionnement il y a successivement trois thyristors (Th_1, Th_2, Th_3) ou deux thyristors (Th_1, Th_2) qui conduisent. On obtient aux bornes de chaque impédance la tension V ou la tension $U/2$.

• Forme d'onde pour α important :



Dans ce mode de fonctionnement, il y a soit deux thyristors (Th_1, Th_2) qui conduisent ou aucun. La tension aux bornes de la charge est formée de portions de la tension $U/2$.

Ce type de gradateur permet une évolution progressive de la tension, sans toutefois contrôler sa valeur. Ils sont principalement utilisés pour le démarrage des moteurs asynchrones.

3.2. Gradateur triphasé à train d'ondes

Le circuit de puissance est identique au gradateur à angle de phase, seule la commande diffère. Les six thyristors sont commandés simultanément pendant un temps αT . On retrouve le même mode de fonctionnement que pour le gradateur monophasé.

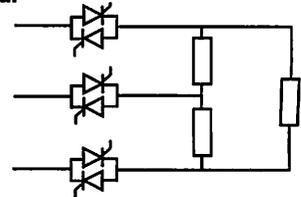
Puissance moyenne dans le récepteur :

$P = \alpha P_{max}$ avec $P_{max} = 3 \frac{V^2}{R}$

3.3. Autres montages de gradateurs

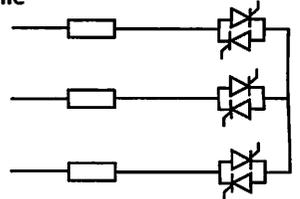
• Montage triangle du récepteur

La tension aux bornes des impédances est plus élevée que dans le montage étoile. Les harmoniques 3 et multiples de 3 n'existent plus dans le courant ligne.



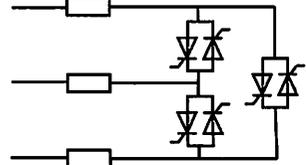
• Gradateur aval monté en étoile

Ce montage nécessite que les 6 bornes de la charge soient sorties. La commande des thyristors est facilitée par la présence de points communs.



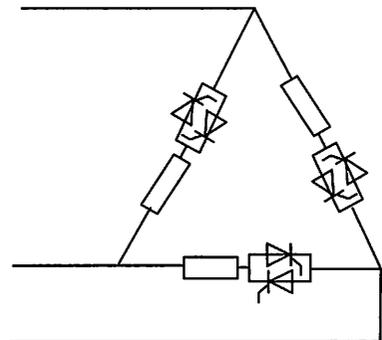
• Gradateur aval monté en triangle

La charge doit avoir ses 6 bornes de sorties. Le courant dans les thyristors est plus faible que dans le montage précédent. La commande est simplifiée.



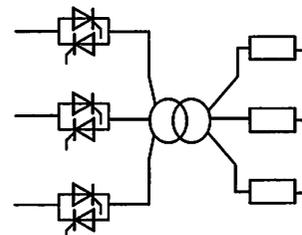
• Groupement triangle de trois gradateurs monophasés

On obtient les formes d'ondes d'un gradateur monophasé (présence d'un courant dans la charge avec un seul thyristor conducteur). Les harmoniques 3 et multiples de 3 n'apparaissent pas dans le courant en ligne.

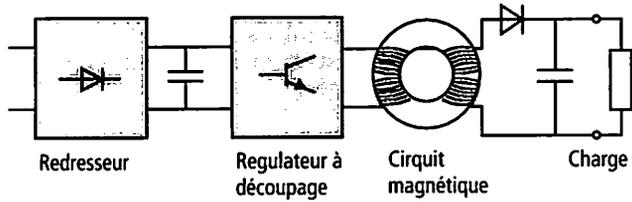


• Gradateur au primaire d'un transformateur

Ce montage est utilisé lorsque la charge demande un fort courant sous une basse tension. Le transformateur abaisseur permet de réduire le calibre du gradateur.

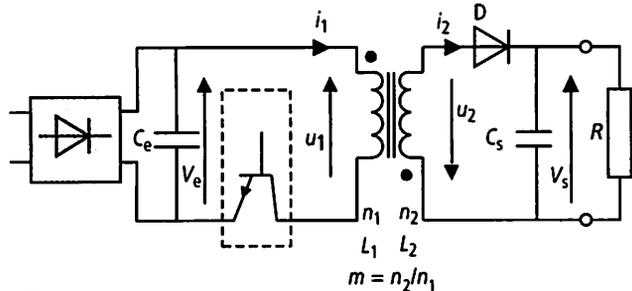


1. Principe de fonctionnement



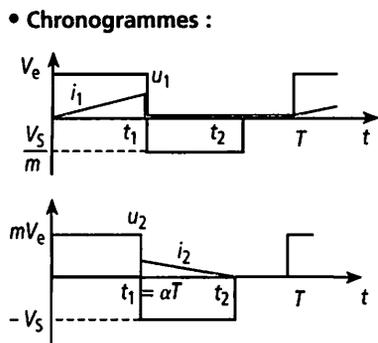
L'énergie nécessaire à la charge est transmise par l'intermédiaire d'un tore magnétique. Le régulateur à découpage permet d'ajuster la quantité d'énergie transférée pour que la tension aux bornes de la charge reste constante. La fréquence étant élevée (plusieurs dizaines de kHz), la taille du circuit magnétique est réduite, ce qui fait que ces alimentations sont de faible poids et faible encombrement. Il existe deux grands principes de fonctionnement des alimentations à découpage. Les alimentations à accumulation d'énergie (Fly-back) ou à transfert direct (Forward).

2. Alimentation de type Fly-back



• Fonctionnement
 - Phase d'accumulation : lorsque le transistor du régulateur à découpage est fermé, la tension u_1 est égale à V_e et le courant i_1 croît linéairement. Les points donnant le sens des tensions implique que u_2 se trouve fléchée vers le bas. La diode D empêche la circulation d'un courant dans le secondaire. Durant cette phase, le circuit magnétique accumule de l'énergie et c'est le condensateur C_3 qui fournit le courant à la charge.

- Phase de restitution : durant cette phase, le transistor est bloqué, le courant i_1 est égal à zéro. Le circuit magnétique ayant de l'énergie stockée, il apparaît des fém d'auto-induction aux bornes des enroulements 1 et 2. La diode D laisse passer le courant i_2 qui recharge le condensateur et alimente la charge. Cette phase se poursuit jusqu'à ce que l'énergie soit entièrement restituée. Par la suite, les tensions u_1 et u_2 disparaissent et la phase d'accumulation peut recommencer.

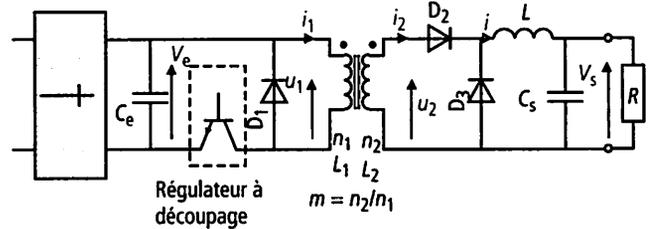


La tension de sortie V_s dépend de l'énergie stockée dans le circuit magnétique. Cette énergie est contrôlée par le temps $t_1 = \alpha T$.

Tension de sortie :

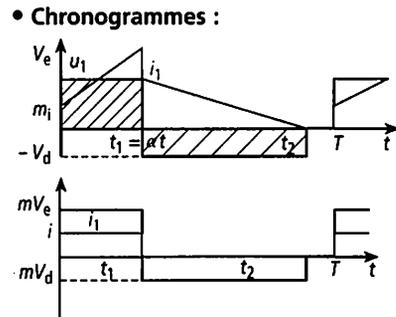
$$V_s = \alpha V_e \sqrt{\frac{TR}{2L_1}}$$

3. Alimentation de type Forward



• Fonctionnement
 - Phase de transfert : lorsque le transistor du régulateur à découpage est fermé, la tension u_1 est égale à V_e et il circule un courant i_1 dans l'enroulement 1. Les points précisent que la tension u_2 est positive. Le courant i_2 est égal au courant i maintenu constant par l'inductance L . Ce courant recharge le condensateur C_s et alimente la charge. Il y a un transfert direct d'énergie du primaire vers le secondaire comme dans un transformateur. Durant cette phase, le circuit magnétique emmagasine également de l'énergie.

- Phase de restitution : le transistor est ouvert, il se crée des fém d'auto-inductions aux bornes des enroulements 1 et 2. La diode D_2 se trouve bloquée, le couple courant i_2 est nul. C'est dans la maille primaire L_1 , D_1 que s'effectue la restitution d'énergie. La self L maintient le courant i dans la charge par l'intermédiaire de la diode de roue libre D_3 .



Tension de sortie :

$$V_s = \frac{n_2}{n_1} \alpha V_e$$

• Amélioration de la démagnétisation :
 - Démagnétisation par diode Zéner la tension V_z vient s'ajouter à la tension V_d , à surface identique, le temps t_2 est donc plus court.
 - Démagnétisation par pont asymétrique : les deux transistors sont commandés simultanément. Pendant la phase de restitution. L'énergie emmagasinée dans le circuit magnétique est restituée au condensateur d'entrée C_e .
 - Démagnétisation par enroulement auxiliaire : un enroulement de n_3 spires restitue l'énergie et permet d'obtenir une tension u_1 plus négative.



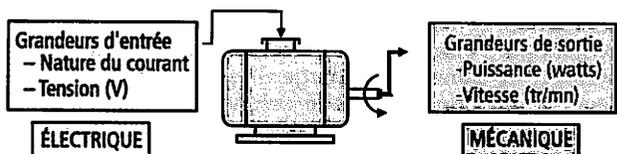
Dans le domaine de l'électronique de puissance, la variation de vitesse des moteurs électriques occupe une position privilégiée.

La variation de vitesse permet non seulement de faire varier la vitesse d'un moteur au cours de son fonctionnement mais aussi de le faire démarrer ou freiner plus ou moins rapidement, ou encore de restituer de l'énergie au réseau.

Les variateurs de vitesse empruntent l'énergie le plus souvent au réseau alternatif, parfois à une source à courant continu ; ils alimentent soit des moteurs à courant continu, soit des moteurs à courant alternatif.

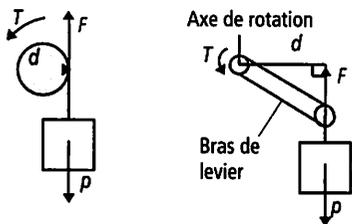
1. Puissance et couple

Un moteur électrique est une machine qui transforme l'énergie électrique en énergie mécanique ; il est caractérisé par des grandeurs d'entrée (électriques) et des grandeurs de sortie (mécaniques).



a) Notion de couple

Le couple moteur est le produit de la force appliquée sur l'arbre moteur multiplié par la distance qui sépare cette force à l'axe de rotation. La distance est prise perpendiculairement à l'axe de la force.



$$T = Fd$$

T : moment du couple en newtons-mètres
 F : force en newtons (N)
 d : distance en mètres (m)

b) Travail d'un couple

Au cours d'une rotation d'un angle θ , le couple produit un travail que l'on désigne par W .

$$W = T\theta$$

W : travail exprimé en joules (J)
 T : moment du couple
 θ : angle de rotation, en radians (rad).

Exemple : Un moteur a un couple de 6 Nm. après une rotation d'un tour (soit 2π radians), il a effectué un travail de :

$$W = 6 \times 2\pi = 37,68 \text{ joules}$$

c) Puissance développée par un couple

La puissance représente le travail effectué pendant une unité de temps. Elle s'exprime par la relation :

$$P = \frac{W}{t}$$

P : puissance en watts (W)
 W : travail
 t : temps en secondes (s).

En remplaçant W par la valeur $W = T\theta$, on obtient :

$$P = \frac{T\theta}{t} = T \frac{\theta}{t} \text{ ou encore } P = T\Omega$$

Le quotient de θ/t désigne la vitesse angulaire qui s'exprime en radians par seconde ; on peut l'exprimer, par rapport à la vitesse de rotation, en tours par minute.

$$\Omega = \frac{2\pi N}{60}$$

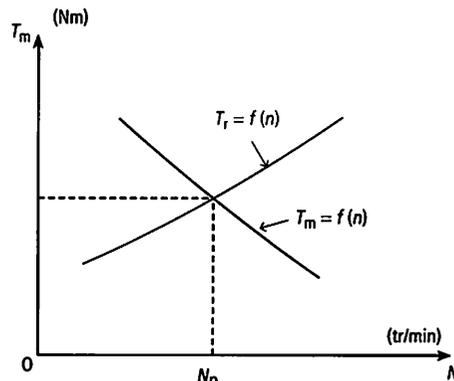
Ω : vitesse angulaire (rad/s)
 N : vitesse de rotation (tr/min).

Exemple : Si le moteur précédent tourne à 1 500 tr/min :

$$\Omega = \frac{2\pi \times 1\,500}{60} = 157 \text{ rad/s et } P = 6 \times 157 = 942 \text{ W}$$

2. Couple moteur - Couple résistant

Le couple d'une machine varie généralement avec la vitesse ; c'est une caractéristique mécanique importante. Elle s'exprime par une courbe qui est de même expression pour le moteur et la machine entraînée.



À l'intersection des caractéristiques T_m , T_r , les couples sont égaux :

$$T_m = T_r$$

Il y a équilibre.

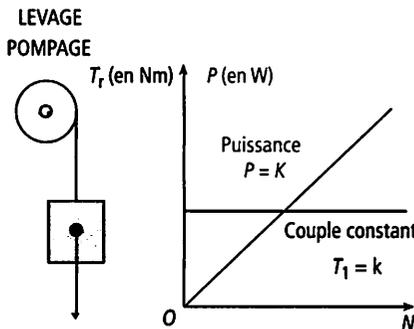
Un moteur est caractérisé par un couple moteur T_m , une machine entraînée présente un couple résistant T_r .

2.1. Différentes allures de couples résistants

La caractéristique mécanique du couple en fonction de la vitesse constitue la photographie d'identité de la machine à entraîner. Elle est relevée expérimentalement quand cela est possible, dans le cas contraire, elle est assimilée à l'une des allures ci-après :

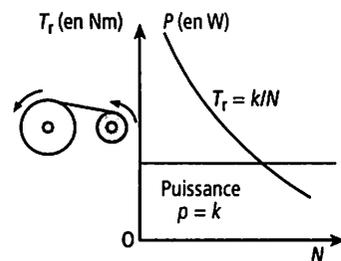
a) Couple constant

Le couple est indépendant de la vitesse, mais la puissance est proportionnelle à la vitesse (90 % des cas).



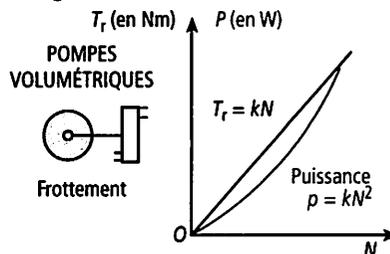
b) Puissance constante

Le couple est inversement proportionnel à la vitesse ; c'est le cas des machines à enroulement et à déroulement de tôles, par exemple, essoreuse.



c) Couple proportionnel à la vitesse

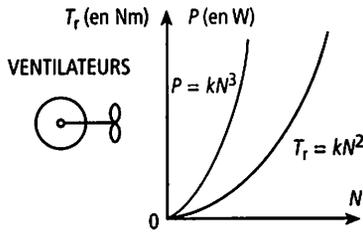
C'est le cas, par exemple, des machines lentes travaillant par frottement telles que les pompes volumétriques à vis d'Archimède, les mélangeurs, etc.



d) Couple proportionnel au carré de la vitesse

C'est le cas de toutes les machines soufflantes, ventilateurs, etc.

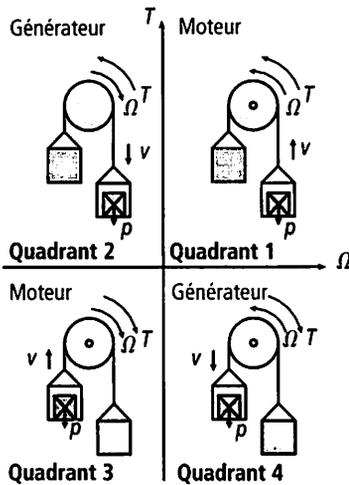
Remarque : dans les deux derniers cas, le couple de démarrage est faible et ne présente aucun problème.



3. Fonctionnement en 4 quadrants

Selon le sens du couple et de la vitesse, on peut définir, dans un plan couple-vitesse, quatre zones de fonctionnement caractéristiques.

Sens rotation	La machine fonctionne en :	Couple T	Vitesse N	Produit T x N	Quadrant
Montée	moteur	+	+	+	1
	générateur	+	-	-	2
Descente	moteur	-	-	+	3
	générateur	-	+	-	4



Le quadrant 1 correspond à un fonctionnement moteur en marche avant, le quadrant 3 à un fonctionnement moteur en marche arrière. Le quadrant 2 correspond à un fonctionnement en récupération ou générateur en marche arrière. Le quadrant 4 est le fonctionnement en générateur en marche avant.

4. Couple de démarrage

Le couple de démarrage doit, d'une part, décoller la masse de moment d'inertie J et, d'autre part, vaincre le couple résistant relatif à la machine à entraîner, d'où :

$$T_d = T_a + T_r$$

T_d : couple de démarrage
 T_a : couple d'accélération
 T_r : couple résistant

Le couple d'accélération T_a n'existe que pendant la mise en vitesse de la masse d'inertie J, alors que le couple résistant T_r se maintient durant tout le temps de fonctionnement du moteur
 Remarque : Pour les moteurs à courant continu, on peut fixer la valeur du couple de démarrage entre 1,3 et 2 fois le couple nominal du moteur.

4.1. Notion de moment d'inertie

Il permet de caractériser le couple nécessaire pour mettre en rotation une masse m. On le désigne par la lettre J et s'exprime en kilogramme m² (kg · m²).

4.2. Mouvement de rotation

Le moment d'inertie d'une masse m en rotation est donné par la relation :

$$J = mr^2$$

J : moment d'inertie en kg · m²
 m : masse en kg
 r : rayon de giration en m

Le rayon de giration dépend de la localisation de la masse en rotation par rapport au centre.

a) Cas d'un cylindre

Le rayon de giration d'un cylindre plein est donné par la relation :

$$r^2 = \frac{R^2}{2}$$

ou encore $r = 0,707 R$

r : rayon de giration
R : rayon de cylindre

b) Cas d'un cylindre creux

$$r^2 = \frac{R_1^2 + R_2^2}{2}$$

R₁ : rayon intérieur
R₂ : rayon extérieur

c) Cas d'un moteur réducteur

si un moteur entraîne une machine par l'intermédiaire d'un réducteur, son moment d'inertie est ramené au moteur par la relation :

$$J_{\text{moteur}} = J_{\text{mach.}} \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2$$

N_1 : vitesse de la machine entraînée
 N_2 : vitesse du moteur

4.3. Mouvement de translation

Si une masse m (en kg) est déplacée à la vitesse linéaire V (m/s) pour une vitesse de rotation du moteur ω (en rad/s), le moment d'inertie ramené à l'axe du moteur d'entraînement est :

$$J_{\text{machine}} = m \frac{V^2}{\Omega^2}$$

$$\Omega = \frac{2\pi N}{60}$$

$$J = m \frac{V^2 \times 3\,600}{4\pi^2 N^2}$$

4.4. Détermination du couple d'accélération

Selon le couple d'accélération T_a , le temps mis à entraîner la machine sera plus ou moins important.

$$T_a = J \frac{d\omega}{dt}$$

T_a : couple d'accélération (Nm)
 J : moment d'inertie des masses à mettre en mouvement (kg/m²)
 $d\omega$: variation de vitesse angulaire (rad/s)
 dt : durée du démarrage (s)

Exemple : Calcul du temps de démarrage d'un moteur entraînant un volant d'inertie :

$P_n = 5 \text{ kW}$; $N = 1\,500 \text{ tr/min}$; $T_d = 1,8 T_n$; $T_r = 0,3 T_n$;
 $J_{\text{machine}} + \text{moteur} = 5 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$

• Calcul du couple nominal :

$$P_n = T_n \omega \text{ d'où } T_n = \frac{P}{\omega} = \frac{5\,000 \times 60}{2\pi \times 1\,500} = 31,8 \text{ Nm ou } 32 \text{ Nm}$$

• Calcul du couple d'accélération :

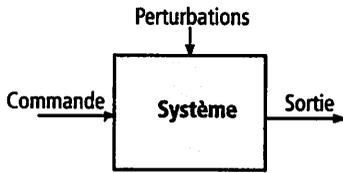
$$T_a = T_d - T_r \text{ avec } T_n = 32 \text{ N.m ; } T_r = 0,3 T_n = 9,6 ;$$

$$T_d = 1,8 T_n = 57,6 \text{ N.m ; } T_a = 57,6 - 9,6 = 48 \text{ Nm}$$

• Temps de démarrage :

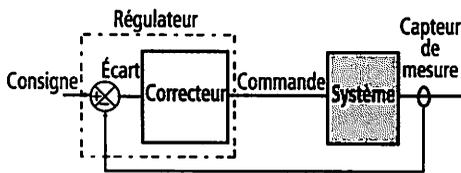
$$dt = J \frac{d\omega}{T_a} = 5 \times \frac{2\pi \times 1\,500}{60 \times 48} = 16,3 \text{ s.}$$

1. Système en boucle ouverte



Dans un système en boucle ouverte, la sortie n'est pas contrôlée. Elle peut évoluer avec les perturbations et ne pas suivre exactement les variations de la commande. On peut donner comme exemple le fonctionnement d'une voiture qui ralentit dans les côtes. C'est au conducteur d'adapter sans cesse la commande (pédale d'accélérateur) s'il veut garder une vitesse constante.

2. Système en boucle fermée

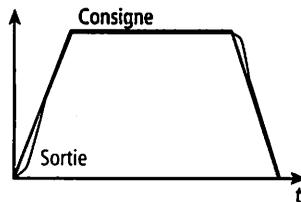


Dans ce cas, la commande est remplacée par une consigne. Celle-ci est comparée au signal de sortie issue d'un capteur. Le correcteur est chargé à tout moment de minimiser l'écart en agissant sur la commande.

2.1. Asservissement et régulation

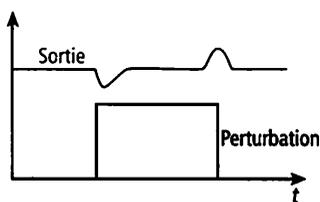
• Asservissement

On parle d'asservissement lorsque la consigne définit un profil que la sortie doit suivre. Dans ce cas, les perturbations sont considérées comme constantes. On rencontre des asservissements de vitesse, de position, etc.



• Régulation

On parle de régulation lorsque la consigne est constante et que la sortie doit le rester malgré la présence de perturbations. On rencontre des régulations de température, de pression, etc.



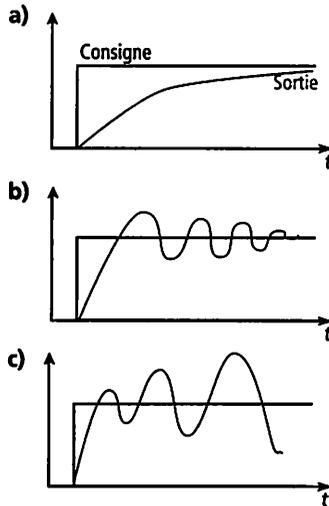
Il est fréquent de rencontrer des systèmes asservis possédant des perturbations. La sortie sera la superposition des fonctionnements en asservissement et en régulation.

3. Qualités d'un asservissement

Pour caractériser les qualités d'un asservissement, on retient généralement trois critères qui sont la stabilité, la précision et le temps de réponse.

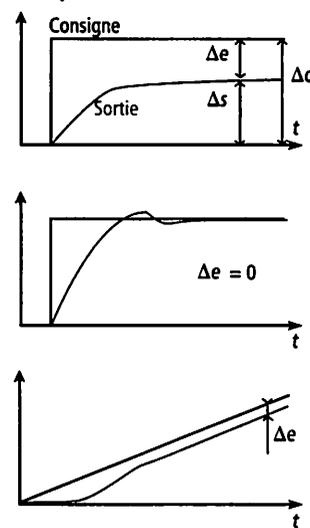
Régler un asservissement est souvent un compromis entre la stabilité et la précision. Améliorer un critère se fait souvent aux dépens des autres. Il faut définir un cahier des charges et déterminer les critères les plus importants. Sur une machine d'usinage, la précision est très importante. Il est impensable que la sortie ne suive pas la consigne, par contre, le temps de réponse sera un critère secondaire.

• La stabilité



Un système est stable si lors d'une variation de consigne, il n'entre pas en oscillations. Sur la figure a), le système est très stable, mais il est lent. Sur la figure b), le système est en limite de stabilité. La sortie oscille avant de se stabiliser autour d'une valeur finale. Sur la figure c), le système est instable. La sortie diverge et les oscillations sont de plus en plus importantes. Certaines éléments du système finissent par saturer, et la sortie évolue entre une valeur minimale et une valeur maximale. C'est le phénomène de pompage.

• La précision



Un système est précis si l'écart entre la consigne et la sortie est faible.

On distingue deux types d'erreurs :

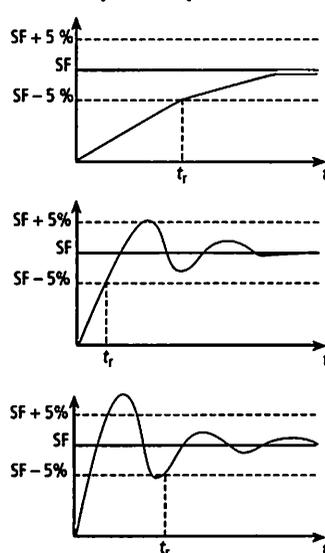
- l'erreur de position : c'est l'écart qui subsiste après un échelon de consigne lorsque le temps tend vers l'infini ;

- l'erreur de traînage : c'est l'écart qui subsiste lorsque la consigne évolue selon une rampe. On note souvent l'erreur en %.

$$\epsilon\% = \frac{\Delta e}{\Delta c}$$

Il est possible d'obtenir une erreur nulle sur un système.

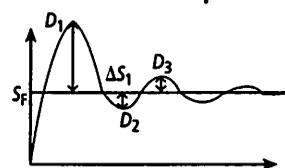
• Le temps de réponse



Le temps de réponse t_r est défini comme le temps mis par la sortie pour rentrer dans une bande de plus ou moins 5 % de la valeur finale sans en ressortir. On remarque que le temps de réponse est directement lié à la stabilité et que le temps le plus court est obtenu lorsque le premier dépassement de la sortie est égale à 5 %.

Dans certaines applications, le temps de réponse peut être défini pour une valeur différente de 5 %.

• Définition du dépassement

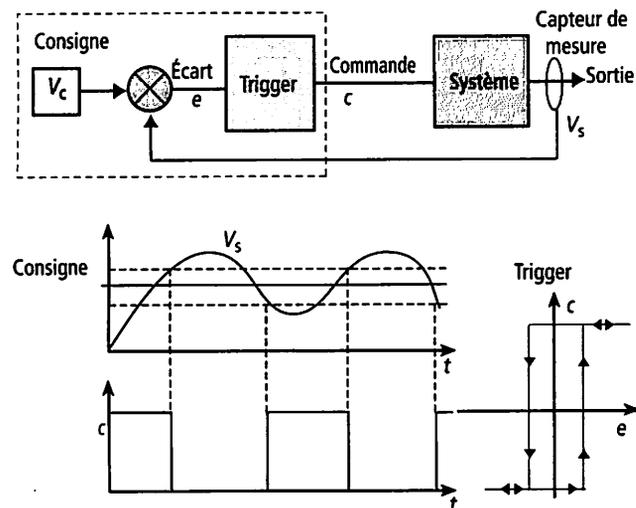


Les dépassements sont les différences entre les optimaux de la sortie et sa valeur finale. Ils sont définis en %.

$$D1\% = \frac{\Delta S_1}{\Delta S_f}$$

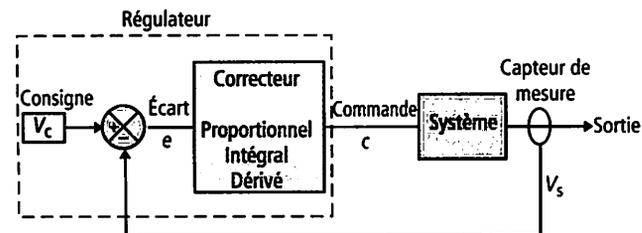
4. Structure d'un régulateur

4.1. Régulateur Tout ou Rien



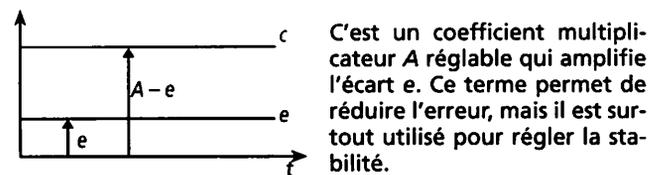
Un régulateur tout ou rien est construit autour d'un trigger. La tension V_s issue du capteur de sortie est soustraite à la tension de consigne V_c . Selon la valeur de l'écart e , la commande c est à 0 ou à 1. La sortie oscille en permanence autour de la consigne. Les régulateurs tout ou rien ne possèdent pas de réglage et ne peuvent fonctionner que sur des systèmes lents. Ils sont très utilisés dans les régulations de température (enceinte thermique équipée d'un thermostat).

4.2. Régulateur à action Proportionnelle, Intégrale et Dérivée (PID)



Le correcteur dispose ici de trois termes réglables.

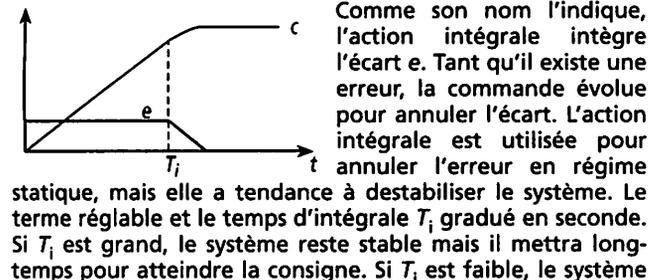
• L'action proportionnelle



Si l'amplification est trop forte, le système risque d'être instable. Si l'amplification est trop faible le système est lent. Les constructeurs parlent de gain G ou de bande proportionnelle BP. Le gain correspond à l'amplification A . La bande proportionnelle correspond à l'inverse du gain. Elle se note généralement en %.

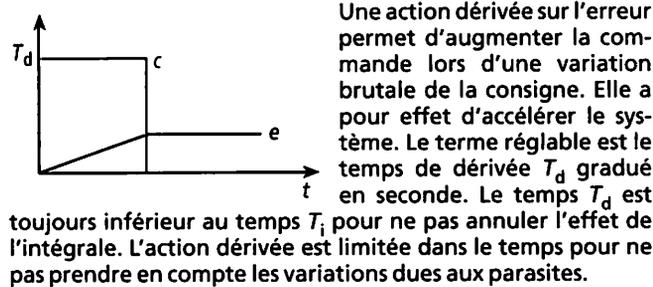
$$BP\% = \frac{1}{A} \cdot 100$$

• L'action intégrale



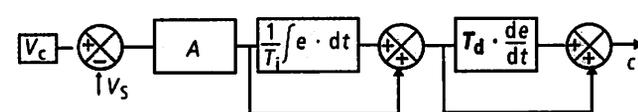
sera plus rapide mais risque d'osciller avant d'atteindre la consigne.

• L'action dérivée



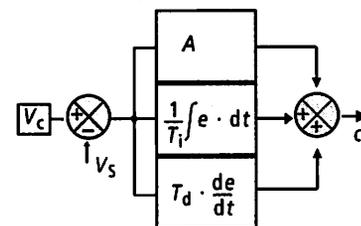
4.3. Structure d'un régulateur PID

• Structure série



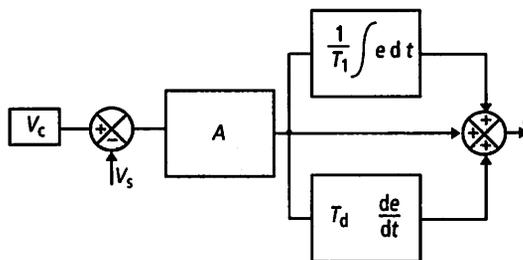
Cette structure est très peu utilisée pratiquement, mais on la rencontre souvent dans les études théoriques car elle permet une certaine facilité de compréhension.

• Structure parallèle



C'est une structure simple que l'on rencontre assez fréquemment, surtout dans les régulateurs numériques.

• Structure mixte



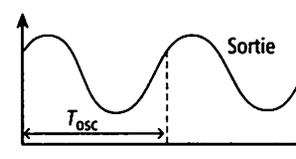
C'est la structure la plus répandue. Elle offre un réglage facile et indépendant de ses paramètres.

Ces trois structures permettent d'obtenir le même résultat, mais pour que les correcteurs soient équivalents, il faut que les termes A , T_i et T_d soient réglés différemment.

4.4. Réglage industriel par la méthode de Ziegler-Nichols

Cette méthode permet d'obtenir les paramètres de réglage d'un correcteur mixte à partir d'un essai pratique.

Les termes T_i et T_d sont annulés et la consigne est placée à une valeur intermédiaire. On augmente le gain en partant de 0 jusqu'à obtenir des oscillations autoentretenues sur la sortie. On relève alors la valeur du gain A_{osc} et la période des oscillations T_{osc} . Le tableau 3 donne la valeur des termes A , T_i et T_d selon un correcteur P, PI ou PID.



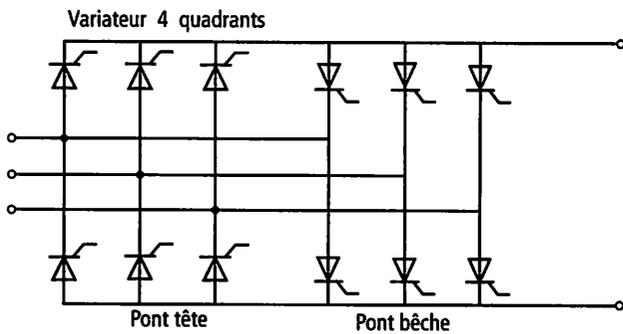
	P	PI	PID
A	$0,5 \cdot A_{osc}$	$0,45 \cdot A_{osc}$	$0,6 \cdot A_{osc}$
T_i		$0,85 \cdot T_{osc}$	$0,5 \cdot T_{osc}$
T_d			$0,125 \cdot T_{osc}$

La méthode de Ziegler-Nichols est un réglage dur car elle entraîne un premier dépassement d'environ 40 %.

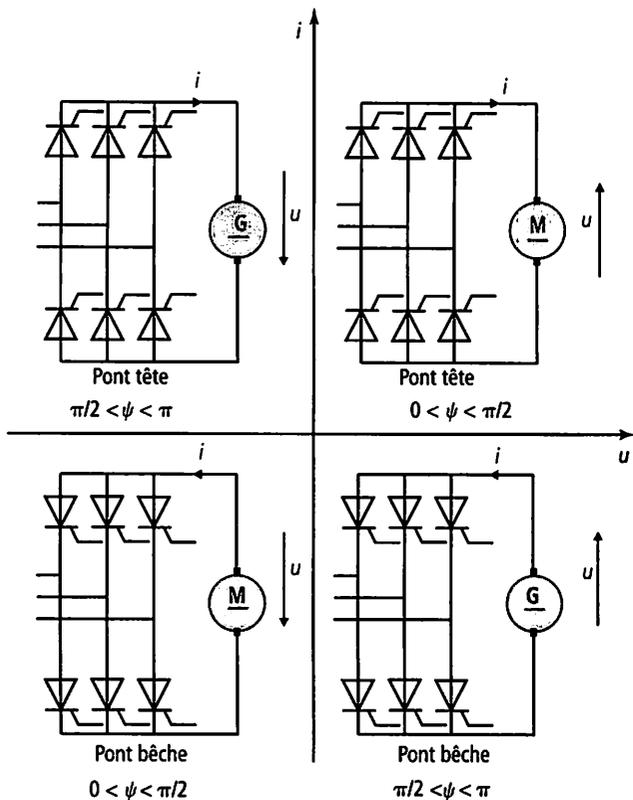
1. Structure d'un variateur

1.1. Partie puissance

Elle est constituée d'un pont mixte monophasé ou triphasé pour les variateurs 1 quadrant ou de 2 ponts tête-bêche tout thyristors monophasé ou triphasé pour les variateurs 4 quadrants.



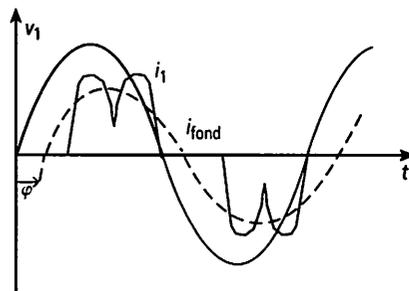
• Fonctionnement dans les quatre quadrants :



Le passage d'un pont à l'autre se fait à partir de la mesure du courant d'induit.

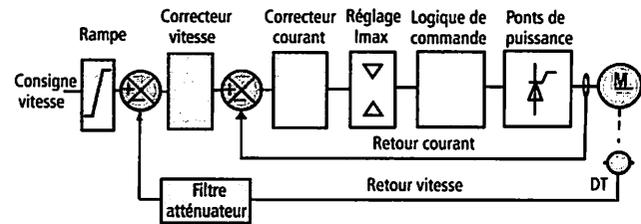
• Forme d'onde du courant absorbé au réseau :

Le courant consommé possède des harmoniques 5, 7, 11, etc. qu'il faut éventuellement filtrer. Le déphasage φ entre le fondamental de i_1 et v_1 est égal à l'angle ψ d'amorçage des thyristors.



Le fonctionnement à faible vitesse est donc synonyme de mauvais facteur de puissance.

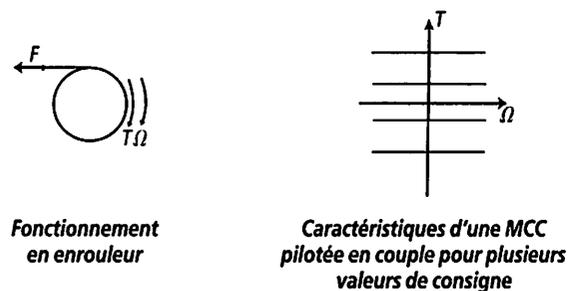
1.2. Partie commande



La partie commande comporte 2 boucles, une de vitesse et une de courant. La consigne vitesse donne une référence après avoir traversé la fonction rampe programmable. Le correcteur vitesse donne une autre référence à la boucle du courant qui possède un réglage de I_{max} . La boucle courant est prioritaire sur la boucle de vitesse. Le capteur de courant est intégré à l'intérieur du variateur.

• Pilotage en couple

Il est possible de faire un pilotage en couple de la machine. Pour ce faire, la consigne extérieure est directement reliée à la consigne courant, la boucle de vitesse étant alors mise hors service. Ce mode de fonctionnement permet d'obtenir une traction constante quelle que soit la vitesse. Il est très employé dans les systèmes d'enrouleurs/dérouleurs.

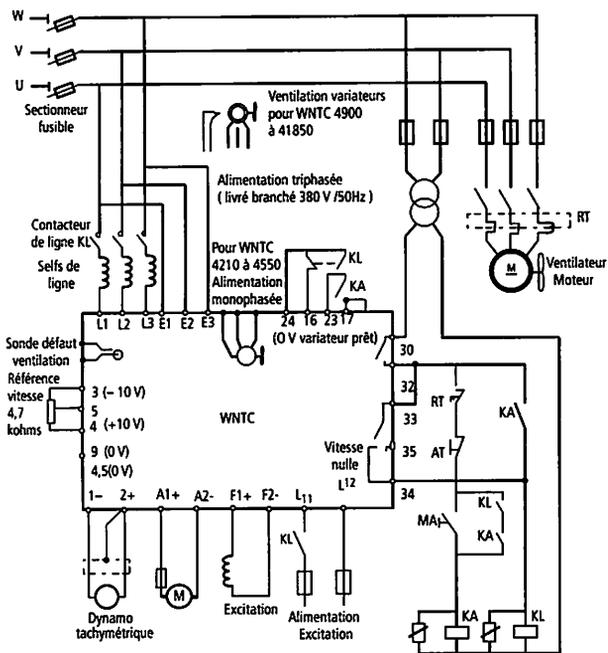


2. Raccordement d'un variateur

Différentes parties à câbler :

- Alimentation des ponts de puissance. Elle se fait par l'intermédiaire d'un contacteur et d'un élément de protection (sectionneur, fusible ou disjoncteur).
- Alimentation de l'induit du moteur. Il peut être nécessaire de placer une self de lissage.
- Alimentation du pont de diodes pour l'inducteur. Elle se fait généralement en monophasé et possède une protection par fusible ou disjoncteur.
- Alimentation de l'inducteur. Vérifier que la tension inducteur correspond à celle que fournira le variateur. Tension de 190 V continue pour une alimentation du pont de diodes en 220 V monophasé. Dans le cas contraire, il faut placer un transformateur en amont du pont de diodes.
- Alimentation de la commande. Celle-ci reste alimentée en permanence dès la fermeture du sectionneur ou du disjoncteur. Il faut absolument respecter l'ordre des phases car il est utilisé pour synchroniser les impulsions de gâchettes des thyristors.
- Raccordement d'une consigne. Celle-ci peut être unidirectionnelle (0/10 V), bidirectionnelle - 10/+10 V, en courant (4 - 20 mA) ou par l'intermédiaire d'un réseau. Cette consigne est fournie soit par un potentiomètre, une sortie analogique d'automate ou une carte réseau d'automate.
- Raccordement des entrées logiques. Elles sont pilotées par des contacts secs qui permettent :
 - la validation de la commande (marche/arrêt) ;
 - le choix du sens de rotation (avant/arrière) ;
 - les marches impulsives ;
 - le blocage de l'arbre (couple à l'arrêt), etc.

• Raccordement de la dynamo tachymétrique



3. Paramétrage par programmation

Le variateur peut être configuré à la demande en fixant les circuits par des bits 0 ou 1 d'aiguillage et en affectant des valeurs numériques aux différentes fonctions à réaliser par le variateur.

Le diagramme fonctionnel d'aide à la programmation ci-dessous permet de paramétrer :

- la boucle de vitesse avec ses références, la précision (ampli de vitesse ou non) et les contrôles ;
- la boucle de courant, avec les commandes de gâchette, avec le circuit de contrôle des défauts ;
- les entrées-sorties, analogiques ou logiques.

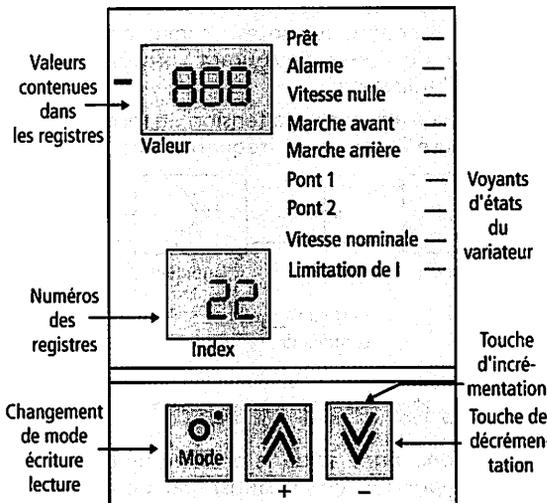
4. Programmation

La programmation du variateur de vitesse permet d'adapter le variateur à des applications particulières.

Les valeurs des différents paramètres sont contenues dans des registres qui peuvent être lus ou modifiés par écriture.

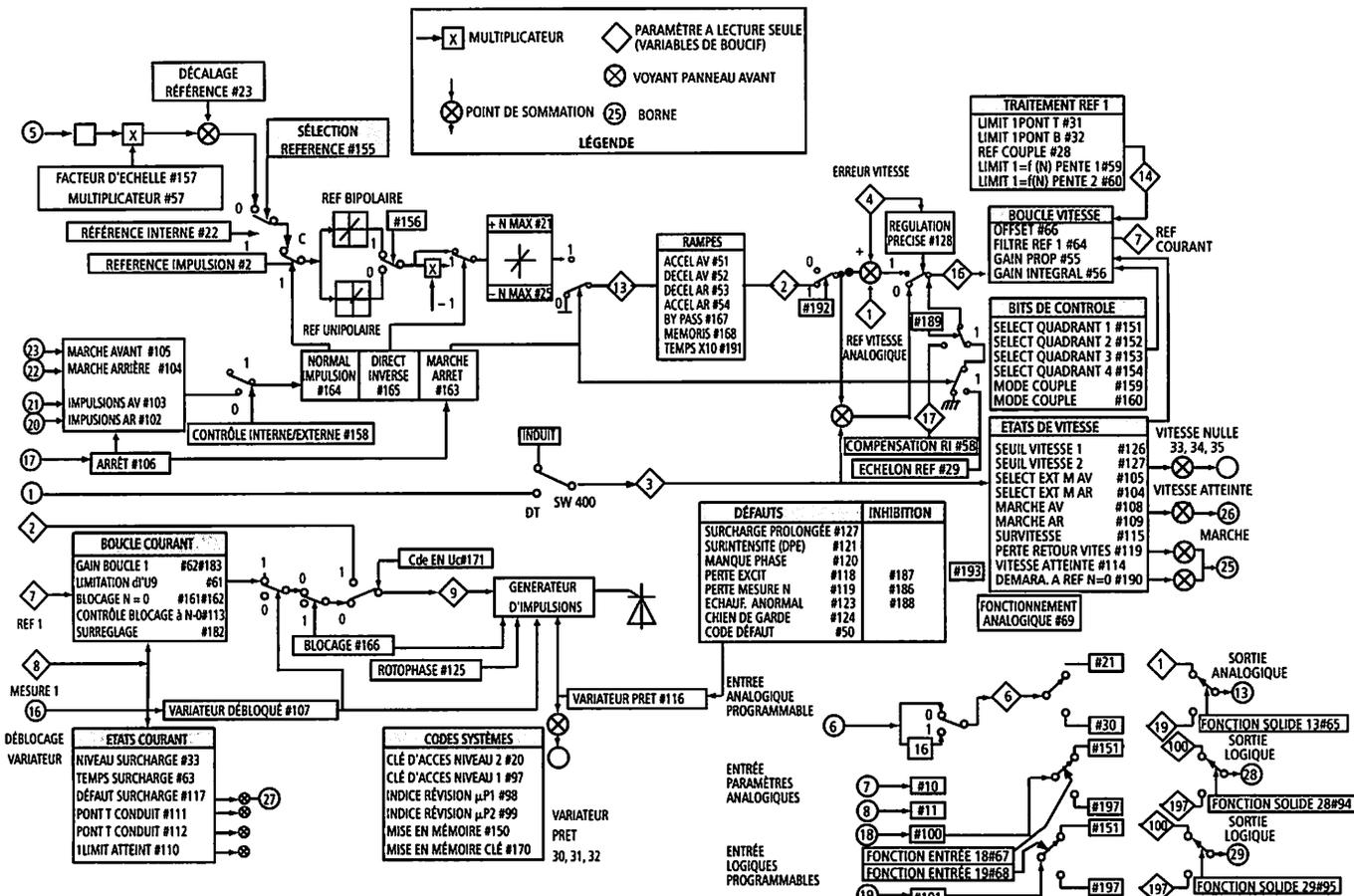
Les registres contiennent soit une valeur numérique soit un bit d'état ; certains d'entre eux ne sont accessibles qu'en lecture, d'autres en lecture-écriture.

La touche « mode » autorise, lorsque son voyant interne est allumé, de modifier le contenu des registres à l'aide des touches d'incrément « + » et « - ».



Les paramètres modifiés sont mémorisés en RAM. Une séquence spéciale permet de sauvegarder tous les nouveaux paramètres dans une mémoire non volatile du type EEPROM qui les restitue à chaque mise sous tension.

Le paramétrage du variateur peut être fait aussi localement par une console informatique standard (écran-clavier) ou à distance par ligne téléphonique et minitel.



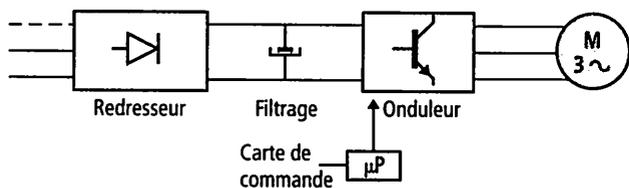
4 - Electronique de puissance

Le variateur ALTIVAR 16 permet de faire varier la vitesse d'un moteur asynchrone triphasé en alimentant les enroulements statoriques à tension et fréquence variables.

1. Constitution générale

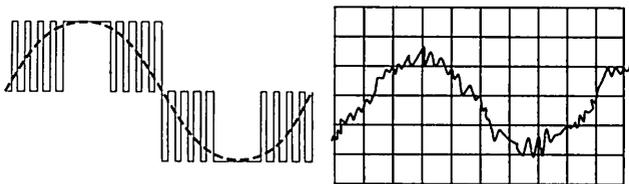
- Alimentation par le réseau monophasé ou triphasé, pont redresseur avec filtrage.
- Un onduleur constitué par 6 transistors de puissance.
- Une carte de contrôle organisée autour d'un microprocesseur assure les fonctions suivantes : commande des transistors ; régulation de vitesse, de courant ; protection sécurité ; dialogue avec l'utilisateur.

Le variateur recrée à partir de la tension du réseau, un réseau alternatif triphasé à tension et fréquence variables.



2. Principe de fonctionnement

L'ALTIVAR 16 fonctionne selon le principe de la modulation de largeur d'impulsions (PWM sinus), par découpage d'une tension continue fixe.



Découpage de la tension continue **Forme du courant de sortie**
La forme du courant résultant dans le moteur est très proche d'une onde sinusoïdale.

3. Caractéristiques

a) Caractéristiques électriques

- Gamme de fréquence de 1 à 67 Hz jusqu'à 110 Hz (ATV45).
- Tension d'alimentation : 220/240 V monophasé 50/60 Hz).
- Puissance du moteur : 0,37 kW à 15 kW.
- Tension de sortie : 380/415 V ou 220/240 V triphasé.
- Fonctionnement 4 quadrants.
- Surcouple transitoire : 150 % à 170 % du couple nominal.

b) Possibilités

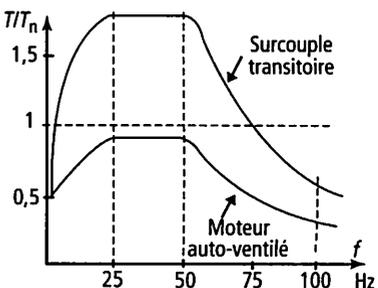
- Freinage de ralentissement.
- Régulation de vitesse avec dynamo tachymétrique.
- Coupleur de communication pour liaison série.
- Adaptation au levage.

c) Autres caractéristiques

- Fonctionnement à couple constant.
- Freinage d'arrêt intégré.
- Protection thermique du moteur.

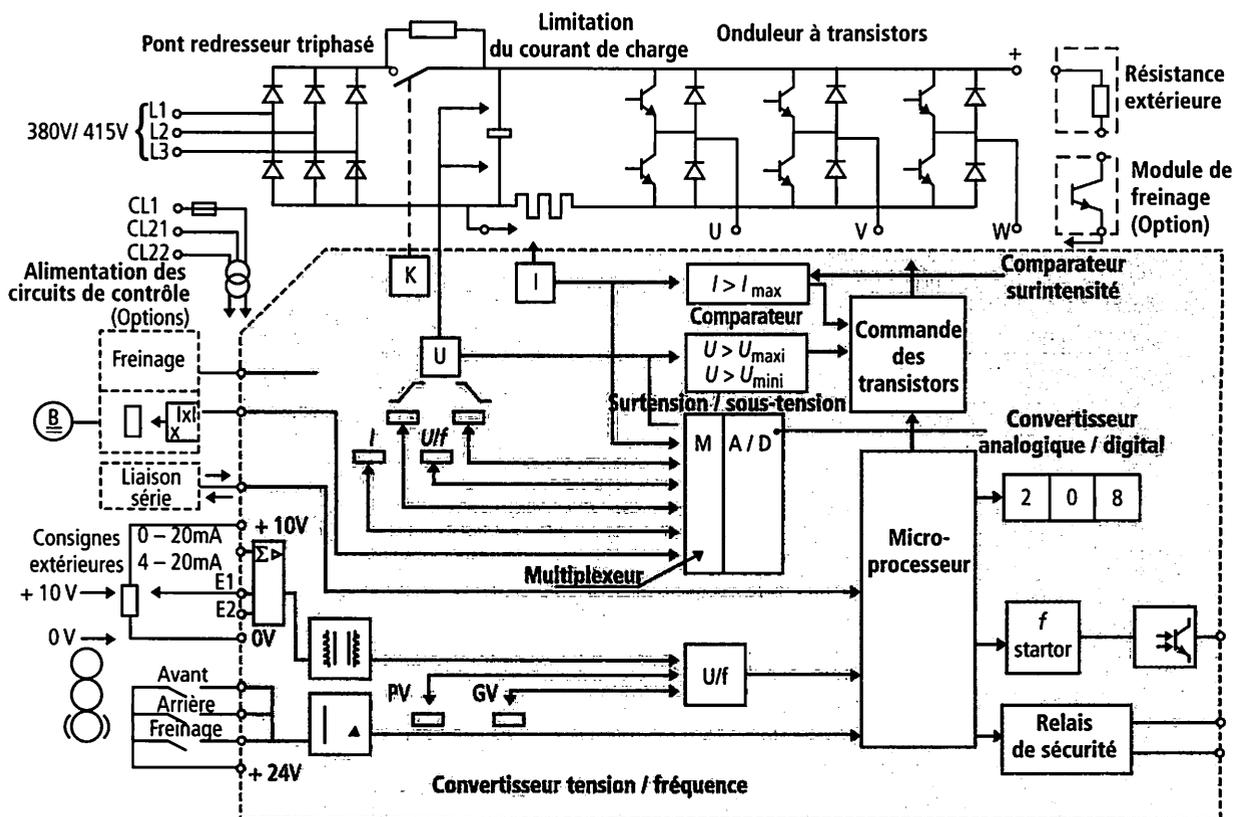
d) Caractéristiques de couple

Avec ce type de variateur, on dispose du couple nominal de 25/30 à 50/60 Hz. Lorsqu'on envisage l'utilisation à des fréquences inférieures à 25 Hz, il faut prévoir un ventilateur supplémentaire du moteur, ou choisir un moteur de puissance supérieure.



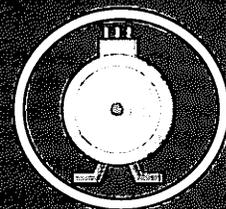
4. Dialogue

Le circuit de commande est entièrement géré par un microprocesseur qui permet de paramétrer le variateur, de mesurer certaines grandeurs, de localiser les parties défectueuses. Le principe de la commande est numérique ; les grandeurs - vitesse, tension et courant - sont numérisées et traitées par un programme en mémoire EPROM. L'affichage des résultats est effectué par des afficheurs digitaux.



Semi-conducteur NF C 03.205		Opérateurs analogiques NF C 03.213		Opérateurs analogiques NF C 03.213	
Symbole	Légende	Symbole	Légende	Symbole	Légende
	Diode à semi-conducteur (symbole général)		Symbole d'identification des signaux analogiques		Sommeur de gain m
	Diode électroluminescente		Symbole d'identification des signaux binaires ou numériques		Amplificateur, inverseur, de gain k ajusté par P1
	Diode utilisant intentionnellement l'effet de la température		Sommation		Valeur absolue
	Diode tunnel		Intégration		Dispositif d'amorçage
	Diode à effet de claquage dans un seul sens, ou diode régulatrice		Différenciation		Rampe
	Diode symétrique Diac		Amplificateur opérationnel		Comparateur à seuil x V
	Thyristor triode type non spécifié		Amplificateur inverseur avec une amplification égale à 1		Détecteur de valeur maximale
	Thyristor triode bloqué en inverse, gâchette P côté cathode		Amplificateur intégrateur $u = -RC \int_0^t (a + b) dt$		Atténuateur ajustable
	Thyristor triode bloqué en inverse, gâchette N côté anode		Amplificateur différentiateur $u = 5 \frac{d}{dt} (2a - 4b)$		Convertisseur d'un paramètre x en tension
	Thyristor triode symétrique Triac		Convertisseur numérique analogique (symbole général)		Convertisseur analogique numérique (symbole général)
	Transistor PNP		Opérateur de connexion unilatéral à fermeture : Le signal peut passer dans le sens c vers d tant que l'entrée binaire e est à l'état 1		Monostable délivrant des signaux de 80 μs de largeur
	Transistor NPN avec collecteur relié à l'enveloppe		Opérateur de connexion unilatéral à ouverture : Le signal peut passer dans les deux sens tant que l'entrée binaire e est à l'état 0		Opérateur de retard
Convertisseur de puissance NF C 03.206			Régulateur de tension		Isolement galvanique par opto-électronique
	Convertisseur (symbole général)		Déphaseur		Écrêteur symétrique
	Convertisseur de courant continu Exemple : hacheur				
	Redresseur				
	Onduleur				
	Redresseur/onduleur				
	Redresseur en couplage à double voie (en pont)				

5 - Conversion de l'énergie



Sommaire

5 - 1 - Chauffage industriel

- 59. Chauffage par résistance..... p. 116
- 60. Fours et étuves industriels p. 117
- 61. Chauffage par infrarouge p. 118
- 62. Capteurs de température p. 119

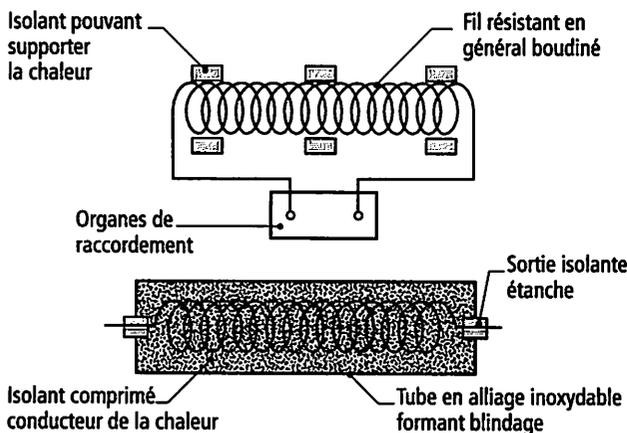
5 - 2 - Machines tournantes

- 63. Construction des moteurs
asynchrones triphasés p. 120
- 64. Caractéristiques des moteurs
asynchrones triphasés p. 124
- 65. Démarreurs électroniques p. 125
- 66. Freinage des moteurs
asynchrones p. 127
- 67. Choix d'un moteur asynchrone
triphasé p. 128
- 68. Moteur monophasé - Moteur
linéaire p. 132
- 69. Alternateur - Moteur synchrone p. 133
- 70. Moteur synchrone autopiloté p. 134
- 71. Construction des moteurs
à courant continu p. 135
- 72. Caractéristiques des machines
à courant continu p. 139
- 73. Moteurs universels - Moteurs
à entrefer plan..... p. 140
- 74. Moteur pas à pas..... p. 141



1. Constitution générale des éléments chauffants

Un élément chauffant peut être à l'air libre ou sous blindage.



2. Matériaux résistants

Le matériau résistant est l'organe actif qui transforme le courant électrique en chaleur.

Les matériaux utilisés doivent avoir :

- une résistivité plus élevée que les conducteurs ;
- un coefficient de température assez faible ;
- une température de fusion élevée ;
- une inoxydabilité à haute température.

Le tableau I donne les caractéristiques des alliages ferro-nickel-chrome les plus courants.

Diamètre des fils normalisés :

0,14 - 0,16 - 0,18 - 0,20 - 0,224 - 0,250 - 0,280 - 0,314 - 0,355 - 0,400 - 0,450 - 0,500 - 0,560 - 0,630 - 0,710 - 0,800 - 0,900 - 1,00 - 1,12 - 1,25 - 1,40 - 1,60 - 1,80 - 2,00 - 2,24 - 2,50 - 2,80 - 3,15 - 3,55 - 4,00.

On peut trouver des dimensions intermédiaires allant de 0,050 à 6,70 mm. Ces valeurs correspondent aux séries Renard.

Il existe également des rubans.

3. Isolants et blindages

Les éléments résistants, selon qu'ils sont à l'air libre ou blindés, nécessitent la présence d'isolants électriques qui doivent résister à des températures élevées.

On emploie des isolants d'origine minérale : mica, porcelaine, amiante, stéatite, magnésie, etc.

Pour éviter l'oxydation, ou pour des raisons d'étanchéité, les résistances sont souvent placées dans des tubes métalliques, en général à base de matériaux inoxydables, c'est le blindage.

4. Dimensions des résistances

Pour calculer une résistance on peut penser que la formule d'électrotechnique :

$$R = \rho \frac{L}{s}$$

est suffisante ; or, pour un matériau choisi, on peut avoir quantité de valeurs L et s puisque seul compte le rapport entre L et s . Pour définir les dimensions d'une résistance, on fait, de plus, intervenir la charge superficielle.

a) Charge superficielle

C'est la quantité de watts par unité de surface que peut évacuer un fil. Elle est donnée en W/cm^2 .

Pour les radiateurs à rayonnement libre : la charge superficielle peut prendre les valeurs de 3 à 5 W/cm^2 jusqu'à 8 à 10 W/cm^2 ; pour les plaques de cuisson, fers à repasser, elle est de 5 W/cm^2 .

C'est selon les conditions particulières de fonctionnement : température maximale, durée de fonctionnement, que l'on recherche la charge superficielle admissible optimale. Plus la charge superficielle est grande, plus la durée de vie de l'élément chauffant sera réduite.

Tableau II : charges superficielles admissibles

Température °C	800	900	1 000	1 050	1 100	1 150
Superimphy	2,2	1,7	1,3	1,1	0,7	0,5
RNC-Carbimphy	1,9	1,4	1,00	0,6,		

b) Problèmes

Les dimensions d'une résistance sont calculées à partir des données suivantes :

$$I = \frac{P}{U}$$

Puissance désirée : P en watts
Tension du secteur : U en volts
Intensité du courant : I en ampères

Charge superficielle admissible : p en W/cm^2 .

Le diamètre est donné par la formule :

$$d = 0,074 \sqrt[3]{\frac{I^2 p}{P}}$$

d en mm
 I en ampères
 p en micro-ohms-cm
 P en W/cm^2 .

Connaissant le diamètre, on peut déterminer la longueur grâce aux formules d'électrotechnique.

$$R = \rho \frac{L}{s} \text{ d'où : } L = \frac{R s}{\rho}$$

$$\text{avec } s = \frac{\pi d^2}{4}, \text{ d'où : } L = \frac{R \pi d^2}{4 \rho}$$

Tableau I : Alliage pour résistances électriques

Marques	Composition type	Caractéristiques types			Observations et principaux emplois
		Résistivité microhoms-cm à 15 °C	Température limite d'emploi (°C)	Coefficient de thermo-résistivité (*) $\times 10^{-3}$	
Superimphy	Ni 80 - Cr 20	109	1 200	0,015	Fours de traitement - Chauffage aux températures élevées - Appareils ménagers - Résistances de mesure - Radiateurs lumineux
Carbimphy	Ni 45 - Cr 25 Fe solde	112	1 150	0,12	Fours de traitement (résistances spécialement étudiées pour les atmosphères réductrices, carburantes ou faiblement sulfureuses) - Shunts Radiateurs - Bougies d'allumage
RNC. 1	Ni 30 - Cr 20 Fe solde	104	1 100	0,27	Chauffage à température moyenne
RNC. 0	Ni 12 - Cr 12 Fe solde	74	600	0,8	Rhéostats de démarrage

(*) Entre 0 et 600 °C pour RNC 0. RNC 1 et entre 0 et 1 000 °C pour les autres alliages.

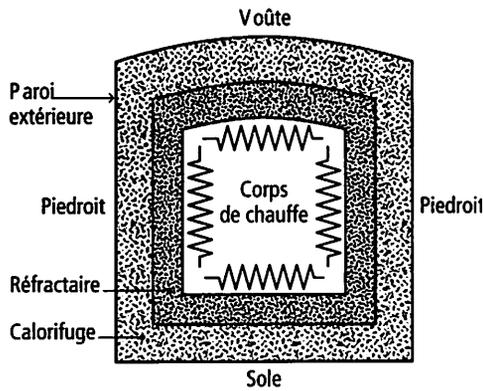
Pour la fusion et les traitements thermiques des métaux, alliages, verre, matières plastiques, on emploie des fours électriques.

Les étuves sont utilisées pour la cuisson des peintures, l'imprégnation des bobinages, le séchage des bois, les ciments, etc.

1. Constitution générale d'un four

Un four ou une étuve est une enceinte isolée thermiquement de l'extérieur.

Le transfert des calories se fait par convection naturelle ou forcée et par rayonnement dans la plupart des cas.



2. Caractéristiques

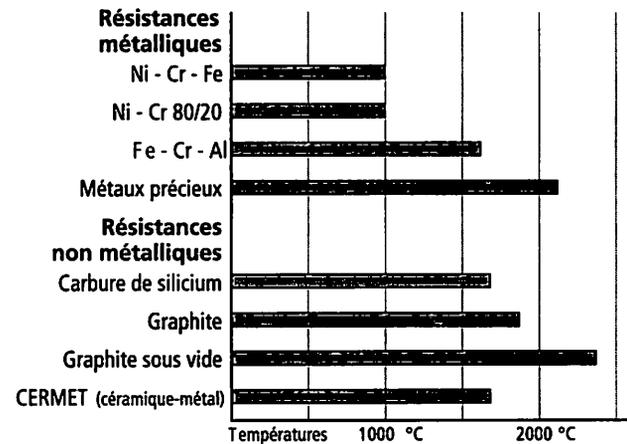
Un four, ou une étuve, industriel est construit en fonction de son emploi. Les lois de transmission de la chaleur sont soigneusement étudiées.

On doit déterminer :

- le type de four, sa forme ;
- la capacité du four, ses dimensions ;
- la température à atteindre et donc la nature des matériaux résistants, réfractaires, calorifuges ;
- la puissance électrique nécessaire ; nature et répartition des résistances.

Ces différents facteurs réagissant les uns sur les autres. L'expérience des fabricants qui réalisent le four tient compte de la satisfaction de l'utilisateur.

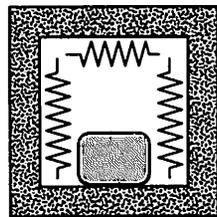
Température maximale des divers matériaux résistants



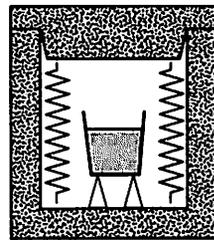
Différents types de fours ou étuves à chauffage par résistance

FOURS DISCONTINUS

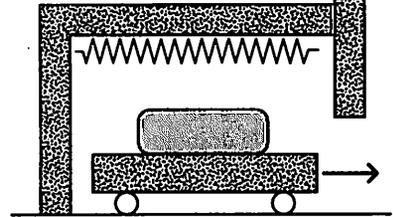
Le produit à traiter est placé à l'intérieur du four et il y reste jusqu'à la fin de son traitement.



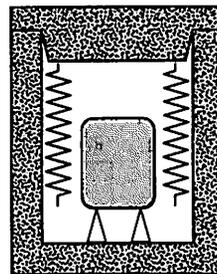
Four à chambre



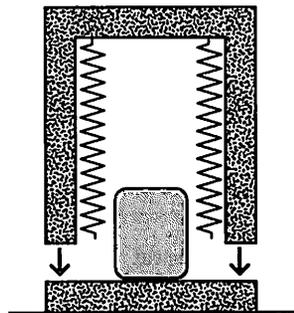
Four à creuset



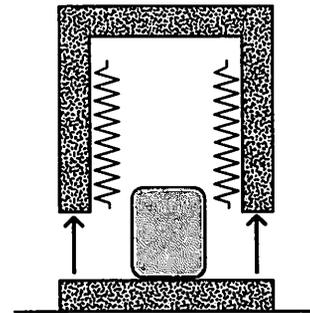
Four à sol mobile



Four puits



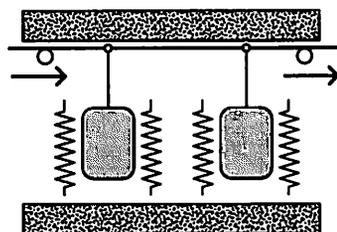
Four à cloche



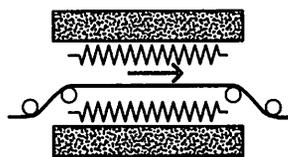
Four à élévateur

FOURS CONTINUS

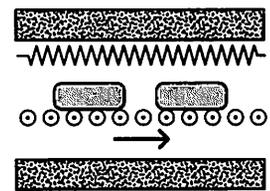
Le produit se déplace à une vitesse qui lui permet d'atteindre la température voulue.



Four à transporteur monorail



Four tirant



Four à rouleaux

Le chauffage par infrarouge est une utilisation particulière du chauffage par résistance.

1. Caractéristiques

Le rayonnement est un transport d'énergie sous forme d'ondes électromagnétiques de différentes longueurs d'ondes. L'échelle des radiations situe le rayonnement infrarouge entre 760 et $4 \cdot 10^5$ nanomètres.

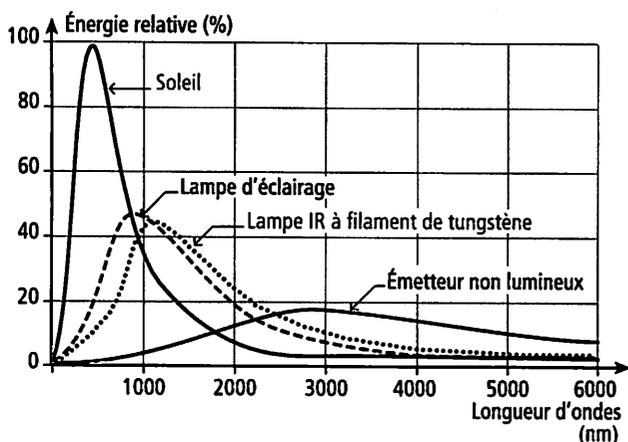
1 nanomètre = 10^{-9} m

- La puissance rayonnée par un émetteur infrarouge est proportionnelle à la surface totale de la source du rayonnement et à la puissance 4 de sa température absolue ($W = k S T^4$).
- La pénétration des radiations est faible, c'est surtout un chauffage de surface.
- L'espace intermédiaire entre l'émetteur et le corps à chauffer, en général, de l'air, n'absorbe pas ce rayonnement qui peut être dirigé par des réflecteurs.

2. Différentes catégories d'émetteurs

10	Ultraviolet	Émetteurs infrarouge
400 760	Lumière visible	
	Infrarouge court 800 à 2 000 nm	Lampes-Tubes à filament de tungstène porté à une température de 1 900 à 2 000 °C
2 000	Infrarouge moyen 2 000 à 4 000 nm	Éléments tubulaires au quartz température de 700 à 1 100 °C
4 000	Infrarouge long > 4 000 nm	Plaques-Éléments tubulaires portés à une température de 200 à 500 °C
10 000		

L'énergie rayonnée en fonction de la catégorie d'émetteur est donnée par le graphique qui montre que l'énergie rayonnée par infrarouge est d'autant plus importante que la température de l'émetteur est plus élevée.

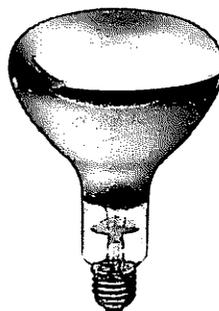


3. Applications

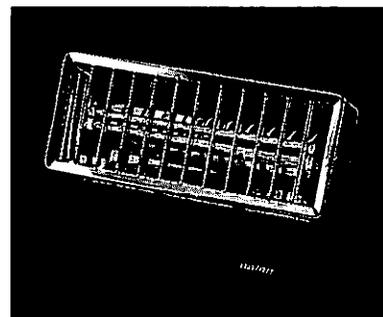
Le chauffage infrarouge est surtout utilisé pour les séchages de peinture, des opérations de polymérisation, de cuisson de vernis, de déshydratation, de séchage dans l'alimentation et l'industrie.

On l'emploie également pour les chauffages domestiques localisés.

- La lampe à infrarouge ne se différencie des lampes d'éclairage que par son spectre lumineux et une durée de vie 3 et 4 fois plus longue.
- Des radiateurs infrarouges moyens sont constitués par une résistance enrobée de quartz et un réflecteur en métal poli.

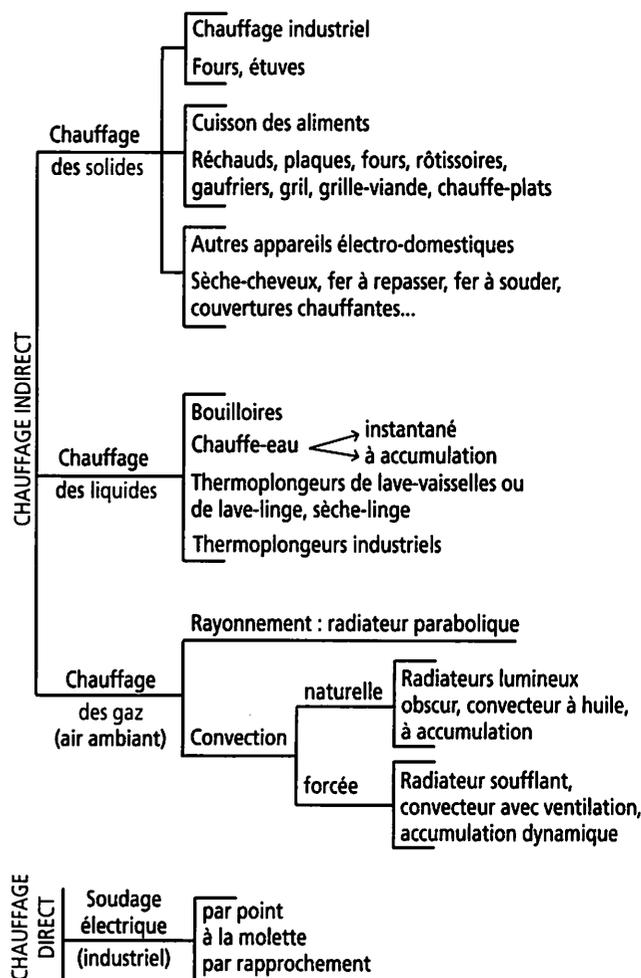


Lampe à infrarouge (Mazda).



Radiateur à rayonnement infrarouge (doc. Calor/Groupe SEB).

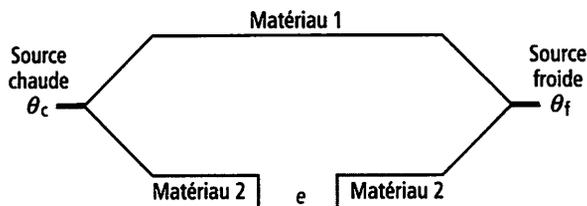
4. Classification des appareils de chauffage par résistance



- **Chauffage indirect** : le corps à chauffer est placé près des résistances.
- **Chauffage direct** : le corps à chauffer forme résistance.

1. Les capteurs thermoélectriques ou thermocouples

1.1. Principe - effet Seebeck



Lorsque la température θ_c est différente de θ_f , il apparaît une tension e proportionnelle à l'écart de température.

$$e = S \cdot (\theta_c - \theta_f)$$

S : coefficient de Seebeck en $V/^\circ C$
 θ_c : température de la soudure chaude
 θ_f : température de la soudure froide

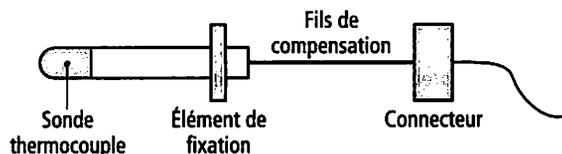
Le coefficient de Seebeck S dépend essentiellement du couple de matériau utilisé.

1.2. Classification des thermocouples

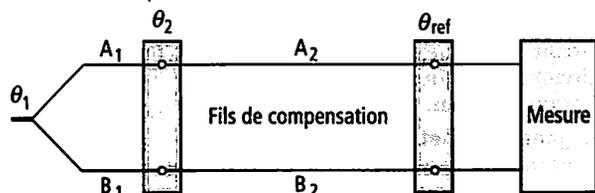
La norme définit une lettre selon le couple de matériau utilisé, la couleur des conducteurs est également normalisée. Les différentes sensibilités des thermocouples permettent un choix selon la gamme de mesure et la précision voulue.

Symbole	Nature des matériaux	Plage de température	Sensibilité $\mu V/^\circ C$	Code des couleurs Norme CEI	Norme NF
K	+ Chromel - Alumel	-180 / 1 350 $^\circ C$	41	+ Vert - Blanc	+ Jaune - Rouge
J	+ Fer - Constantan	-180 / 750 $^\circ C$	55	+ Noir - Blanc	+ Jaune - Noir
E	+ Chromel - Constantan	-200 / 600 $^\circ C$	68	+ Violet - Blanc	+ Jaune - Violet
T	+ Cuivre - Constantan	0 / 350 $^\circ C$	40	+ Marron - Blanc	+ Jaune - Bleu
S	+ Platine/Rhodium - Platine	-50 / 1 700 $^\circ C$	12	+ Orange - Blanc	+ Jaune - Vert
R	+ Platine/Rhodium - Platine	-50 / 1 700 $^\circ C$	14	+ Orange - Blanc	+ Jaune -
B	+ Platine/Rhodium - Platine/Rhodium	-50 / 1 750 $^\circ C$	10	+ Gris - Blancs	non normalisé

1.3. Structure d'un capteur de température à thermocouple



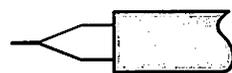
Lorsque la distance entre la mesure et la température de référence est grande, il faut utiliser des fils de compensation qui n'induisent pas d'erreurs sur la mesure.



Les jonctions A_1-A_2 et B_1-B_2 doivent être à la même température et le coefficient de Seebeck doit être identique pour le

couple A_1-B_1 et A_2-B_2 pour qu'il n'y ait pas une fém supplémentaire qui vienne perturber la mesure. Les fils de compensation doivent être choisis selon le type de thermocouple, leurs couleurs sont identiques à celles des fils du capteur.

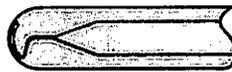
L'élément sensible peut se présenter sous différentes formes.



• **Sonde nue** : la sonde est en contact direct avec le milieu à mesurer. Le temps de réponse est excellent.



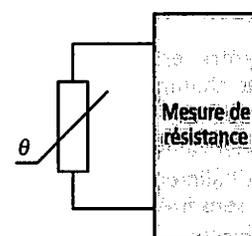
• **Sonde isolée** : ce capteur est beaucoup plus résistant aux agressions mécaniques et chimiques mais son temps de réponse se trouve allongé.



• **Sonde à la masse** : la sonde est soudée à l'enveloppe qui la protège. Ceci permet de réduire le temps de réponse tout en conservant une bonne protection du capteur.

2. Les capteurs à résistance ou thermorésistance

2.1. Principe - les thermistances



La valeur de la résistance varie avec la température selon la relation.

$$R = R_0 (1 + \alpha \cdot \theta)$$

R : résistance à la température θ
 R_0 : résistance à 0 degré Celsius
 α : coefficient de température en $^\circ C^{-1}$

2.2. Les différents capteurs à thermorésistance

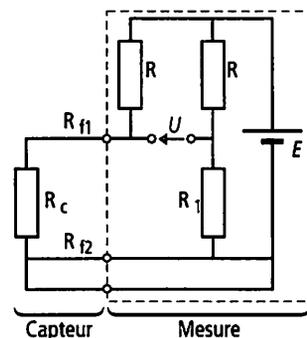
Métal	$\alpha (10^{-3} \cdot ^\circ C^{-1})$	Plage d'utilisation	Température de fusion
Cuivre	3,93	- 190 / + 150	1 083
Nickel	5,37	- 60 / + 180	1 453
Platine	3,85	- 60 / + 1 100	1 769

On emploie surtout des thermistances à coefficient de température positif (CTP). La plus employée est la sonde $P_t 100$ dont la résistance vaut $R = 100 \Omega$ à $0^\circ C$ et $R = 198,5 \Omega$ à $100^\circ C$.

2.3. Capteurs trois fils

À l'équilibre, $U = 0$ et $R \cdot (R_c + R_{F1}) = R \cdot (R_1 + R_{F2})$ donc $R_c = R_1$, la résistance des fils se compense et ne modifie pas la mesure.

Dans tous les cas le courant dans la sonde doit être faible (≈ 1 mA) pour réduire l'échauffement par effet Joule.



3. Choix d'un capteur de température

Les thermorésistances sont employées pour des températures inférieures à $200^\circ C$. Leur temps de réponse est long.

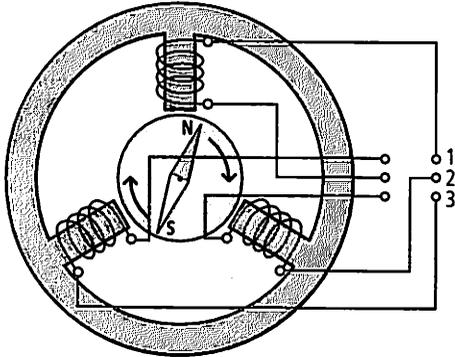
Les thermocouples sont employés pour des températures négatives ou très élevées. Elles sont précises et leur temps de réponse est faible.

Les moteurs asynchrones représentent au moins 80 % des moteurs électriques utilisés couramment ; cela est dû, en grande partie, à leur simplicité de construction et à la facilité de démarrage.

1. Principe de fonctionnement

1.1. Création d'un champ tournant en triphasé

Si on alimente 3 bobines identiques placées à 120° par une tension alternative triphasée :



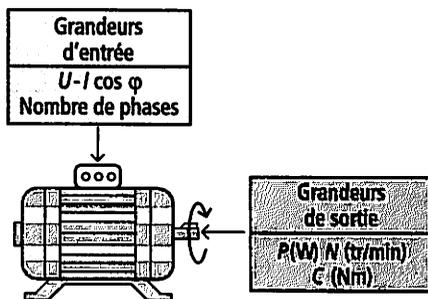
- Une aiguille aimantée, placée au centre, est entraînée en rotation ; il y a donc bien création d'un champ tournant.
- Un disque métallique en aluminium ou en cuivre est entraîné dans le même sens que l'aiguille aimantée.
- Si l'on inverse deux des trois fils de l'alimentation triphasée, l'aiguille, ou le disque, tourne en sens inverse.

Justification : Les trois champs alternatifs produits par les bobines alimentées en courant triphasé se composent pour former le champ tournant.

Le champ magnétique tournant crée dans le circuit du rotor des courants induits ; ceux-ci, d'après la loi de Lenz, s'opposent à la cause qui leur a donné naissance, et provoquent une force magnétomotrice qui entraîne le rotor en rotation.

1.2. Relations d'électrotechnique

Le moteur asynchrone transforme l'énergie électrique apportée par le courant alternatif monophasé ou triphasé en énergie mécanique. Il est caractérisé par des grandeurs d'entrée qui sont électriques et par des grandeurs de sortie qui sont mécaniques.



a) Grandeurs d'entrée

La puissance électrique absorbée par un moteur à courant alternatif est :

- En monophasé :

$$P = UI \cos \varphi$$

- U : tension entre phases en volts
- I : courant absorbé
- $\cos \varphi$: cosinus de l'angle de déphasage entre le courant et la tension

- En triphasé :

$$P = \sqrt{3} UI \cos \varphi$$

Remarque : Les seules mesures du courant et de la tension ne peuvent donner la puissance, le $\cos \varphi$ pouvant varier entre 0,1 et 0,2 à vide jusqu'à 0,9 en pleine charge.

b) Grandeurs de sortie

La puissance mécanique est celle obtenue sur l'arbre du moteur : c'est celle qui désigne la puissance nominale du moteur.

$$P = T \omega$$

P : puissance en watts
 T : couple moteur newtons-mètres (Nm)

$$\omega = 2\pi n$$

ω : vitesse angulaire en radians par seconde (rad/s)
 n : vitesse de rotation en tours par seconde (tr/s).

Vitesse de rotation de l'arbre moteur :

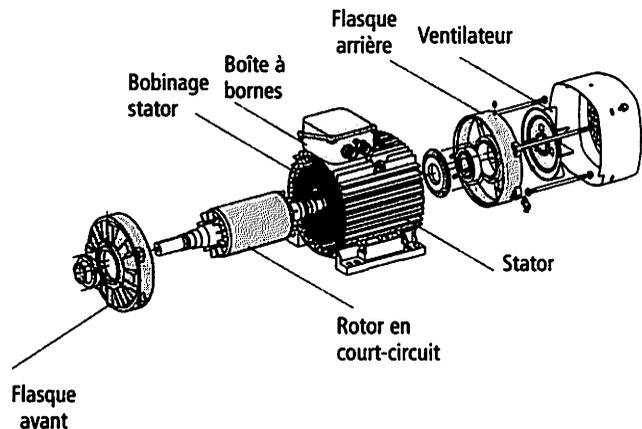
n (tr/s) : vitesse de synchronisme

$$n = \frac{f}{p}$$

f (Hz) : fréquence du réseau
 p : nombre de paires de pôles
($p = 1$ pour 2 pôles ; $p = 2$ pour 4 pôles, etc.)

2. Constitution générale d'un moteur asynchrone

Quels que soient les constructeurs de machines tournantes, nous constatons une très grande stabilité des techniques de construction. Par contre, les adaptations de moteurs à différentes applications sont de plus en plus nombreuses : moteur-réducteur, moteur-frein, moto-pompe, génératrice-asynchrone, etc.



Moteur asynchrone triphasé, vue éclatée.

On classe les différentes pièces rencontrées dans toute machine tournante selon les trois grandes fonctions réalisées :

- **Organes électriques :**
 - Circuit rotorique, en court-circuit au bobiné ;
 - Circuit statorique bobiné ;
 - Plaque à bornes.
- **Organes magnétiques :**
 - Circuit magnétique statorique et rotorique.
- **Organes mécaniques :**
 - Carcasse supportant les flasques, roulements, arbre, ventilateur, tiges de montage et fixation du moteur.

3. Circuit magnétique

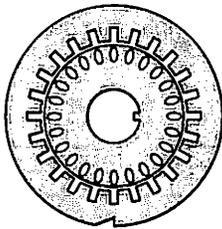
Le circuit magnétique des machines à courant alternatif et des moteurs asynchrones en particulier, doit canaliser les lignes de forces du champ tournant.

3.1. Conditions à remplir

- Avoir des pertes par hystérésis et courants de Foucault minimum.
- Supporter les bobinages.
- Comporter une partie fixe et une partie mobile.
- Être refroidi convenablement.

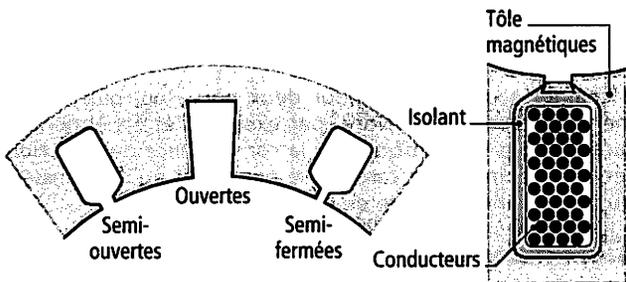
3.2. Solutions communes au stator et au rotor

- Canalisation du flux par des tôles magnétiques placées dans le sens radial, en forme d'anneaux pour le stator et en forme de disques pour le rotor.
- Utilisation de tôles d'épaisseur 0,35 à 0,5 mm en acier au silicium, ayant des pertes de 1,4 à 2,6 W/kg, pour diminuer les pertes par hystérésis et courants de Foucault. En général, ces tôles sont isolées par oxydation ou par un vernis isolant pour les très grosses machines.



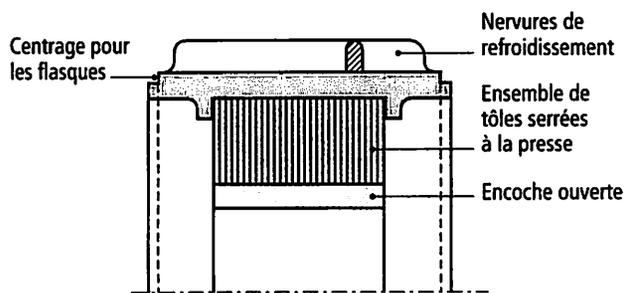
Exemple de découpage simultané d'une tôle stator et d'une tôle rotor pour éviter les pertes de métal.

Les encoches de différentes formes permettent de loger les conducteurs du bobinage électrique.



3.3. Solutions particulières aux stators

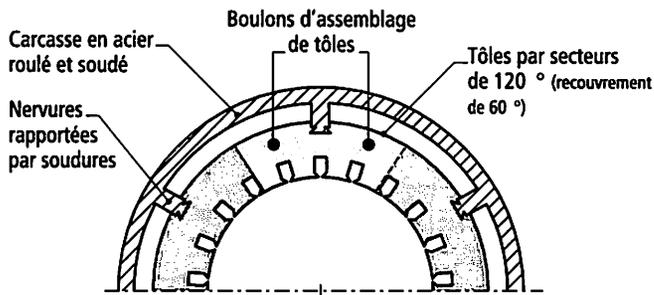
- Fixation en rotation et en translation.
- Pour les petits moteurs, la carcasse moulée en alpac sur l'empilage de tôles assure le blocage des tôles et le refroidissement du circuit magnétique.



Carcasse en alliage d'aluminium.

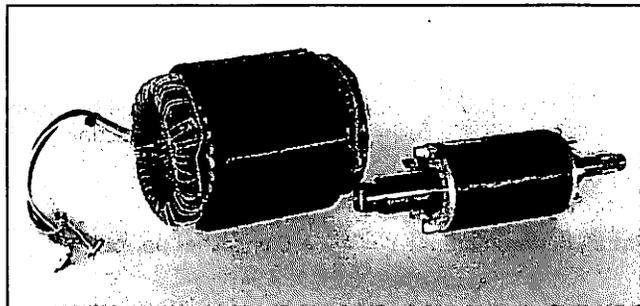
- Pour les gros moteurs, la carcasse peut être en acier moulé ou en tôle d'acier roulé et soudé, pour les diamètres supérieurs à un mètre. Les tôles magnétiques sont réalisées par

secteurs et serrées entre elles par des rivets ; elles sont centrées dans des nervures et maintenues serrées par deux plateaux prenant appui sur des butées soudées.



3.4. Solutions particulières au rotor

- Le rotor est la partie mobile de la machine ; il est le siège de l'induction électromagnétique variable.
- Les encoches sont inclinées par rapport à l'axe longitudinal pour améliorer le démarrage et obtenir un couple constant.
- L'entrefer entre le rotor et le stator est le plus réduit possible ; de l'ordre de 0,3 à 0,4 mm pour les puissances inférieures à 10 kW.



Stator bobiné avec le rotor en court-circuit d'un moteur asynchrone triphasé (Leroy Somer).

4. Bobinage à courant alternatif

La disposition des bobinages statoriques des moteurs asynchrones triphasés est la même que celle des machines synchrones (génératrices ou moteurs).

4.1. Définitions

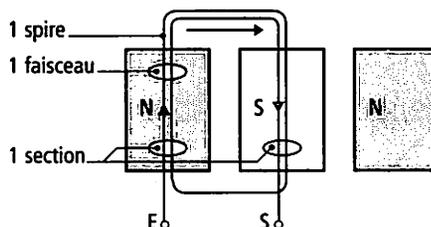
En triphasé, le stator comporte trois enroulements indépendants pouvant être couplés en étoile ou en triangle. Chacun de ces enroulements est composé de sections logées dans les encoches du circuit magnétique.

a) Spire

Elle comprend un conducteur aller et un conducteur retour soit deux conducteurs actifs.

b) Faisceau

C'est l'ensemble des conducteurs placés dans une encoche et parcourus dans le même sens par le courant d'une phase.



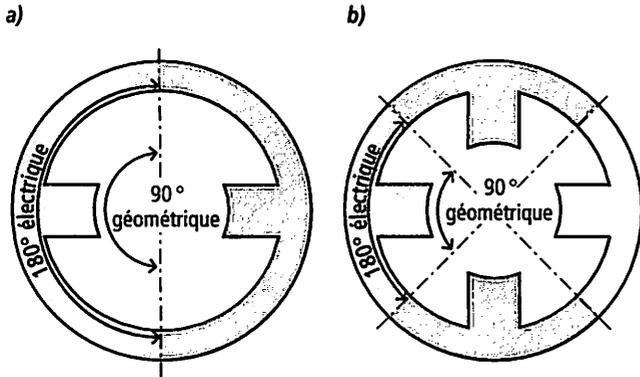
c) Section

Elle est formée de deux faisceaux reliés par les têtes de bobines. Une section est caractérisée par son nombre de spires et son pas.



d) Pas d'une section

C'est la distance entre deux lignes neutres consécutives : on l'appelle aussi pas diamétral ou pas polaire.



Dans le cas d'un moteur de 2 pôles ($n = 3\ 000$ tr/min), le pas polaire représente 180° électriques et correspond aux degrés géométriques (fig. a).

Dans le cas d'un moteur de 4 pôles ($n = 1\ 500$ tr/min), le pas polaire reste de 180° électriques et le degré géométrique vaut 2 degrés électriques (fig. b).

Pour calculer le pas polaire d'un bobinage à pas diamétral, on utilise la relation :

$$Y = \frac{N}{2p}$$

N : nombre d'encoches du stator
 $2p$: nombre de pôles
 Y : pas de l'enroulement ou nombre d'encoches embrassées par une section.

Exemple :

Stator de 24 encoches, 4 pôles :

Pas de l'enroulement : $Y = \frac{24}{4} = 6$ encoches par pôle.

Si l'on veut connaître le nombre d'encoches par pôle, et par phase, on peut écrire :

$$q = \frac{N}{2p \times m}$$

q : nombre d'encoches par pôle et par phase
 m : nombre de phases

Exemple :

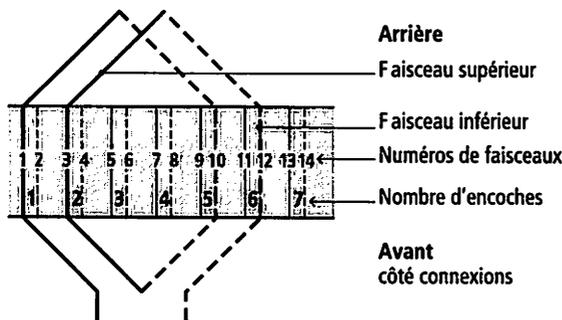
Stator 24 encoches, 4 pôles en triphasé :

$q = \frac{24}{4 \times 3} = 2$ encoches par pôle et par phase.

4.2. Représentation schématique

a) Développement panoramique

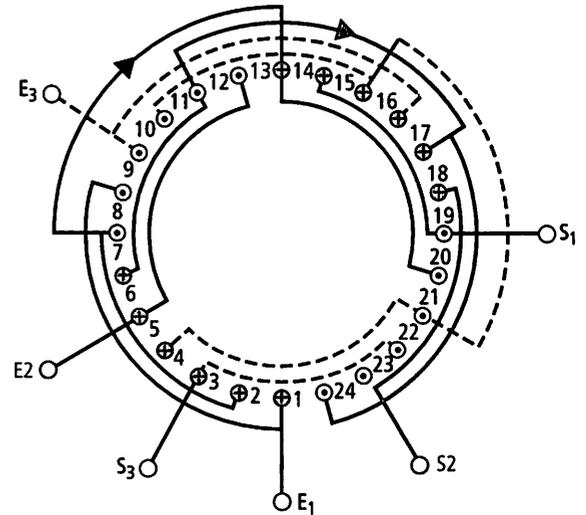
L'induit est supposé fendu et développé sur le papier. Si, dans une encoche, il y a deux faisceaux, le faisceau supérieur est représenté en traits pleins et le faisceau inférieur en traits pointillés.



b) Projection frontale

Les faisceaux sont représentés dans leur position réelle sous forme de points équidistants répartis à la périphérie du stator. Les connexions sont réalisées sur la face avant en traits pleins

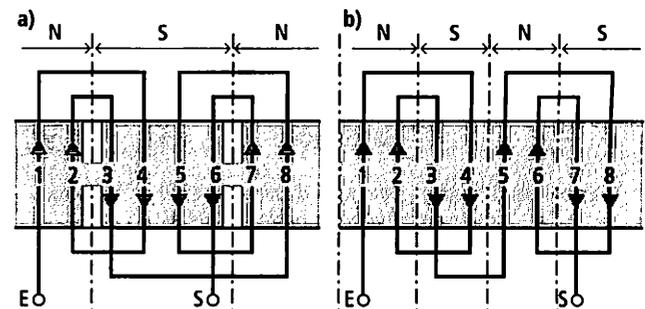
et les liaisons sur la face arrière en traits pointillés. Cette représentation devient assez touffue pour les schémas complexes.



4.3. Procédés d'enroulements

a) Bobinage imbriqué ou à « pôles alternés » (fig. a)

Il nécessite autant de bobines que de pôles, soit une bobine par pôle et par phase.

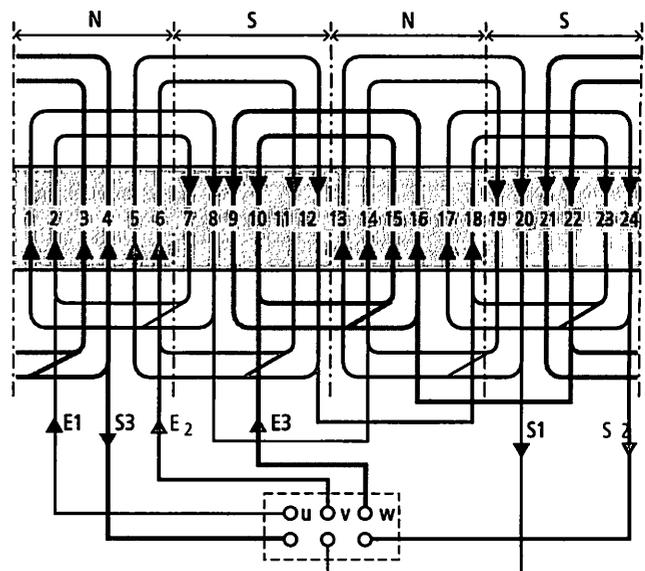


b) Bobinage ondulé ou à « pôles consécutifs » (fig. b)

Il comporte une bobine pour deux pôles, ou, plus exactement, il crée un pôle Nord, par exemple, et on obtient en face un pôle Sud fictif qui est la conséquence du pôle Nord réel. Ce bobinage est caractérisé par le fait qu'il ne possède qu'une bobine par paire de pôles.

4.4. Exemple

Schéma de bobinage d'un stator de moteur asynchrone triphasé caractérisé par 24 encoches - 4 pôles - triphasé :

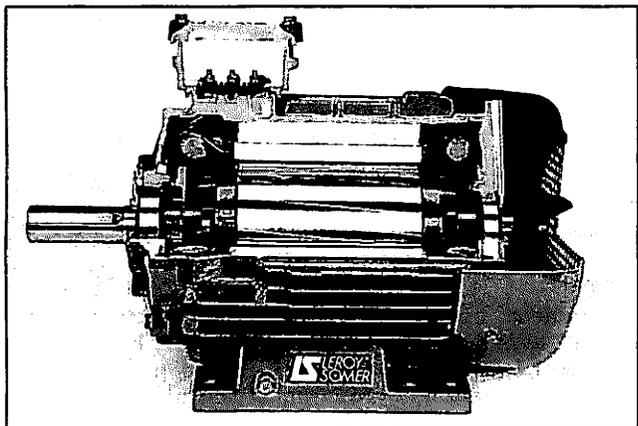


5. La partie mécanique

Son rôle essentiel est d'assurer :

- la position relative du stator et du rotor ;
- la transmission de l'énergie mécanique ;
- la protection des parties électriques et magnétiques ;
- la fixation.

5.1. Exemple de construction



Coupe d'un moteur (Leroy Somer).

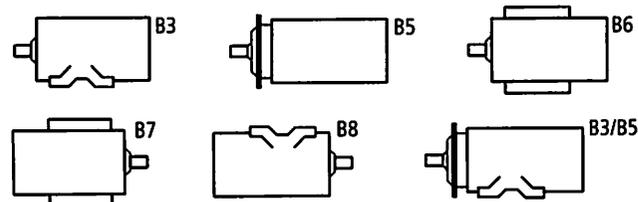
5.2. Fonctions assurées par les pièces mécaniques

- **Carcasse** : elle sert de support à l'ensemble des pièces du moteur, en particulier, elle renferme le stator. Elle est caractérisée par la hauteur d'axe.
- **Arbre et rotor** : ils servent à transmettre le couple moteur.
- **Paliers** : ils assurent le guidage en rotation et limitent le déplacement axial.
- **Flasques** : elles servent à positionner les paliers par rapport à la carcasse et protègent les organes internes du moteur.
- **Ventilateur** : il facilite le refroidissement du moteur.

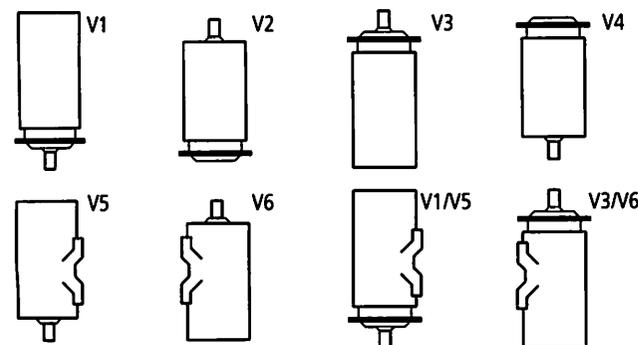
5.3. Fixations et hauteur d'axes

Il existe deux familles de fixations : à patte ou à flasque-brique. Les différents cas sont normalisés en fonction de la position du moteur.

• Moteurs horizontaux



• Moteurs verticaux



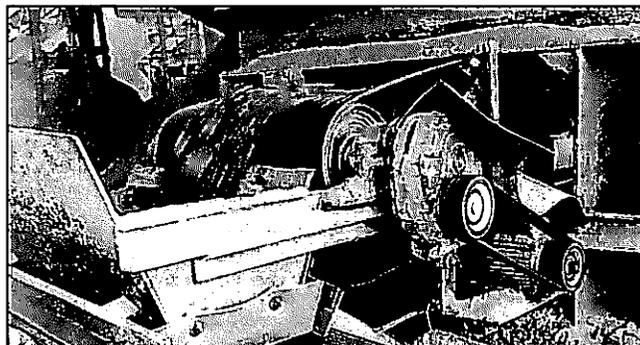
Les hauteurs d'axes sont normalisées : 56 - 63 - 71 - 80 - 90 - 100 - 112 - 132 - 160 - 180 - 200 - 225 - 250 - 280 - 315 - 355.

6. Environnement - Désignation

6.1. Type de construction

Les moteurs asynchrones sont classés d'après les indices de protection. On rencontre principalement les indices suivants :
 IP23 : moteur protégé
 IP44 : moteur fermé
 IP55 : moteur étanche

La protection contre les chocs mécaniques correspond à l'indice IK08 (norme EN 50102).



Moteur d'entraînement d'un broyeur.
 La construction IP55 est bien nécessaire (doc. Leroy Somer).

6.2. Échauffement - Classes d'isolation

Les échauffements tolérés en fonction des classes d'isolation sont indiqués dans le tableau ci-dessous.

Ces échauffements sont donnés pour une température ambiante de 40 °C et définis par la norme NF C 51.111.

Classe d'isolation	E	B	F	H
Échauffement maxi (°C) par mesure de résistance	75	80	100	125
Température limite du bobinage (°C) Échauffement + ambiance	115	120	140	165

6.3. Protection interne

On réalise la protection contre les échauffements anormaux des bobinages en plaçant au cœur de ceux-ci une sonde de température qui peut être constituée soit par une thermistance, soit par un détecteur de type « Ipsotherme » (lame bimétallique déformable).

6.4. Désignation d'un moteur asynchrone

- **Type de construction**
 - Fermé : IP44.
 - Étanche : IP55.
 - Chocs mécaniques IK08.

- **Forme de construction**
 - À pattes.
 - Flasque-bride, etc.

- **Caractéristiques électriques**
 - Tension.
 - Fréquence.
 - Nombre de phases.
- **Caractéristiques mécaniques**
 - Puissance.
 - Vitesse.

- **Spécifications particulières**
 Bout d'arbre ou fixation spéciale, ambiance particulière (température, humidité, altitude, pression).

Exemple :

- Moteur asynchrone à cage étanche (IP55 IK08) ;
- Fixation à pattes ;
- Triphasé 50 Hz - 230/400 V ;
- 1 500 tr/min - 2 kW.

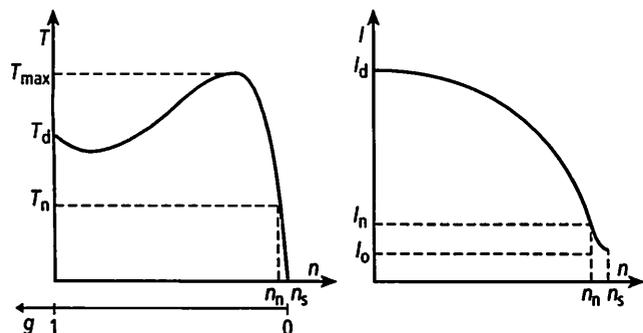
Leroy Somer Mot. 3~ LS 132S T						CE
SOMER N° 034729GL002						
IP55	IK08	cl.F	40°C	S.S1	kg 39	
○	△ 380	50	1420	5.50	0.85	12.00
	△ 230	-	1430	-	0.82	20.70
	△ 400	-	1430	-	0.82	11.90
	△ 415	-	1435	-	0.80	11.70
	△ 440	60	1710	6.60	0.86	12.30
	△ 460	-	1730	-	0.84	11.90

Plaque signalétique fixée sur le moteur.





1. Caractéristique électromécanique

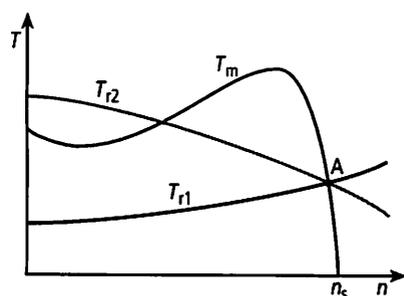


$n_s = \frac{f}{P}$ n_s (tr/s) : vitesse de synchronisme
 n_n (tr/s) : vitesse nominale

$g = \frac{n_s - n}{n_s}$ g (%) : glissement exprimé en pourcent

- T_n (Nm) : couple nominal
- T_a (Nm) : couple d'accrochage $T_a \approx 1,8 T_n$
- T_d (Nm) : couple de démarrage $T_d \approx 2 T_n$
- T_{max} (Nm) : couple maximum $T_m \approx 2,5 T_n$
- I_0 (A) : courant à vide $I_0 \approx 0,4 I_n$
- I_n (A) : courant nominal
- I_d (A) : courant de démarrage $I_d \approx 7 I_n$

2. Point de fonctionnement

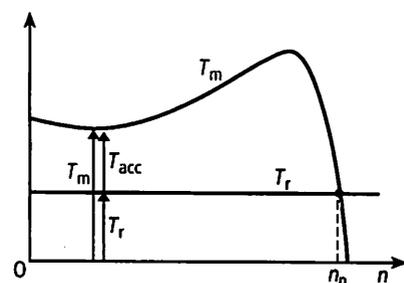


T_{r1} : couple résistant 1
 T_{r2} : couple résistant 2
 T_m : couple moteur
 A : point de fonctionnement

Le point de fonctionnement correspond au point à vitesse stabilisée soit lorsque $T_m = T_r$.

On remarque que, malgré la présence d'un point de fonctionnement pour T_{r1} et T_{r2} , la machine asynchrone ne pourra pas entraîner la charge ayant le couple résistant T_{r2} car celui-ci est supérieur au couple moteur pendant le démarrage.

3. Calcul du temps de démarrage



$T_m = T_r + T_{acc}$ T_{acc} : couple accélérateur

$T_{acc} = J \cdot \frac{d\Omega}{dt}$
 J (kg · m²) : moment d'inertie ramené sur l'arbre moteur
 $\frac{d\Omega}{dt}$ (rad/s) : accélération angulaire.

$\frac{d\Omega}{dt} = \frac{\Delta\Omega}{\Delta t} = \frac{\Omega_n - 0}{t_d - 0} = \frac{\Omega_n}{t_d}$

$t_d = \frac{J \cdot \Omega_n}{T_{acc}}$ Ω_n : vitesse angulaire nominale
 t_d (s) : temps de démarrage

Le couple moteur n'étant pas constant pendant tout le démarrage, les constructeurs donnent une valeur moyenne.

$T_{md} = \frac{T_d + 2 T_a + 2 T_m + T_n}{6}$

où : $\frac{T_{md}}{T_n} = \frac{T_d/T_n + 2 T_a/T_n + 2 T_m/T_n + 1}{6}$

T_{md} : couple moteur moyen durant le démarrage.

Exemple :

Un moteur asynchrone ayant pour caractéristiques : $P_u = 2,2$ kW ; $n_n = 1 430$ tr/min ; $T_d/T_n = 1,9$; $T_{max}/T_n = 2,4$; $T_a/T_n = 1,7$ entraîne une charge définie par son couple résistant constant $T_r = 14,7$ Nm et son moment d'inertie $J = 0,2$ kg · m². Calculer le temps de démarrage.

Solution :

$\Omega_n = \frac{\pi \cdot n_n}{30} = \frac{\pi \cdot 1 430}{30} = 149,7$ rad/s

$T_n = \frac{P_u}{\Omega_n} = \frac{2 200}{149,7} = 14,7$ Nm

$T_{md} = \frac{(1,9 + 2 \times 1,7 + 2 \times 2,4 + 1)}{6} T_n = 1,85 \cdot T_n = 27,2$ Nm

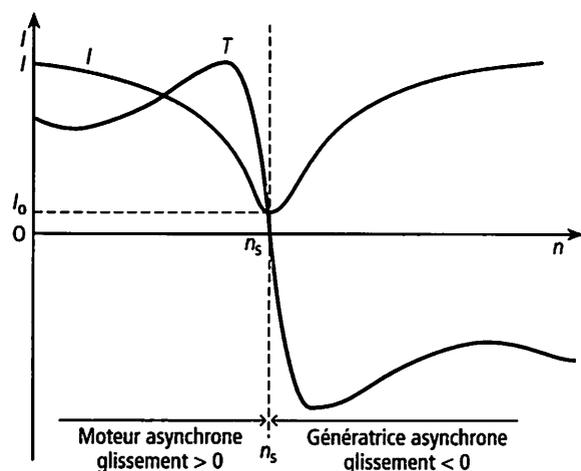
$T_{acc} = T_{md} - T_n = 27,2 - 14,7 = 12,5$ Nm

$t_d = \frac{J \cdot \Omega_n}{T_{acc}} = \frac{0,2 \times 149,7}{12,5} = 2,4$ s

4. Fonctionnement en génératrice

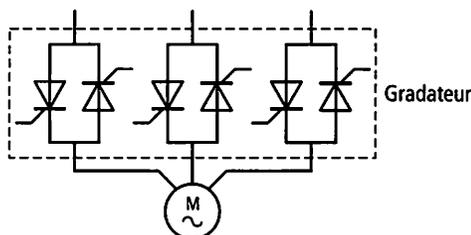
La machine asynchrone présente une symétrie de ses caractéristiques par rapport à la vitesse de synchronisme. Si le rotor est entraîné à une vitesse supérieure à la vitesse de synchronisme, la machine fonctionne en génératrice asynchrone. Ce mode de fonctionnement est utilisé dans les centrales hydrauliques de petites puissances ou pour le freinage des moteurs asynchrones.

Caractéristiques en génératrice asynchrone :



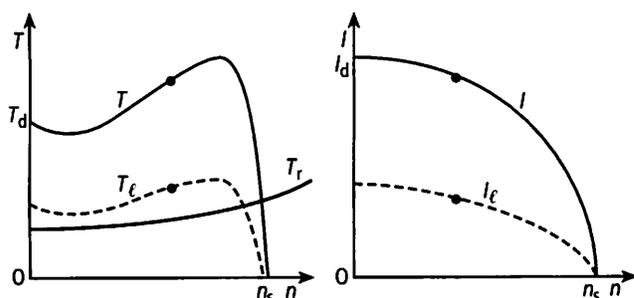
Contrairement à la machine synchrone, la machine asynchrone ne peut pas fonctionner en génératrice si elle n'est pas reliée au réseau. Celui-ci fixe la vitesse de synchronisme et fournit l'énergie réactive nécessaire à la création du flux.

1. Démarrer à variation de tension



La variation de tension est réalisée par un gradateur triphasé. Le démarrage se fait progressivement, ce qui évite la pointe de courant en démarrage direct.

1.1. Caractéristiques sous tension réduite



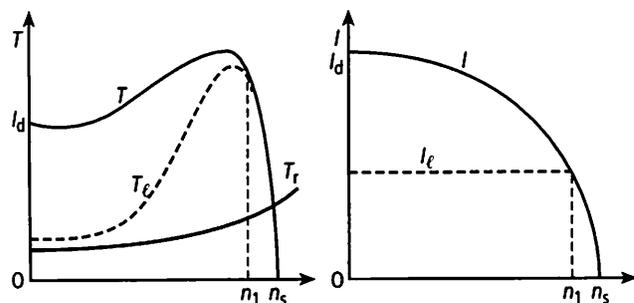
T_l : couple pour une tension limitée U_l .
 I_l : courant pour une tension limitée U_l .

Pour tous points de ces caractéristiques, on peut écrire :

$$\frac{T}{T_l} = \left(\frac{U_n}{U_l}\right)^2 = \left(\frac{I}{I_l}\right)^2$$

La tension U_l évolue de 0 à U_n selon une rampe programmable.

1.2. Démarrage en limitation de courant



Le démarrage se fait à courant constant.

Le courant I_l doit être réglé de manière à ce que T_l soit supérieur au couple résistant T_r pendant le démarrage.

Les rapports $\frac{T}{T_l} = \left(\frac{U_n}{U_l}\right)^2 = \left(\frac{I}{I_l}\right)^2$ sont toujours vérifiés.

1.3. Ralentissement-freinage

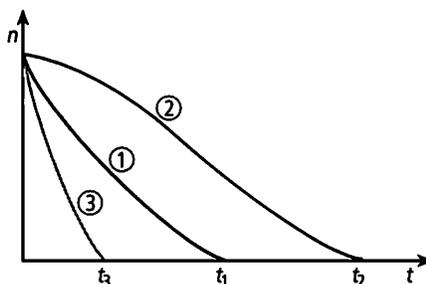
Plusieurs modes d'arrêts sont généralement utilisables sur ces démarreurs.

- **Arrêt libre** : le démarreur n'agit pas sur le moteur. Celui-ci est hors tension et s'arrête naturellement en un temps t_1 .

- **Arrêt contrôlé** : le démarreur réduit progressivement la tension de U_n à 0 selon une rampe. La durée de la rampe t_2 doit être supérieure au temps t_1 car dans ce mode, il n'y a pas de freinage de la machine.

- **Freinage par injection de courant continu** : le démarreur injecte un courant continu redressé à l'aide des thyristors durant un temps t_3 . Le courant continu est de l'ordre de $3 \cdot I_n$ et permet d'obtenir un ralentissement brutal. Le temps t_3 est inférieur au temps t_1 .

Évolution de la vitesse selon les 3 modes d'arrêts.



- ① arrêt libre
- ② arrêt contrôlé
- ③ freinage par injection de courant continu.

1.4. Application

Une machine asynchrone ayant pour caractéristiques :

$$P_n = 15 \text{ kW} ; I_n = 28,6 \text{ A} ; n_n = 1\,455 \text{ tr/min} ;$$

$$I_d/I_n = 6,5 ; T_d/T_n = 2,7 ;$$

entraîne une charge dont le couple résistant constant vaut $T_r = 80 \text{ Nm}$. Le démarrage se fait en limitation de courant.

Calculer le courant minimal de limitation I_l pour que la machine démarre.

Solution :

On s'intéresse aux points des caractéristiques de couple et de courant à vitesse nulle ($n = 0$ au démarrage).

Calcul de T_d et I_d :

$$T_n = \frac{P_n}{\Omega_n} = \frac{P_n}{\pi n_n} = \frac{30 P_n}{\pi n_n} = \frac{30 \times 15\,000}{\pi \times 1\,455} = 98,4 \text{ Nm}$$

$$T_d = 2,7 T_n \Rightarrow T_d = 2,7 \times 98,4 = 265,8 \text{ Nm}$$

$$I_d = 6,5 I_n \Rightarrow I_d = 6,5 \times 28,6 = 186 \text{ A}$$

Pour que la machine démarre, il faut que le couple limité T_l soit supérieur au couple résistant T_r .

Soit : $T_l > T_r$.

Prenons le cas limite $T_l = T_r$ et cherchons le courant I_l correspondant.

$$\frac{T_d}{T_l} = \left(\frac{I_d}{I_l}\right)^2 = \frac{I_d^2}{I_l^2} \Rightarrow T_d I_l^2 = T_l I_d^2 \Rightarrow I_l^2 = I_d^2 \frac{T_l}{T_d}$$

$$I_l = I_d \cdot \sqrt{\frac{T_l}{T_d}}$$

Dans le cas limite : $I_l = I_d \sqrt{\frac{T_r}{T_d}}$

$$I_l = 186 \sqrt{\frac{80}{265,8}} = 102 \text{ A.}$$

Le rapport I_l/I_n vaut $\frac{I_l}{I_n} = \frac{102}{28,6} = 3,56$.

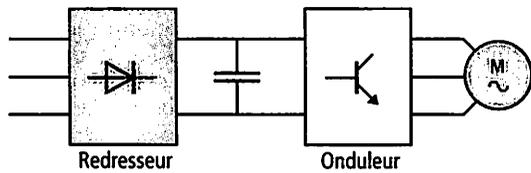
Il faut raisonnablement fixer ce rapport à 4 pour avoir une marge de sécurité.

Le courant de démarrage sera réduit de $6,5 I_n$ à $4 I_n$.

Ceci n'est pas très important, mais il n'est pas possible de faire mieux avec ce type de démarreur lorsque le couple résistant T_r est important au démarrage.



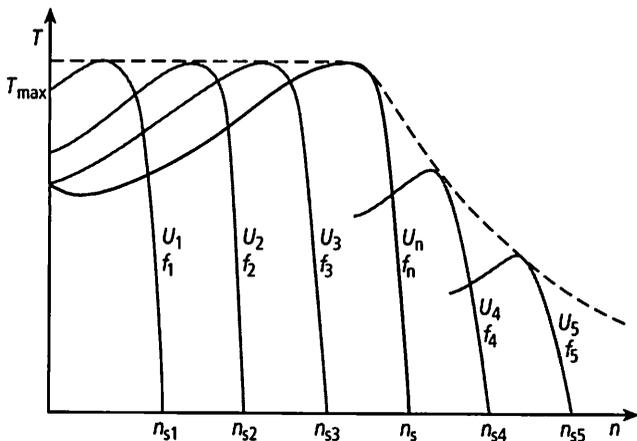
2. Variateur à U/f constant



Le redresseur permet d'obtenir une tension continue constante. L'onduleur crée par modulation de largeur d'impulsion (MLI) une tension alternative dont on peut contrôler la tension efficace et la fréquence.

Le fait de conserver le rapport U/f constant permet de maintenir un flux constant dans la machine et donc de conserver la caractéristique de couple. L'évolution de f change la fréquence de synchronisme.

2.1. Caractéristique de couple à U/f constant



La caractéristique sous tension nominale U_n et fréquence nominale f_n passe par n_s .

$$n_s = \frac{f_n}{p} \quad f_n = 50 \text{ Hz}$$

$$n_{s1} = \frac{f_1}{p}; n_{s2} = \frac{f_2}{p}; n_{s3} = \frac{f_3}{p};$$

$$\text{et } \frac{U_1}{f_1} = \frac{U_2}{f_2} = \frac{U_3}{f_3} = \frac{U_n}{f_n}$$

Pour des tensions et fréquences inférieures aux valeurs nominales, la forme de la caractéristique de couple est inchangée. Le couple maximal T_{max} est disponible même en petite vitesse.

• Fonctionnement en défluxage :

La tension moteur est limitée à sa valeur nominale principalement à cause de l'isolation des enroulements. Par contre, il est possible d'augmenter la fréquence au-delà de 50 Hz. Le rapport U/f n'est plus constant (courbes 4 et 5).

$$T_{max} = k \left(\frac{U}{f} \right)^2$$

Le couple maximum décroît avec le carré du rapport U/f .

2.2. Ralentissement-freinage

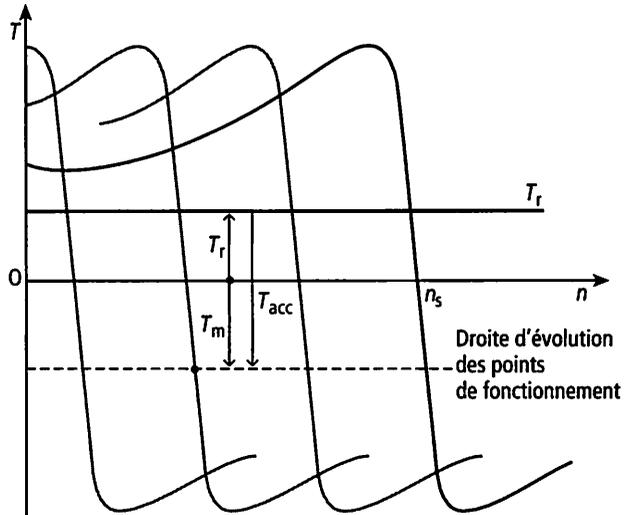
• **Arrêt libre** : coupure de l'alimentation du moteur asynchrone par blocage de l'onduleur.

• **Arrêt contrôlé** : décélération selon une rampe de tension donc de fréquence.

• **Freinage par injection de courant continu** : l'onduleur alimente la machine asynchrone sous une tension continue.

Le ralentissement est brutal.

• Freinage en hypersynchrone



La machine asynchrone possède une symétrie de ses caractéristiques.

Si la vitesse de rotation de l'arbre est supérieure à la vitesse de synchronisme, la machine fonctionne en hypersynchrone (génératrice asynchrone).

La vitesse de synchronisme décroît linéairement selon une rampe programmable. Le point de fonctionnement se situe dans le quadrant inférieur, et le couple accélérateur devient très négatif.

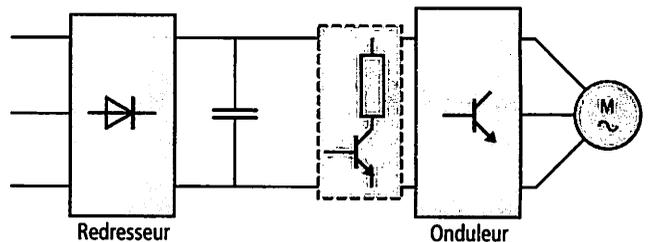
$$T_m = T_r + T_{acc}$$

$$T_{acc} = J \frac{d\Omega}{dt} = T_m - T_r$$

Le freinage est efficace et entraîne peu de surintensité.

L'onduleur est totalement réversible, l'énergie de freinage est renvoyée dans le condensateur de filtrage.

Par contre, le redresseur réalisé à partir d'un pont de diodes n'est pas réversible et si l'énergie de freinage est importante, la tension aux bornes du condensateur peut augmenter dangereusement. Il faut prévoir un module de freinage.



Le transistor T permet de décharger le condensateur C lorsque la tension dépasse un certain seuil. La résistance R doit être calculée pour pouvoir dissiper toute l'énergie de freinage.

$$R = \frac{U_{max}^2}{P_{max \text{ de freinage}}}$$

Puissance nominale de la résistance :

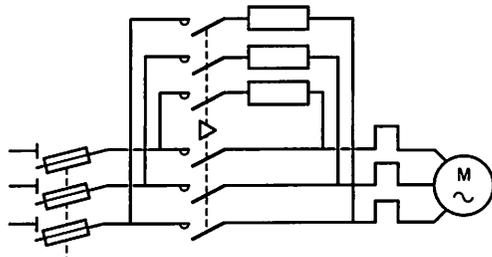
$$P = \frac{\text{Temps de freinage}}{\text{Temps de cycle}} \cdot P_{max \text{ de freinage}}$$

Lorsque la charge est entraînant, ou lorsqu'on veut ralentir rapidement, on est amené à freiner le moteur. Plusieurs solutions sont possibles, chacune sollicitant plus ou moins le moteur.

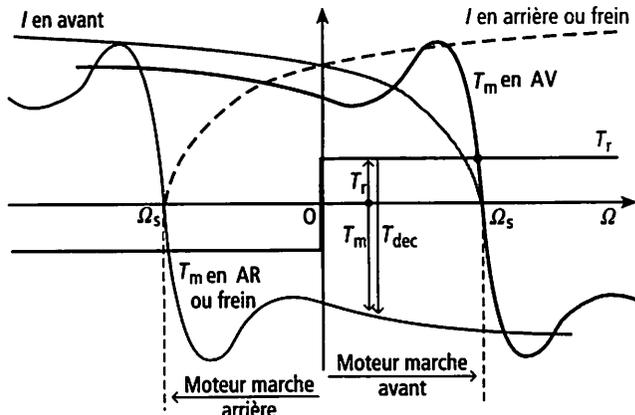
1. Freinage à contre-courant

1.1. Schéma

Le principe consiste à inverser deux phases pendant un court instant. Le courant appelé est très important (de l'ordre de 10 à 12 I_n). Le moteur est très fortement sollicité, on peut prévoir des résistances en série avec le stator pendant la phase de freinage pour diminuer le courant.



1.2. Caractéristiques de la machine pendant le freinage



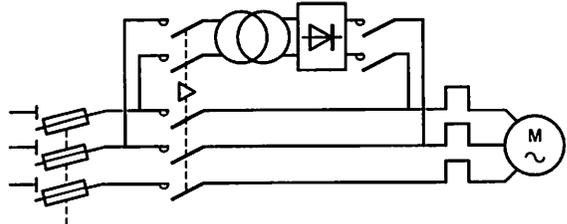
On remarque que le couple décélérateur T_{dec} reste négatif même lorsque $n = 0$. Il faut donc prévoir de couper l'alimentation lorsque la vitesse est nulle soit par une temporisation, soit par un contact centrifuge sinon le moteur part en marche arrière.

Dans ce mode, toute l'énergie de freinage est dissipée en effet joules dans le rotor, ce qui provoque un échauffement important du moteur.

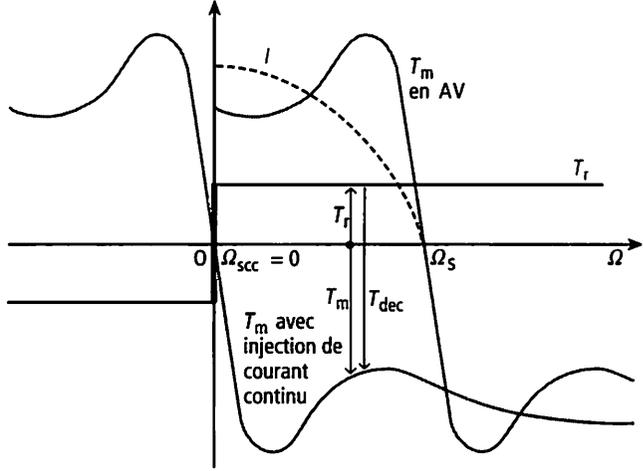
2. Freinage par injection de courant continu

2.1. Schéma

L'alimentation en courant continu du stator crée un champ fixe dans la machine. Les barres du rotor tournent dans ce champ et sont donc le siège de courants qui s'opposent à leur mouvement (loi de Lenz).



2.2. Caractéristiques de la machine pendant le freinage

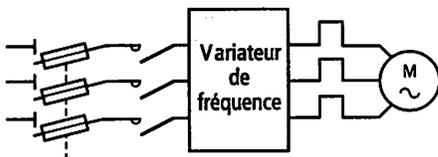


L'alimentation en courant continu déplace la vitesse de synchronisme à $n_s = 0$ car le champ est fixe. On remarque que le couple décélérateur décroît progressivement pour être nul à $n = 0$. L'arrêt se fait naturellement, il faut couper l'injection de courant continu pour éviter l'échauffement du stator.

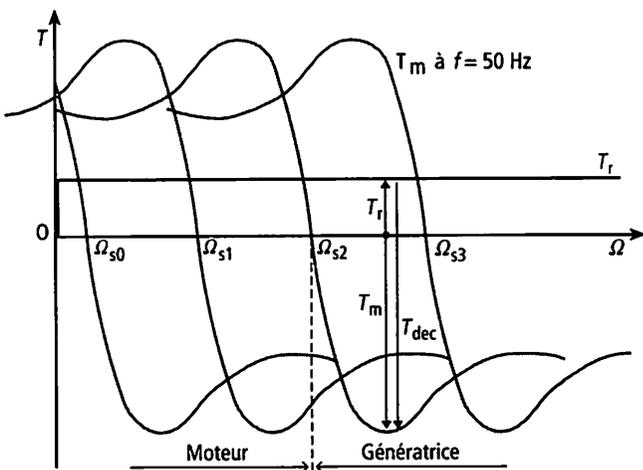
3. Freinage hypersynchrone

3.1. Schéma

Ce mode de freinage exploite le fonctionnement en génératrice asynchrone de la machine. Il est employé dans les variateurs de fréquence car la machine doit être en hypersynchrisme (vitesse du rotor supérieure à la vitesse du champ tournant pour freiner).



3.2. Caractéristique de la machine pendant le freinage

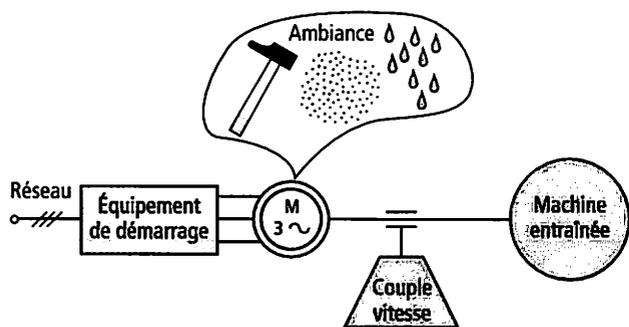


Le variateur diminue progressivement la vitesse de synchronisme, le couple décélérateur est négatif et la machine fonctionne en génératrice asynchrone. Le variateur doit être capable d'absorber l'énergie de freinage renvoyée soit dans un condensateur soit dans une résistance de dissipation. Ce mode permet d'avoir un freinage contrôlé sans surintensité donc sans échauffement supplémentaire.





Couple résistant et inertie, réseau, ambiance, constituent les facteurs principaux pour le choix d'un moteur et de son mode de démarrage.



1. Réseau d'alimentation

1.1. Appel de courant admissible

En basse tension le choix d'un moteur et de son mode de démarrage dépendent souvent de la puissance installée du réseau d'alimentation qui définit l'appel du courant admissible.

La norme NF C 15.100 précise au paragraphe 522-2 :

- 1^{re} règle : Les caractéristiques nominales d'un moteur doivent être en rapport avec l'usage qui en sera fait.
- 2^e règle : Limitation des troubles dus au démarrage. Cas des moteurs alimentés directement sur un réseau de distribution public.

1.2. Chute de tension

La tension d'un réseau peut varier dans certaines limites. On admet, d'après la norme C 15.100 $\pm 5\%$ et dans le cas de réseau alimenté par transformateur jusqu'à $\pm 10\%$.

Le couple d'un moteur est proportionnel au carré de la tension, et le courant à la tension. Lorsque cette dernière varie de $\pm 5\%$ ou de $\pm 10\%$, on obtient les valeurs suivantes :

U nominal	0,90 U _n	0,95 U _n	1	1,05 U _n	1,10 U _n
Couple (T _n)	0,81	0,88	1	1,12	1,21
Glissement (g)	1,24	1,13	1	0,90	0,83
Courant (I _n)	1,1	1,05	1	0,95	0,90
Démarrage (I _d)	0,90	0,95	1	1,05	1,1

1.3. Fréquence

La vitesse de rotation d'un moteur asynchrone est directement proportionnelle à la fréquence d'alimentation et inversement proportionnelle au nombre de pôles.

$$n = \frac{f}{p}$$

n : vitesse de synchronisme en tr/s
f : fréquence en cycles par seconde (Hz)
p : nombre de paires de pôles

On peut, sans échauffement exagéré, faire fonctionner un moteur de 50 Hz en 60 Hz, et inversement. Par contre, les vitesses seront différentes.

Nombre de pôles	2	4	6	8	10	12	16
n à 50 Hz	3 000	1 500	1 000	750	600	500	375
n à 60 Hz	3 600	1 800	1 200	900	720	600	450

1.4. Puissance

Le moteur asynchrone qui convient le mieux à une application est toujours celui qui fonctionne près de la puissance nominale car c'est à ce moment que son facteur de puissance (cos φ) et son rendement sont les meilleurs.

2. La machine entraînée

Selon la nature de l'organe entraîné, un certain nombre de grandeurs mécaniques doivent être connues.

2.1. Puissance et couple

La puissance, le couple et la vitesse sont liés par la relation fondamentale :

$$P = T \Omega$$

P : puissance en watts (W)
T : couple en newtons-mètres (Nm)
Ω : vitesse angulaire en radians par seconde (rad/s)

2.2. Inertie au démarrage

Durant la période de démarrage, le moteur doit fournir :
- l'énergie nécessaire pour vaincre le couple résistant ;
- l'énergie cinétique pour la mise en mouvement des parties à l'arrêt (machine entraînée plus rotor du moteur).

2.3. Couples résistants

Le démarrage d'une machine par un moteur ne peut avoir lieu que si le couple moteur est à chaque instant supérieur au couple résistant.

L'étude des couples résistants et de l'inertie a été faite pages 124 et 125.

3. Choix d'un moteur et de son démarrage

Le choix d'un moteur asynchrone et celui de son démarrage sont intimement liés.

Le tableau de la page 129 donne, en fonction de la machine entraînée, le type de moteur asynchrone et le mode de démarrage qui conviennent le mieux dans les cas les plus courants.

3.1. Machine entraînée

a) Couple de démarrage (T_d)

Il est exprimé par rapport au couple nominal.

Exemple : T_d = 0,5 à 1 T_n.

b) Conditions de mise en route

Elles s'expriment surtout en fonction de l'inertie de la machine donnée par le J (kg · m²).

Exemples :

- J faible : masse faible à mettre en mouvement,
- J élevé : volant d'inertie.

Dans certains cas, on exprime le temps de démarrage t < 10 s.

c) Ordre de grandeur de la puissance

Petite : 5,5 kW environ
Moyenne : 5,5 à 100 kW
Grande : 100 kW environ.

3.2. Moteur asynchrone

a) Types de rotor

- À cage : c'est un rotor en court-circuit surtout utilisé pour les petites et moyennes puissances ;
- À cage profonde ou à double cage : ce type de rotor est fabriqué spécialement pour les applications concernant le levage ;
- À bagues : c'est un rotor bobiné qui est toujours utilisé en démarrage rotorique.

b) Démarrages

- Démarrages possibles pour le démarrage rotorique :
- (0) Démarrage normal, couple résistant croissant et inertie faible ;
 - (1) Démarrage à couple résistant croissant et inertie moyenne ;
 - (2) Démarrage à couple résistant faible et inertie importante ;
 - (3) Démarrage à couple résistant constant et inertie importante.

Machine entraînée				Moteur asynchrone						
Type	Couple de démarrage nécessaire	Conditions de mise en route J (kg · m ²)	Ordre de grandeur de la puissance*	Type de rotor	Démarrage					
					Direct	Étoile-triangle	Résistances statoriques	Électronique	** Rotorique	Étude spéciale
Machines-outils Tours Fraiseuses Machines à bois	$T_d = 0,5 T_n$	J faible	petite moyenne moyenne	cage cage bagues	x x	x x	x	x x	0	
		J important	petite moyenne	cage bagues				x	3	x
Pompes centrifuges	$T_d = 0,5 \text{ à } 1 T_n$	J faible	petite moyenne moyenne grande grande	cage cage bagues cage bagues	x x x	x x	x x	x x	0 0	
		J important	moyenne grande	cage bagues				x	2	x
Ventilateurs Aspirateurs Turbines	$T_d = T_n$	J faible temps < 10 s	petite moyenne moyenne grande	cage cage bagues bagues	x x			x x	0 0	
		J important temps > 10 s	petite moyenne grande	cage bagues bagues				x	2 2	x
Compresseurs à piston	$T_d = 1,5 T_n$	J faible sans décompression	petite-moyenne grande moyenne-grande	cage cage bagues	x x			x x	1	
	$T_d = 0,5 \text{ à } 0,8 T_n$	J important avec décompres.	petite-moyenne grande	cage bagues				x	2	x
Compresseurs rotatifs	$T_d = 1,5 T_n$		petite-moyenne moyenne-grande	cage bagues	x			x	1	
Transporteurs à bandes Élévateurs à godets	$T_d = 1 \text{ à } 1,5 T_n$	Démarrage à vide	petite moyenne moyenne	cage cage bagues	x x		x	x x	1	
	$T_d = 1 \text{ à } 2 T_n$	Démarrage en charge	petite et moyenne moyenne	cage bagues	x			x	2	
Broyeurs Concasseurs	$T_d = 1 \text{ à } 1,8 T_n$	J faible	petite et moyenne moyenne et grande grande	cage cage bagues	x x		x	x x	1	
		J important temps > 10 s	petite et moyenne moyenne et grande	cage bagues				x	3	x
Essoreuses centrifuges	$T_d = 0,5 \text{ à } 1,5 T_n$	J important	petite et moyenne moyenne et grande	cage bagues				x	2	x
Matériel de levage	$T_d = 2 \text{ à } 2,5 T_n$	Couple résistant important	petite et moyenne moyenne et grande	cage profonde bagues				x	x	x
Alternateurs pour convertisseur de fréquence	$T_d = 0,5 \text{ à } 1 T_n$	Sans volant	petite moyenne-grande moyenne-grande	cage cage bagues	x x	x x	x	x x	0	
		Avec volant	petite moyenne et grande moyenne et grande	cage cage bagues				x x	2	x x
Téléphériques Télesièges Téléskis	$T_d = 1 \text{ à } 1,2 T_n$		moyenne et grande moyenne et grande	cage bagues				x	3	x

(D'après Leroy-Somer).

* Petite puissance < 5,5 kW.
Moyenne puissance 5,5 à 100 kW.
Grande puissance > 100 kW.

** Démarrages rotoriques :
(0) démarrage normal ;
(1) démarrage à couple résistant croissant et inertie moyenne ;
(2) démarrage à couple résistant faible et inertie importante ;
(3) démarrage à couple résistant constant et inertie importante.



IP 55 – IK08
classe F – Δ T 80 k
Multitension

Caractéristiques des moteurs de 0,1 à 160 kW.
Moteurs asynchrones triphasés à cage – 4 pôles – 1 500 min⁻¹
Réseau Δ 230/Y 400 V ou Δ 400 V-50 Hz

Type	Puissance nominale à 50 Hz	Vitesse nominale	Intensité nominale	* Facteur de puissance	* Rendement	Courant démarrage/ Courant nominal	Couple démarrage/ Couple nominal	Couple maximal/ Couple nominal	** Courbe de couple	Moment d'inertie	Masse
	P_N kW	N_N min ⁻¹	I_N (400 V) A	cos φ	η	I_d/I_N	M_d/M_N	M_{max}/M_N	N°	J kg·m ²	IM B3 kg
LS 56 L	0,09	1 370	0,36	0,7	55	2,9	2	2,2	2	0,00025	4
LS 63 E	0,12	1 375	0,44	0,77	56	3	2,2	2,2	2	0,00035	4,8
LS 63 E	0,18	1 410	0,62	0,75	63	3,7	2,3	2,3	2	0,000475	5
LS 71 L	0,25	1 435	0,7	0,74	70	4,6	2,3	2,7	2	0,000675	6,4
LS 71 L	0,37	1 425	1,12	0,7	70	4,4	2,3	2,6	2	0,00085	7,3
LS 71 L	0,55	1 390	1,65	0,75	66	3,7	1,9	2,2	2	0,0011	8,3
LS 80 L	0,55	1 400	1,6	0,74	68	4,4	2,1	2,2	3	0,0013	9
LS 80 L	0,75	1 400	2	0,77	69	4,5	2,4	2,5	3	0,0018	10,5
LS 80 L	0,9	1 425	2,3	0,73	73	5,7	2,6	3,8	2	0,0024	11,5
LS 80 S	1,1	1 415	2,7	0,79	75	5,2	2,1	2,6	3	0,0032	14
LS 90 L	1,5	1 420	3,5	0,79	78	5,9	2,8	3	2	0,0039	15
LS 90 L	1,8	1 410	4,1	0,82	79	5,7	2,5	2,6	2	0,0049	17
LS 100 L	2,2	1 430	5,1	0,81	75	5,3	1,9	2,4	3	0,0039	19,5
LS 100 L	3	1 420	7,2	0,78	77	5,1	2,3	2,5	3	0,0051	22
LS 112 M	4	1 425	9,1	0,79	80	5,7	2,4	2,6	2	0,0071	26
LS 132 S	5,5	1 430	11,9	0,82	82	6,3	2,4	2,5	3	0,0177	39
LS 132 M	7,5	1 450	15,2	0,84	84	7,7	2,7	3,1	2	0,0334	56
LS 132 M	9	1 450	18,4	0,83	85	7,8	3	3,4	1	0,0385	62
LS 160 M	11	1 450	21,3	0,85	87,8	5,6	2,1	2,5	8	0,054	80
LS 160 L	15	1 455	28,6	0,85	89,1	6,5	2,7	2,8	8	0,073	97
LS 180 MT	18,5	1 455	35,1	0,85	89,6	6,7	2,8	2,9	8	0,089	113
LS 180 L	22	1 460	41,7	0,85	89,7	6,3	2,6	2,7	8	0,122	135
LS 200 LT	30	1 460	55	0,87	90,5	6,6	2,7	2,6	8	0,151	170
LS 225 ST	37	1 475	67	0,86	92,7	6,8	2,4	2,6	8	0,23	205
LS 225 MR	45	1 470	81	0,86	92,8	6,5	2,8	2,6	8	0,28	235
LS 250 MP	55	1 480	99	0,85	94,1	6,7	2,6	2,5	8	0,75	340
LS 280 SP	75	1 480	135	0,85	94,1	6,9	2,6	2,7	8	1,28	445
LS 280 MP	90	1 480	162	0,85	94,6	7,6	2,9	2,9	8	1,45	490
LS 315 ST	110	1 490	193	0,86	95,5	7,8	2,9	2,8	8	2,74	720
LS 315 MR	132	1 485	234	0,85	95,6	7,3	2,8	2,5	8	2,95	785
LS 315 MR	160	1 485	276	0,87	96,1	8,4	3,0	3,3	8	3,37	855

d'après Leroy-Somer.

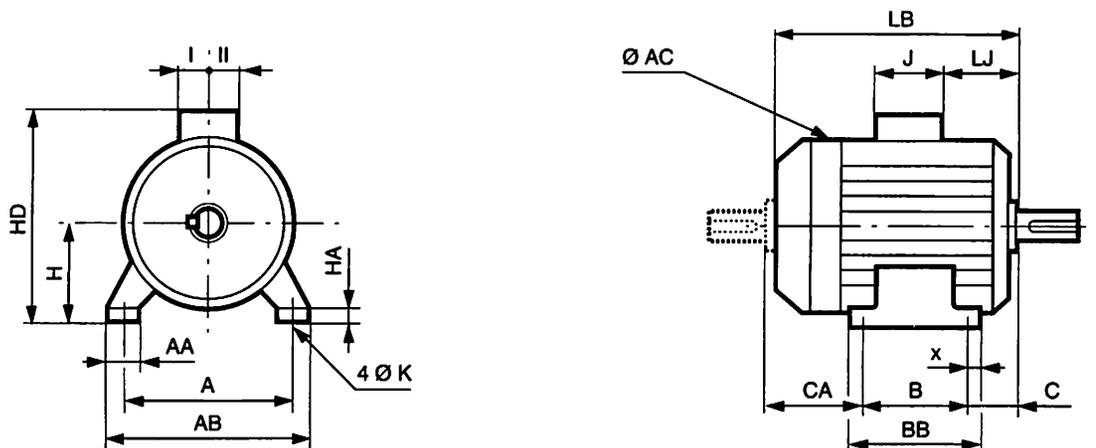
* Le facteur de puissance et le rendement évoluent en fonction de la charge du moteur.
Les valeurs indiquées correspondent à la pleine charge.

** Courbes de couple : selon les repères de 1 à 8, le tableau ci-dessous donne les valeurs de k.

$k = \frac{T_d}{T_n}$ (avec T_d : couple de démarrage et T_n : couple nominal).

Courbe couple	1	2	3	4	5	6	7	8
Valeur de k	2,4 à 3,1	2,1 à 2,4	1,8 à 2,1	1,6 à 1,8	1,25 à 1,65	2 à 2,3	1,6 à 1,8	1,6 à 2,6

Moteurs asynchrones
Dimensions principales des moteurs de 0,1 à 160 kW, avec pattes de fixation.



Types	Dimensions principales (en mm)																	
	A	AB	B	BB	C	X	AA	K	HA	H	AC	HD	LB	LJ	J	I	II	CA
LS 56 L	90	104	71	89	36	9.5	24	6	7	56	110	141	156	10	78	39	39	52
LS 63 E	100	115	80	96	40	7.5	24.5	7	8	63	124	154	172	21	78	39	39	55
LS 71 L	112	126	0	104	45	7.5	23	7	9	71	140	173	183	21	78	39	39	51
LS 80 L	125	157	100	120	50	10	29	9	10	80	170	203	215	26	86	43	43	68
LS 80 LU	125	157	100	120	50	10	29	9	10	80	170	203	267	26	86	43	43	120
LS 90 S	140	172	100	120	56	10	37	10	11	90	190	223	218	26	86	43	43	66
LS 90 L	140	172	125	162	56	28	37	10	11	90	190	223	245	26	86	43	43	68
LS 90 LU	140	172	125	162	56	28	37	10	11	90	190	223	265	26	86	43	43	88
LS 100 L	160	196	140	165	63	12	40	12	13	100	200	238	290	26	86	43	43	93
LS 112 M	190	220	140	165	70	12	45	12	14	112	200	250	290	26	86	43	43	86
LS 112 MG	190	220	140	165	70	12	52	12	14	112	235	260	315	36	86	43	43	110
LS 112 MU	190	220	140	165	70	12	52	12	14	112	235	260	334	36	86	43	43	130
LS 132 S	216	250	140	170	89	16	50	12	15	132	235	280	350	53	86	43	43	128
LS 132 SM/M	216	250	178	208	89	16	59	12	18	132	280	307	387	25	110	57	73	126
LS 132 MU	216	250	140	208	89	16	59	12	18	132	280	307	410	25	110	57	73	148
LS 160 MP	254	294	210	294	108	20	64	14.5	25	160	264	368	468	44	134	92	63	154
LS 160 M	254	294	210	294	108	20	60	14.5	25	160	310	395	495	44	134	92	63	182
LS160 LR	254	294	254	294	108	20	64	14.5	25	160	264	368	495	44	134	92	63	138
LS 160 L	254	294	254	294	108	20	60	14.5	25	160	310	395	495	44	134	92	63	138
LS 160 LU	254	294	254	294	108	20	60	14.5	25	160	310	395	510	44	134	92	63	153
LS 180 MT	279	324	241	316	121	20	79	14.5	28	180	310	428	495	45	205	100	95	138
LS 180 LR	279	324	279	316	121	20	79	14.5	28	180	310	428	520	45	205	100	95	125
LS 180 L	279	339	279	329	121	25	86	14.5	25	180	350	435	552	54	205	100	95	159
LS 180 LU	279	339	279	329	121	25	86	14.5	25	180	350	435	593	54	205	100	95	199
LS 200 LT	318	378	305	365	133	30	108	18.5	32	200	350	455	599	60	205	100	95	167
LS 200 L	318	388	305	375	133	35	103	18.5	36	200	390	475	621	68	205	100	95	194
LS 200 LU	318	388	305	375	133	35	103	18.5	36	200	390	475	669	68	205	100	95	244
LS 225 ST	356	431	286	386	149	50	127	18.5	36	225	390	500	628	74	205	100	95	203
LS 225 SR	356	431	266	386	149	50	127	18.5	36	225	390	500	676	74	205	100	95	253
LS 225 MR	356	431	311	386	149	50	127	18.5	36	225	390	500	676	74	205	100	95	228
LS 225 MK	356	424	311	371	149	30	80	18.5	35	225	468	617	704	113	292	148	180	254
LS 250 MZ	406	470	349	449	168	70	150	24	47	250	390	550	676	68	217	103	145	172
LS 250 MP	406	470	349	400	168	26	94	24	40	250	468	642	749	158	292	148	180	242
LS 250 MK	406	480	349	417	168	34	75	24	35	250	510	668	785	64	292	148	180	278
LS 280 SP	457	520	368	480	190	77	95	24	39	280	510	698	785	64	292	148	180	237
LS 280 SK	457	533	368	495	190	40	85	24	35	280	586	745	921	99	292	148	180	379
LS 280 MP	457	520	419	480	190	26	95	24	39	280	510	698	836	115	292	148	180	237
LS 280 MK	457	533	419	495	190	40	85	24	35	280	586	745	921	99	292	148	180	328
LS 315 SP	508	594	406	537	216	40	114	28	70	315	586	780	947	125	292	148	180	341
LS 315 MP	508	594	457	537	216	40	114	28	70	315	586	780	947	125	292	148	180	290
LS 315 MR	508	594	457	537	216	40	114	28	70	315	586	780	1 017	125	292	148	180	360

(extrait du catalogue Leroy-Somer)



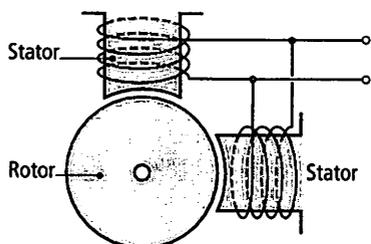
5 - Conversion de l'énergie

1. Moteur monophasé

Machines à laver, réfrigérateurs, aspirateurs, moulins à café, séchoirs, tous ces appareils nécessitent l'emploi de moteurs de puissance inférieure à 1 kW (moteurs fractionnaires). Étant donné que la plupart des installations particulières existent en monophasé, on constate un développement important des moteurs de petite puissance alimentés en monophasé. Ce sont des moteurs asynchrones monophasés (induction) ou des moteurs universels (moteurs à collecteur).

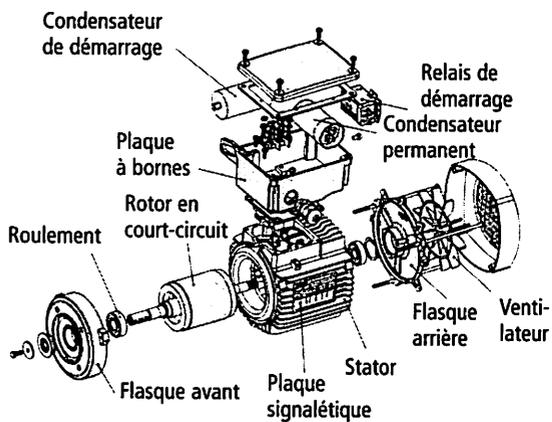
1.1. Principe

Un champ alternatif monophasé peut être considéré comme la somme de deux champs tournants symétriques. Si l'on place un disque en face de bobines parcourues par un courant alternatif monophasé, il reste immobile, étant sollicité par les deux champs tournants. Le couple moteur au repos est nul.



Si on lance le disque dans un sens, il continue à tourner ; le champ qui tourne dans le même sens que le disque exerce alors un couple supérieur à l'autre ; il y a production d'un couple-moteur.

1.2. Constitution

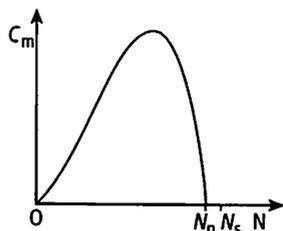


Moteur monophasé en vue éclatée (Leroy Somer).

1.3. Caractéristiques

a) Le couple de démarrage est nul

Il est nécessaire d'utiliser des artifices de démarrage tels que l'enroulement auxiliaire, ou la spire de déphasage.



b) Tension d'alimentation

L'enroulement est réalisé en deux parties pouvant être couplées en série ou en parallèle pour une utilisation sous la tension U et la tension $2U$.

Exemple : couplage parallèle 115 V, série 230 V.

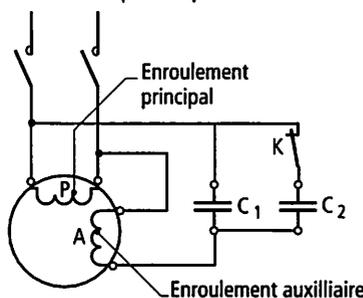
1.4. Démarrage

a) Par lancement

Après la mise sous tension du stator, on peut lancer le moteur à la main dans un sens ou dans l'autre. Le couple moteur résultant des deux couples inverses entretient la rotation dans le sens du lancement.

b) Par phase auxiliaire

L'enroulement monophasé utilise environ les 2/3 des encoches ; on bobine un enroulement auxiliaire de même nombre de pôles que l'enroulement principal.



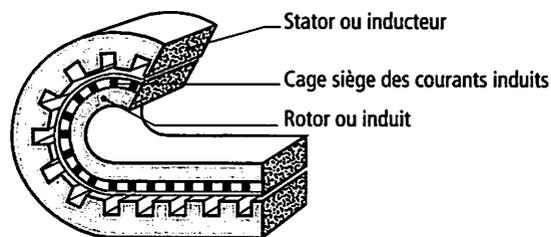
C_2 : condensateur qui permet d'améliorer le couple de démarrage, à la mise sous tension. Ce condensateur est mis hors circuit, lorsque le moteur est à sa vitesse nominale.

L'enroulement auxiliaire est alimenté par une tension déphasée de 90° électriques sur la tension de l'enroulement principal. Ce déphasage est obtenu à l'aide du condensateur C_1 .

2. Moteur linéaire

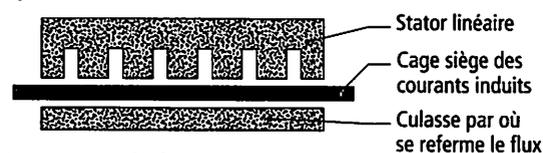
2.1. Principe

Si l'on développe le stator d'un moteur asynchrone, on obtient un moteur linéaire à induction.

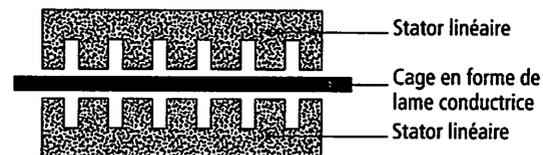


2.2. Différents types de moteurs linéaires

a) Moteur à un stator linéaire



b) Moteur à deux stators



Le deuxième stator permet d'augmenter les ampères-tours des deux inducteurs et de pouvoir disposer d'un entrefer plus important.

2.3. Utilisations

- Traction électrique.
- Vérins électriques à grand déplacement.
- Entraînement de bandes transporteuses.

Certains problèmes technologiques limitent considérablement le développement de ce type de moteur. Ce sont :

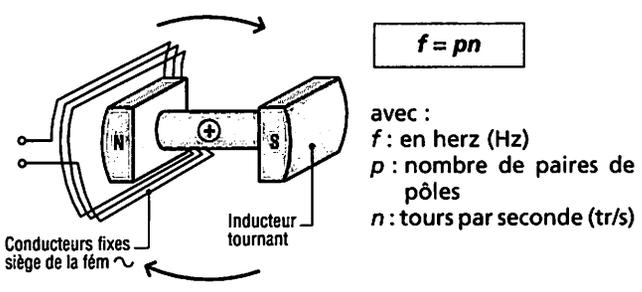
- l'effet d'extrémité du circuit magnétique stator,
- l'attraction magnétique entre stator et rotor ;
- l'alimentation mobile par contacts glissants du stator.

1. Alternateurs

Chaque fois que l'on veut transformer une énergie mécanique en énergie électrique, on utilise un alternateur.

1.1. Principe

Un aimant ou un électro-aimant, alimenté en courant continu, entraîné en rotation, produit un champ magnétique tournant. Chaque spire d'une bobine soumise à l'action de ce champ tournant est le siège d'une force électromotrice induite alternative dont la fréquence est :

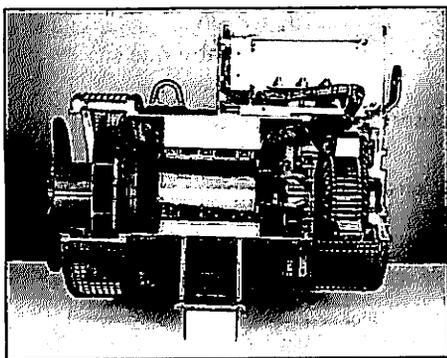


On réalise ainsi un alternateur ou générateur synchrone dont le rotor, c'est-à-dire l'électro-aimant entraîné en rotation, est l'inducteur. Le stator, c'est-à-dire l'ensemble des bobines montées dans le circuit magnétique, constitue l'induit.

1.2. Constitution

a) Stator

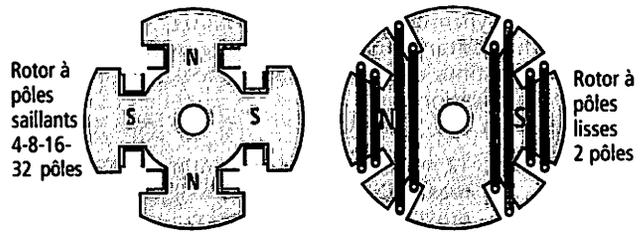
Il est identique au stator de moteur asynchrone. Le stator est le siège du courant induit par la variation de flux du rotor.



Alternateur avec excitatrice en bout d'arbre (Leroy Somer).

b) Rotor

C'est l'inducteur qui crée un champ radial tournant à la vitesse d'entraînement de l'alternateur appelée vitesse de synchronisme.



1.3. Caractéristiques

L'alternateur est caractérisé par sa puissance nominale, ainsi que par sa tension et sa fréquence, qui sont constantes.

a) Couplage sur le réseau

Pour coupler un alternateur sur le réseau, il faut un parfait synchronisme des tensions, c'est-à-dire que les tensions respectives du réseau et de l'alternateur doivent se superposer.

b) Réglage de la tension

Il s'effectue en réglant le courant d'excitation dans les inducteurs de l'alternateur.

c) Réglage de la fréquence

C'est en agissant sur la vitesse d'entraînement que l'on peut faire varier la fréquence du courant et la charge de l'alternateur (voir cours d'électrotechnique).

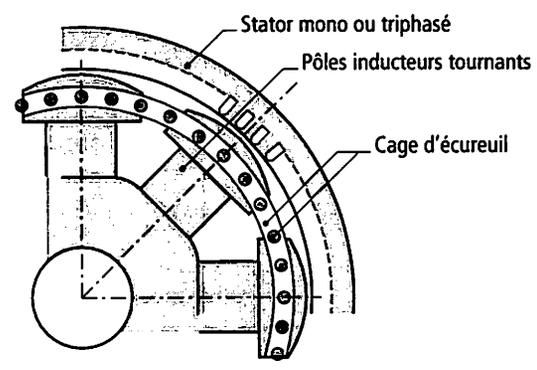
2. Moteur synchrone

2.1. Principe

C'est la réversibilité de l'alternateur. Lorsque le stator d'un alternateur est branché sur le réseau, il produit un champ tournant qui entraîne les pôles du rotor alimentés en courant continu, à la vitesse de synchronisme.

2.2. Constitution

Elle est identique à celle d'un alternateur. Certains moteurs ont leur rotor muni d'une cage qui permet de simplifier le démarrage.



2.3. Caractéristique

Ces moteurs sont caractérisés par une vitesse rigoureusement constante qui est celle du synchronisme.

À puissance constante, on fait varier le courant absorbé par le moteur par variation du courant d'excitation.

Ainsi, le moteur tournant à vide, si on le surexcite, fournit de la puissance réactive au réseau ; il fonctionne alors en compensateur synchrone.

2.4. Démarrage

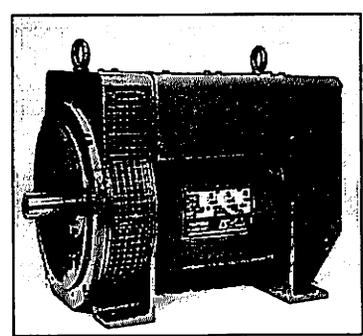
Le moteur synchrone ne possède pas de couple en dehors de sa vitesse de synchronisme. Il est nécessaire d'utiliser un artifice de démarrage pour l'amener à sa vitesse de synchronisme :

- démarrage par moteur auxiliaire ;
- démarrage en asynchrone ;
- démarrage par variateur de vitesse (moteur synchrone autopiloté).

2.5. Emplois

- En vitesse lente : compresseurs à pistons, ventilateurs, broyeurs, pompes à gros débit, laminoirs.

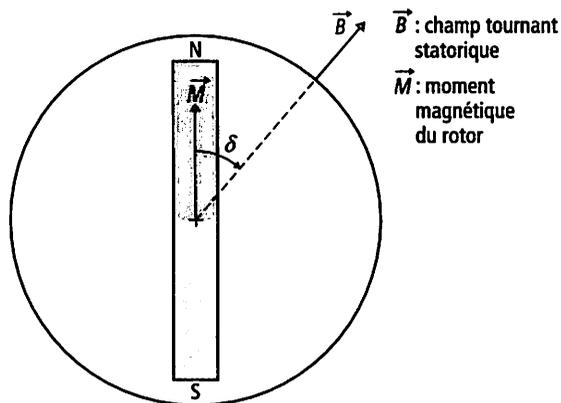
- En vitesse rapide : turbo-compresseurs, soufflantes, pompes, groupes convertisseurs.



Alternateur triphasé (Leroy Somer).



1. Couple du moteur synchrone



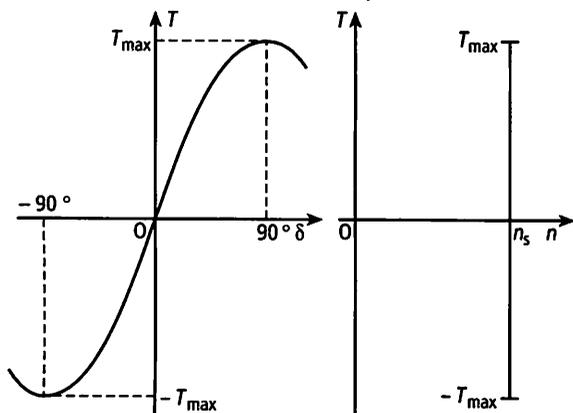
L'interaction du champ tournant et du moment magnétique crée un couple qui a tendance à ramener l'aimant du rotor dans l'axe du champ statorique.

$$T = M \cdot B \cdot \sin \delta$$

T : couple (Nm)
 M : moment magnétique ($A \cdot m^2$)
 B : induction magnétique (T)

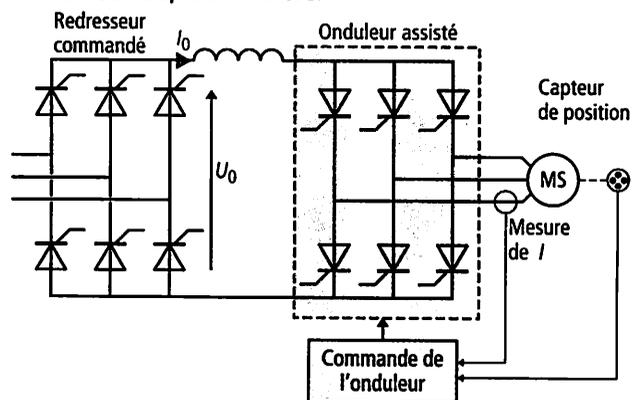
Pour que le couple persiste, il faut que les vecteurs \vec{B} et \vec{M} tournent à la même vitesse, sinon il y a décrochage.

Le couple maximum est obtenu lorsque $\delta = 90^\circ$.



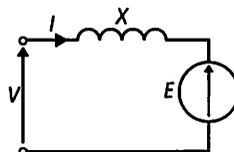
2. Autopilotage

Pour éviter tous décrochages, on asservit la position de \vec{B} par rapport à \vec{M} . La vitesse de rotation et la position de l'induction B est réglée par un onduleur assisté tandis que la position de \vec{M} est mesurée à l'aide d'un capteur de position. Ce principe est appelé autopilotage car si \vec{M} se rapproche de \vec{B} , le champ tournant accélère et si \vec{M} s'éloigne de \vec{B} le champ tournant ralentit. L'angle δ est conservé constant et c'est la machine elle-même qui fixe la vitesse du champ tournant en fonction du couple sur l'arbre.



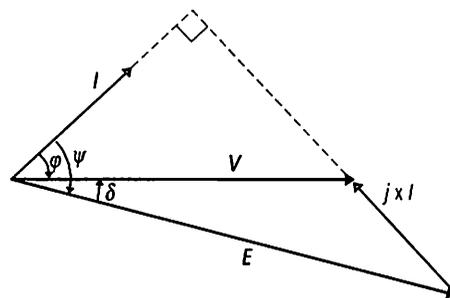
3. Équations de la machine synchrone autopilotée

Schéma équivalent d'une phase en négligeant la résistance statorique



$$V = E + j \cdot X \cdot I$$

X : réactance synchrone



• On démontre que le couple électromagnétique de la machine synchrone peut s'écrire :

$$T_e = k_1 \cdot \Phi_M \cdot I \cdot \cos \psi$$

Si ψ déduit de la position du rotor est constant alors :

$$T_e = k_2 \cdot \Phi_M \cdot I$$

De plus, la valeur efficace du courant I est directement proportionnelle au courant continu I_0

$$T_e = k \cdot \Phi_M \cdot I_0$$

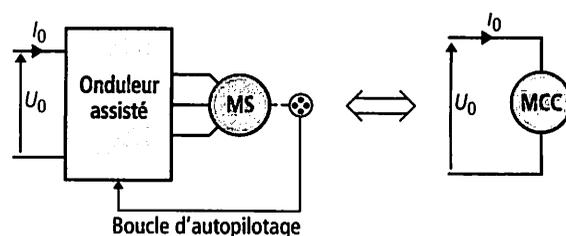
• De la même façon on démontre que :

$$U_0 = k \cdot \Phi_M \cdot \Omega \cdot \cos \psi$$

Si ψ est conservé constant grâce à l'autopilotage alors :

$$U_0 = k' \cdot \Phi_M \cdot \Omega$$

Ces 2 relations sont identiques à celles de la machine à courant continu.



La machine synchrone autopilotée a les mêmes caractéristiques qu'une machine à courant continu.

La machine synchrone étant plus robuste, moins encombrante et nécessitant moins de maintenance que la machine à courant continu, elle la remplace avantageusement dans certaines applications.

Exemples :

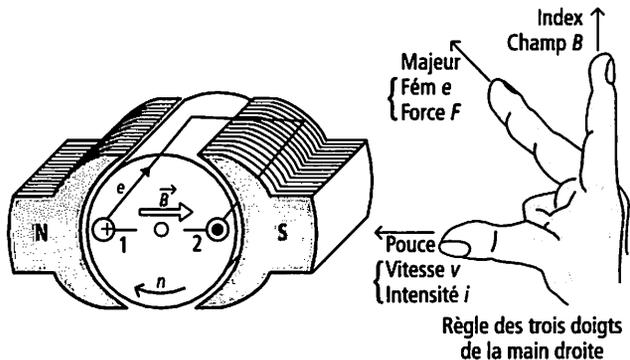
- TGV Sud-Est : 12 moteurs à courant continu de 535 kW
 masse d'un moteur : 1 560 kg
 puissance totale : 6 420 kW
 masse totale des moteurs : 18,7 tonnes
- TGV Atlantique : 8 moteurs synchrones autopilotés de 1 100 kW
 masse d'un moteur : 1 450 kg
 puissance totale : 8 800 kW
 masse totale des moteurs : 11,6 tonnes

Avec les moteurs synchrones autopilotés, on supprime en particulier les collecteurs à lame qui nécessitent beaucoup de maintenance.

Le moteur à courant continu apporte une très grande souplesse de fonctionnement, il est de plus en plus associé à des équipements électroniques qui permettent une variation et une régulation de vitesse précises.

1. Rappels d'électrotechnique

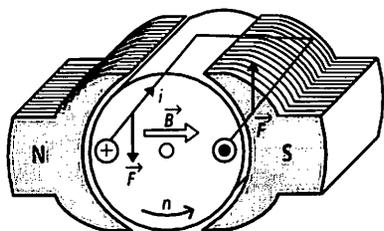
1.1. Création d'une force électromotrice



Si l'on considère le conducteur (1) placé sur l'induit qui tourne, ce conducteur coupe les lignes de champ ; il est alors le siège d'une force électromotrice (fém) dont le sens est donné par la règle des trois doigts de la main droite.

On a réalisé un générateur de courant.

1.2. Création d'un couple



Si l'on fait passer un courant dans la spire, en présence du flux inducteur, une force agit sur les conducteurs et fait tourner l'induit. On réalise ainsi un moteur. La machine à courant continu fonctionne aussi bien en générateur quand elle est entraînée qu'en moteur quand elle est alimentée en courant continu.

1.3. Équations de la machine à courant continu

• Force électromotrice

Elle s'exprime par la relation :

N : nombre de conducteurs
 n : vitesse de rotation en tr/s
 Φ : flux sous un pôle en webers
 E : force électromotrice en volts
 p : nombre de paires de pôles
 a : nombre de paires de voies d'enroulement.

$$E = \frac{p}{a} N n \Phi$$

$$n = \frac{\Omega}{2\pi} \Rightarrow E = \frac{p}{a} \frac{N}{2\pi} \Phi \Omega \quad \Omega : \text{vitesse angulaire en rad/s}$$

$$\text{en posant } K = \frac{p}{a} \cdot \frac{N}{2\pi} \Rightarrow E = K \Phi \Omega$$

• Couple électromagnétique

Il s'exprime par la relation :

$$T = \frac{p}{a} \frac{N}{2\pi} \Phi I \quad I : \text{courant dans l'induit en ampères}$$

$$\text{en posant } K = \frac{p}{a} \cdot \frac{N}{2\pi} \Rightarrow T = K \Phi I$$

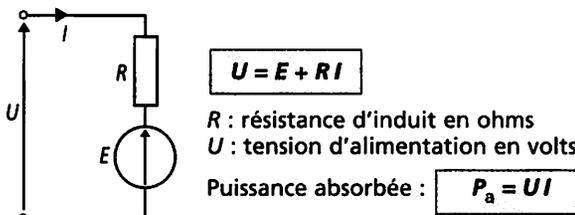
• Puissance électromagnétique

$$P = EI \quad P : \text{puissance électromagnétique en watts}$$

$$P = EI = K \Phi \Omega \times \frac{T}{K \Phi} = T \Omega \quad P = T \cdot \Omega$$

1.4. Schéma équivalent

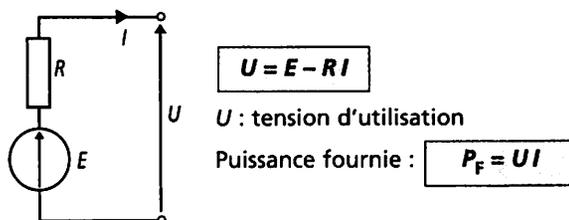
• Convention moteur



Si $P_a > 0$, la puissance va dans le sens électrique \rightarrow mécanique.

Si $P_a < 0$, la puissance va dans le sens mécanique \rightarrow électrique.

• Convention générateur

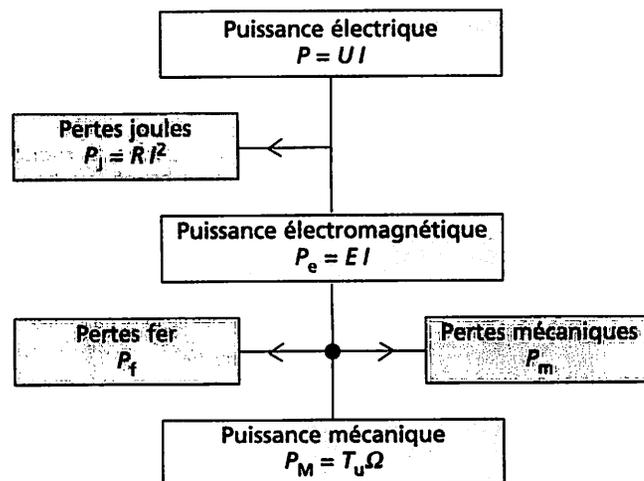


Si $P_f > 0$, la puissance va dans le sens mécanique \rightarrow électrique.

Si $P_f < 0$, la puissance va dans le sens électrique \rightarrow mécanique.

1.5. Rendement

Les pertes comprennent : les pertes joules, les pertes fer et les pertes mécaniques.



Le rendement est défini par le rapport de la puissance de sortie sur la puissance d'entrée.

$$\text{En moteur : } \eta = \frac{P_M}{P_a} = \frac{UI - P_j - P_f - P_m}{UI}$$

$$\text{En génératrice : } \eta = \frac{P_f}{P_M} = \frac{UI}{UI + P_j + P_f + P_m}$$

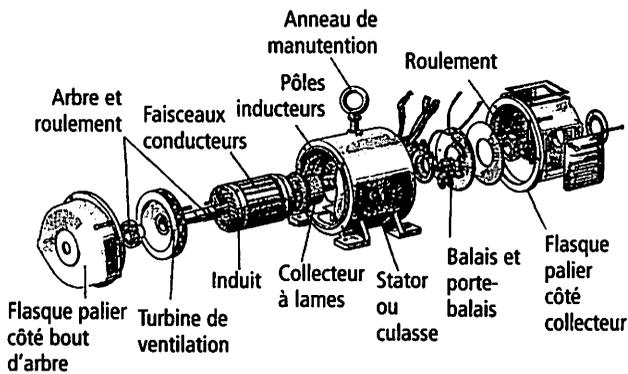
2. Constitution générale

La construction des machines à courant continu est parfaitement normalisée. Ainsi, la disposition et le dimensionnement sont semblables d'un constructeur à l'autre.

2.1. Organes magnétiques

Ils produisent le flux et le canalisent ; ce sont :

- les pôles inducteurs ;
- l'induit ;
- le stator ou culasse.



Éclaté de machine à courant continu (d'après Leroy Somer).

2.2. Organes électriques

Ils sont le siège de la fém et assurent la liaison avec le circuit extérieur ; ce sont :

- les faisceaux de conducteurs ;
- le collecteur ;
- les balais ;
- la plaque à bornes.

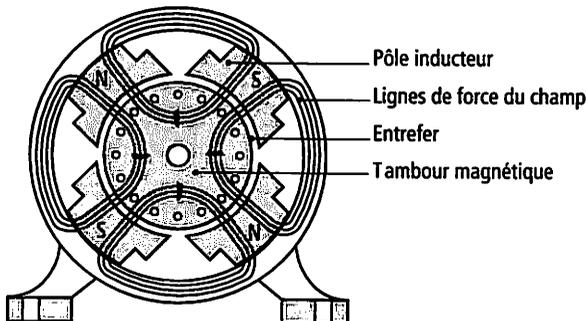
2.3. Organes mécaniques

Ils servent à fixer les organes magnétiques et électriques les uns par rapport aux autres et à assurer le guidage en rotation ; ce sont :

- le stator ou carcasse avec pattes de fixation ;
- l'arbre et les roulements ;
- la turbine de ventilation ;
- les flasques paliers côté arbre et côté collecteur ;
- l'anneau de manutention.

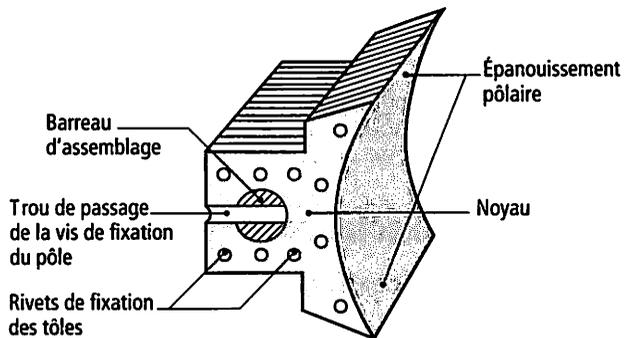
3. Circuit magnétique

Le circuit magnétique d'une machine tournante est producteur d'un flux fixe, ce flux étant canalisé par la culasse d'une part, et passant par l'entrefer et l'induit tournant.



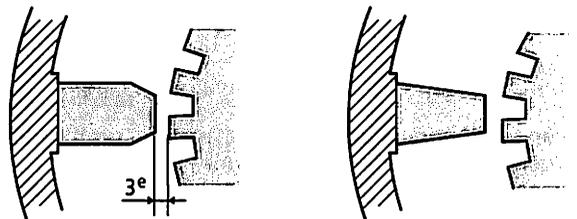
3.1. Pôles inducteurs

Le noyau du pôle peut être massif car il est parcouru par un flux constant mais le passage de la denture de l'induit provoque une pulsation de flux dans la partie des épanouissements polaires. Pour cette raison, on préfère réaliser le pôle en un assemblage de tôles magnétiques (acier à 3,5 % de silicium).



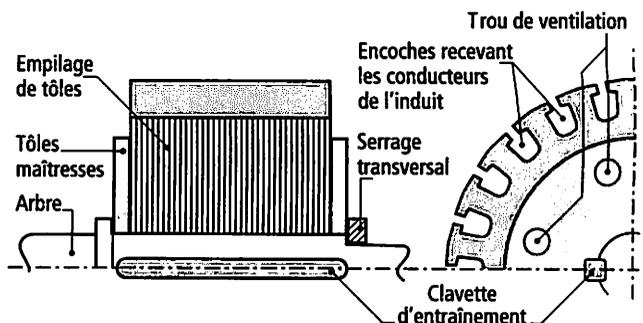
• Pôles auxiliaires ou de commutation :

Placés entre les pôles principaux, le flux qu'ils produisent facilite la commutation. Ils suppriment les étincelles aux balais, ces étincelles étant produites par le renversement du sens du courant dans les sections court-circuitées par les balais. Placés sur la ligne neutre, l'enroulement de ces pôles est en série avec l'induit.



3.2. Circuit magnétique tournant

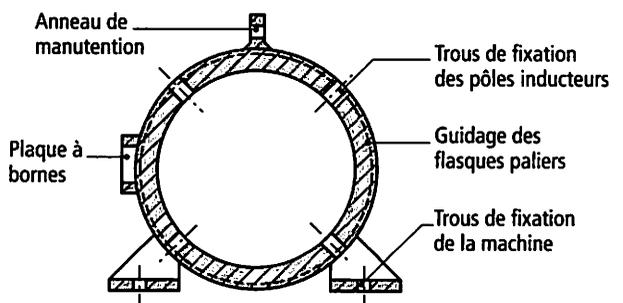
Le flux est variable à chaque tour d'où la nécessité de feuilletter le circuit magnétique pour diminuer les pertes par hystérésis et courants de Foucault (tôle à 3 % de silicium, épaisseur 0,35 mm).



3.3. La carcasse ou culasse

Elle assure simultanément deux fonctions :

- **Magnétique** : elle permet aux lignes de force du champ magnétique de se refermer, d'où une section minimale à respecter et l'emploi de matériaux tels que l'acier moulé ou l'acier forgé.
- **Mécanique** : c'est le bâti de la machine sur lequel viennent se fixer les pôles, les flasques, la plaque à bornes, etc.



La carcasse est réalisée en acier massif car elle est parcourue par un champ magnétique constant.

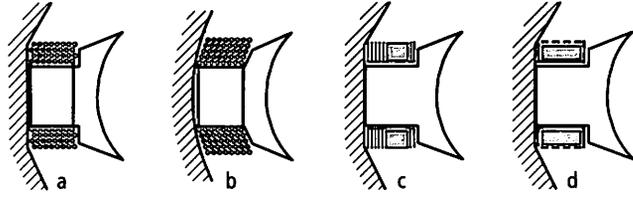
4. Circuit électrique

4.1. Bobines inductrices

Elles sont destinées à produire le flux inducteur. La puissance d'excitation est d'environ 2 à 3 % de la puissance totale ; elle peut aller jusqu'à 5 % pour les petites machines.

a) Forme des bobines

Elles peuvent être droites (fig. a) ou épouser la forme de la carcasse (fig. b).



b) Différents enroulements

On distingue l'enroulement d'excitation monté en dérivation sur l'induit (excitation shunt), grand nombre de spires de fil fin, de l'enroulement d'excitation en série, petit nombre de spires, de gros fil.

Ces enroulements peuvent être bobinés étagés (fig. c) ou bobinés concentriques (fig. d).

Les bobines des pôles auxiliaires, ou pôles de commutation, sont toujours en série avec l'induit et comportent quelques spires seulement.

Remarque

Il ne faut pas confondre pôles de commutation et pôles de compensation, ces derniers ayant pour but de combattre la réaction magnétique d'induit.

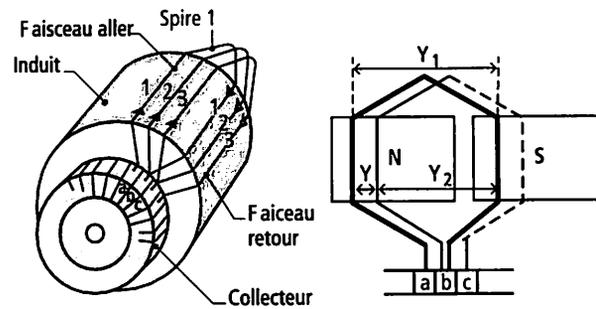
4.2. Enroulement induit

Il se compose d'un certain nombre de sections formées de spires dont les extrémités sont reliées à deux lames consécutives du collecteur.

Exemple : Représentation de 3 sections sur un induit de machine à 4 pôles.

a) Définitions

- **Section (trait fort)** : c'est l'ensemble des spires que l'on parcourt pour aller d'une lame de collecteur à la lame suivante.
- **Faisceau ou demi-section** : c'est l'ensemble des conducteurs actifs d'une section.



(Y1) : Largeur de section ou pas arrière : nombre de faisceaux pour aller d'un faisceau à l'autre d'une même section.

(Y2) : Pas avant : nombre de faisceaux pour aller du faisceau sortie d'une section au faisceau d'entrée de la section suivante.

(Y) : Pas résultant : ces 3 pas sont reliés par la relation :

$$Y = Y1 \pm Y2$$

La condition essentielle que doit remplir un enroulement est que la largeur de section Y1 soit aussi proche que possible du pas polaire.

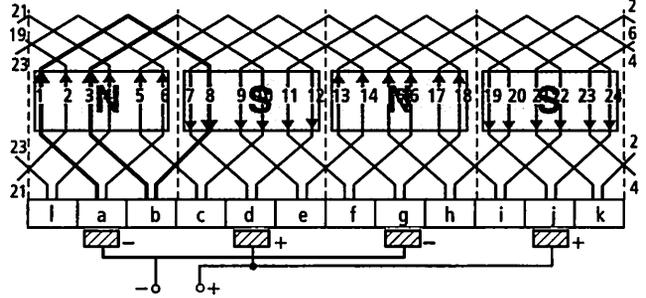
Enfin, un enroulement de machine à courant continu est fermé sur lui-même et symétrique par rapport aux balais.

b) Enroulement imbriqué

Les sections se chevauchent, on dit qu'elles s'imbriquent les unes dans les autres.

Exemple :

Induit comportant 24 faisceaux, 12 lames au collecteur, pas arrière 7, pas avant 5. Pas résultant : $Y = Y1 \pm Y2 = 7 - 5 = 2$.



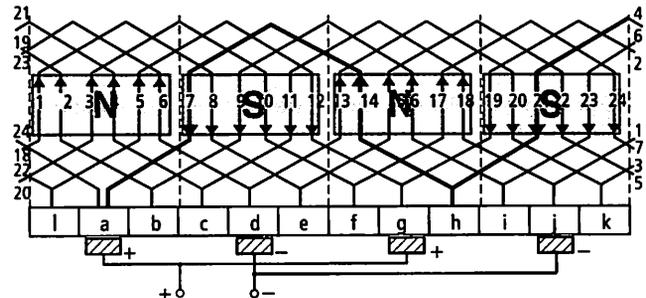
Enroulement imbriqué.

c) Enroulement ondulé

C'est un enroulement en série, les sections sont reliées à la suite les unes des autres sans revenir en arrière ; il s'en suit une forme ondulée du bobinage sur le schéma panoramique.

Exemple :

Induit 24 faisceaux, 12 lames au collecteur, pas arrière 7, pas avant 7, pas résultant 14.

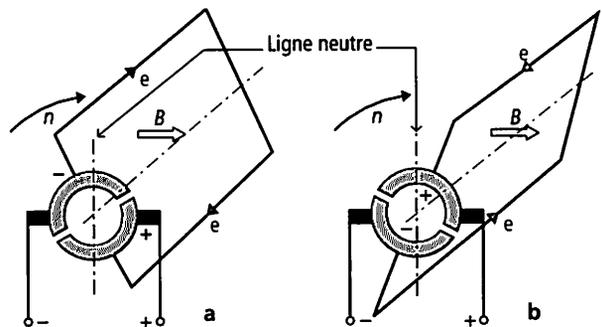


Enroulement ondulé.

4.3. Le collecteur

Il assure la liaison entre les conducteurs tournants et le circuit extérieur fixe et il transforme le courant alternatif induit dans les bobinages en courant continu.

a) Principe

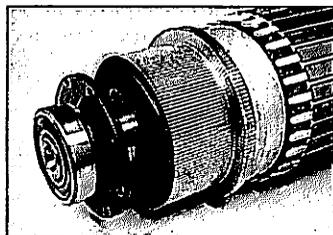
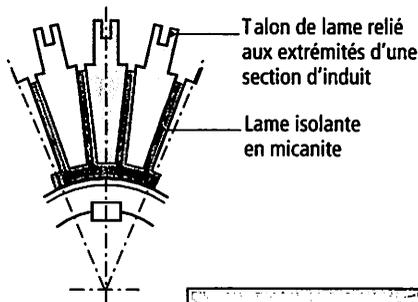
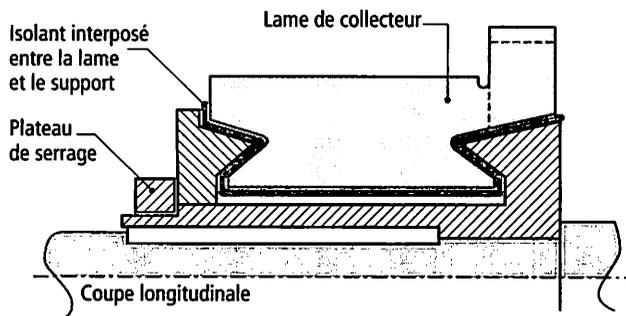


En traversant la ligne neutre, la polarité des conducteurs change ; mais, en même temps, les demi-bagues changent aussi de balais ; finalement les balais conservent la même polarité.

Lorsque la spire est sur la ligne neutre, les fém induites dans les conducteurs sont nulles et la spire est en court-circuit par les balais.



b) Constitution



Collecteur de machine à courant continu (Leroy Somer).

Chaque lame est soudée au fil de sortie d'une section et à l'entrée de la section suivante.

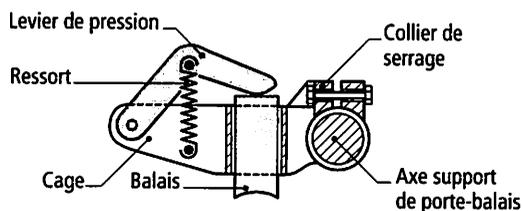
4.4. Balais et porte-balais

Ils assurent un contact glissant entre le collecteur entraîné en rotation et les conducteurs allant à la plaque à bornes.

a) Conditions imposées

- Assurer une bonne commutation sans étincelles aux balais.
- Ne pas détériorer le collecteur : ce sont les balais qui constituent les pièces d'usure.
- Éviter les pertes : soit par frottement, soit par résistance de contact.

b) Porte-balais



c) Balais

Réalisant le contact glissant, ils sont à base de graphite et parfois de cuivre :

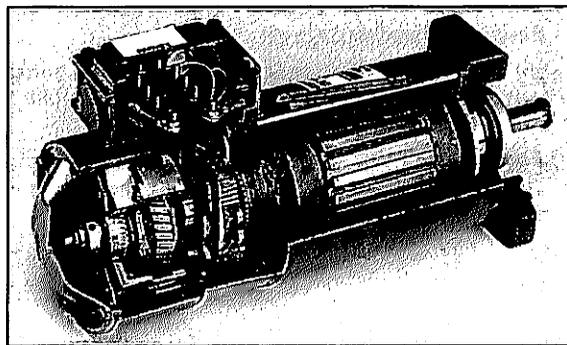
- trop durs, ils provoquent l'usure du collecteur ;
- trop tendres, ils encrassent le collecteur.

L'ensemble collecteur à lames et balais nécessite une surveillance et un échange des balais selon une périodicité fixe.

5. Partie mécanique

Quel que soit le type de machine tournante, les organes mécaniques remplissent sensiblement les mêmes fonctions et on retrouve des solutions très voisines, que ce soit pour les machines à courant continu ou pour les machines à courant alternatif.

5.1. Structure générale



Machine à courant continu ouverte (Parvex).

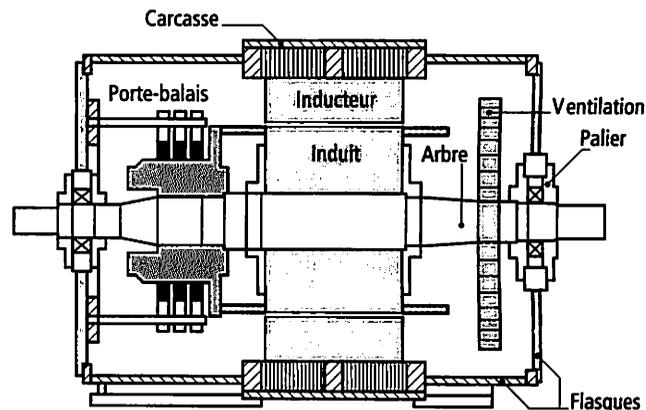
5.2. Carcasse, flasques et arbre

La carcasse est le support de base qui sert également à canaliser le flux inducteur et sur laquelle sont fixés :

- les pôles inducteurs et auxiliaires ;
- les flasques paliers ;
- les pattes de fixation et le crochet de levage.

Avec les flasques, la carcasse assure en outre la protection mécanique et dirige l'air de refroidissement.

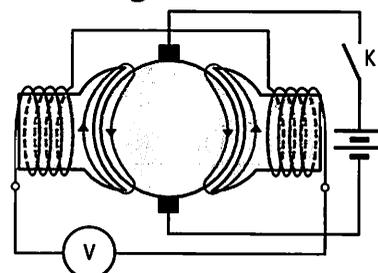
L'arbre assure la transmission du couple. Guidé en rotation par deux paliers, il supporte : le collecteur, l'induit, le ventilateur.



6. Entretien des machines à courant continu

Le collecteur et les balais des machines à courant continu constituent une particularité à laquelle il faut apporter beaucoup de soin pour une bonne commutation.

6.1. Calage des balais



Le calage des balais sur la ligne neutre d'une machine à courant continu pose des problèmes, surtout dans le cas d'un grand nombre de lames au collecteur et si la machine (moteur) doit tourner dans les deux sens. Pour effectuer ce calage, on

peut utiliser la méthode suivante : en envoyant des impulsions de courant avec l'interrupteur K, on recherche la déviation minimale ou nulle du voltmètre. Dans ces conditions, les balais sont bien calés sur la ligne neutre.

6.2. Entretien du collecteur et des balais

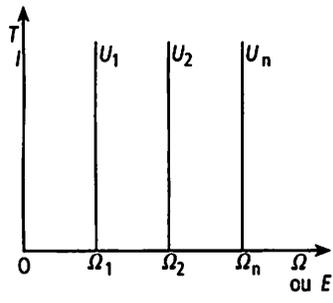
- Vérification périodique du collecteur (ne jamais le frotter avec de la toile d'émeri).
- Changement des balais usés.
- Vérification de la pression de contact des balais de 1,5 à 2 N/cm².
- Densité de courant de 6 à 12 A/cm².

1. Caractéristique mécanique

1.1. Caractéristique à flux constant et résistance statorique négligeable

$U = E$ et $E = K\Phi\Omega \Rightarrow \Omega = \frac{U}{K\Phi}$

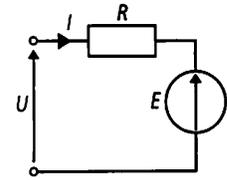
$T = K\Phi I$



Dans une machine à courant continu idéale, le couple est indépendant de la vitesse. Une variation de couple ne produit pas de variation de vitesse. La vitesse de rotation est directement proportionnelle à la tension d'alimentation.

1.2. Effet de la résistance statorique

En convention moteur :

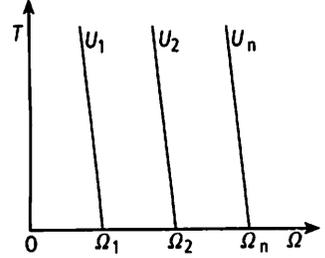


$U = E + RI = K\Phi\Omega + R \frac{T}{K\Phi}$

$\frac{RT}{K\Phi} = -K\Phi\Omega + U$

$T = -\frac{(K\Phi)^2}{R}\Omega + \frac{K\Phi}{R}U$

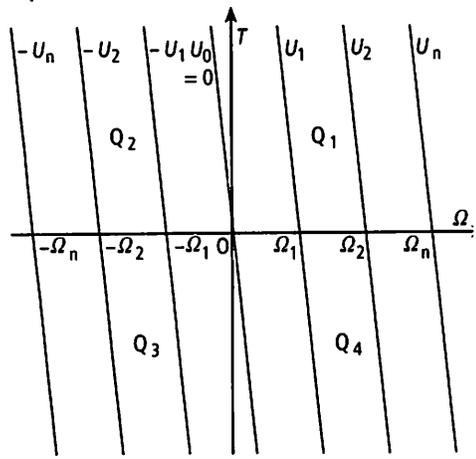
C'est l'équation d'une droite décroissante de la forme $y = -ax + b$. Le coefficient directeur est d'autant plus important que R est faible.



Dans ce cas, couple et vitesse ne sont plus indépendants. Une augmentation du couple produit une diminution de la vitesse.

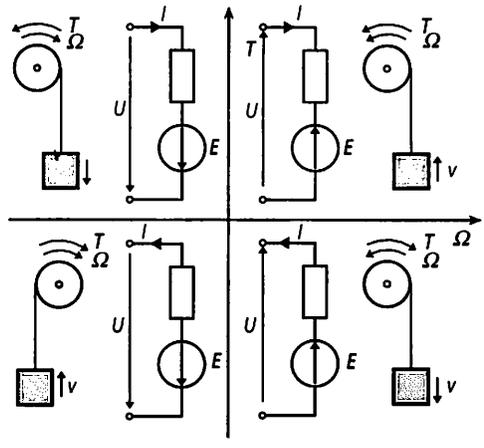
1.3. Fonctionnement dans les quatre quadrants

La machine à courant continu étant totalement réversible, les caractéristiques s'étendent dans les 4 quadrants sans discontinuité.



Q_1 et Q_3 correspondent à des fonctionnements moteurs. $P = T\Omega$ positif.
 Q_2 et Q_4 correspondent à des fonctionnements en génératrice. $P = T\Omega$ négatif.

• Sens réels des courants, tensions, couple et vitesse dans les 4 quadrants :



2. Variation de vitesse

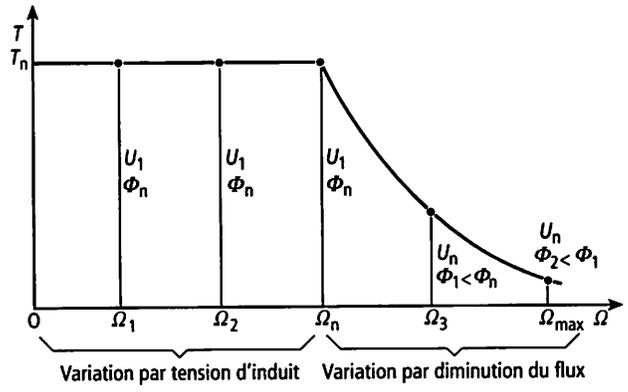
2.1. Par variation de tension d'induit

$\Omega = \frac{U}{K\Phi}$ et $T = K\Phi I$

La vitesse de rotation est proportionnelle à la tension d'alimentation. C'est le mode de variation le plus employé car il permet de conserver la caractéristique de couple de la machine.

2.2. Par variation de flux

Il est possible d'aller au-delà de la vitesse nominale en diminuant le flux, mais le couple se trouve également diminué.



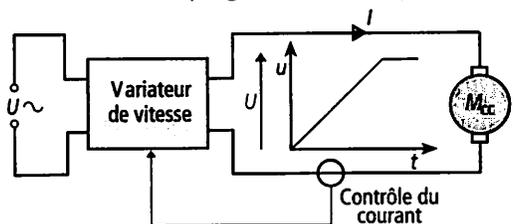
Si le flux tend vers zéro, la vitesse tend vers l'infini. Il faut toujours vérifier la présence du courant inducteur avant d'alimenter l'induit (risque d'emballlement).

3. Démarrage

Pour démarrer une machine à courant continu, il faut augmenter progressivement la tension d'induit sinon le courant serait très important et risquerait de détériorer la machine.

$I = \frac{U - E}{R}$ et $E = K\Phi\Omega$; au démarrage $\Omega = 0 \Rightarrow E = 0 \Rightarrow I_d = \frac{U}{R}$.

Le démarrage est généralement contrôlé par un variateur de vitesse qui réalise une rampe de tension et limite le courant à une valeur maximum programmée (configuration).



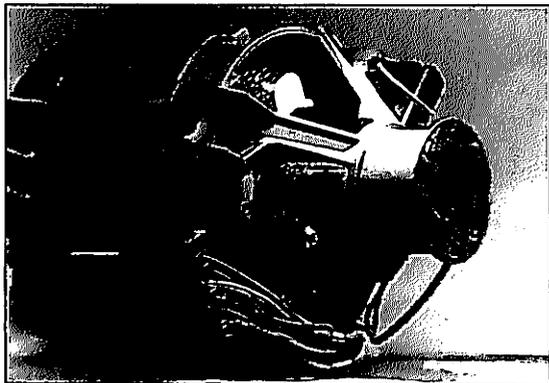
1. Moteur universel

Il est dit universel car il peut être alimenté indifféremment en courant continu ou en courant alternatif monophasé ; c'est le moteur employé dans toutes les perceuses portatives.

a) Principe

Si on inverse le courant à la fois dans l'induit ET dans l'inducteur, le sens de rotation ne change pas.

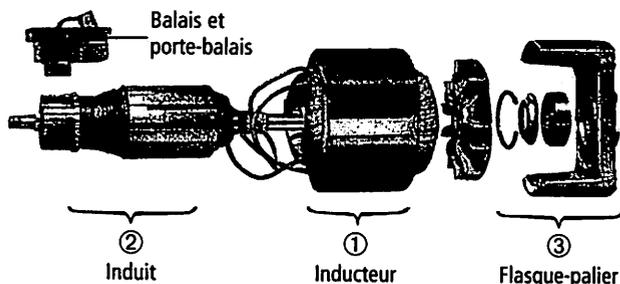
Si l'on alimente un moteur à excitation série par un courant alternatif monophasé, le courant s'inverse à chaque demi-alternance ; le sens de rotation reste le même.



Moteur universel de puissance inférieure à 1 kW.

Dans le cas du moteur dérivation, la forte inductance des bobines inductrices provoquerait un déphasage trop important ; ce type de moteur ne convient pas.

b) Constitution



- (1) Inducteur ou stator : circuit magnétique bipolaire obtenu par empiilage de tôles avec enroulement inducteur ;
- (2) Induit ou rotor, il comprend : l'arbre, le collecteur, le bobinage logé dans les encoches du circuit magnétique feuilleté ;
- (3) Ensemble flasque palier : soit avec paliers lisses, soit avec roulements à billes ;
- (4) Système de commutation avec balais et porte-balais.

c) Caractéristiques

Couple de démarrage et courant d'appel assez élevés. La vitesse varie beaucoup avec la charge. Pour inverser le sens de rotation, il faut inverser soit l'induit, soit l'inducteur.

Il y a beaucoup de parasites, d'où la nécessité de relier les balais à la masse par l'intermédiaire de condensateurs, l'ensemble inducteur condensateur formant un filtre.

d) Utilisation

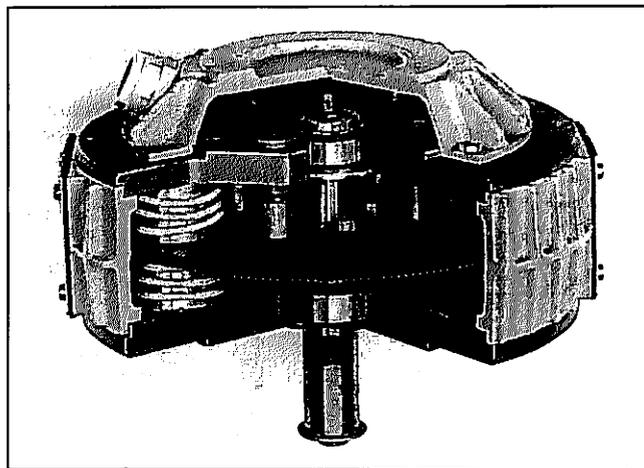
- Petite puissance surtout en courant alternatif.
- Aspirateurs, moulins à café, cireuses, perceuses portatives.
- Une alimentation à tension variable par triac permet d'obtenir une variation de vitesse.

2. Moteur à entrefer plan

a) Principe

C'est un moteur à courant continu dans lequel les conducteurs induits, au lieu d'être parallèles à l'axe, sont disposés selon des rayons.

b) Constitution



Moteur à entrefer plan (Invensys-Parvex.)

- Circuit magnétique fixe : inducteurs avec flasques en acier comportant les paliers à roulements à billes et les aimants permanents.
- Induit ou rotor plan : conducteurs lamellaires en cuivre isolés entre eux par des feuilles de verre époxy et formant un bobinage ondulé série.

c) Caractéristiques

- Moteur à très faible inertie ; l'induit ne comporte pas de circuit magnétique mais uniquement des conducteurs avec leurs isolants.
- Moteur très plat ; l'induit est un disque réalisé par circuit imprimé pour les petites puissances.
- Inducteur à aimant permanent, il supprime la source d'excitation.
- Pas de réaction magnétique d'induit, d'où une très bonne commutation.
- Grande gamme de vitesse : de 1 à 3 000 tr/min.

d) Utilisation

Il permet des commandes à inversions rapides et fréquentes tels que dérouleurs de bandes magnétiques, servo-mécanismes.

Il est utilisé également comme moteur à courant continu pour climatiseurs, essuie-glaces d'automobiles, ventilateurs, etc.

3. Autres moteurs

Il existe une grande variété de moteurs spéciaux qui sortent du cadre de cette étude.

On peut citer notamment les moteurs :

- à répulsion, répulsion induction ;
- triphasé à collecteur.

On peut également citer les petites machines utilisées dans les servo-mécanismes :

- moteur diphasé d'asservissement ;
- moteur pas à pas ;
- micro-moteurs à courant continu ;
- synchro-machines ou selsyns, etc. ;
- moteur à hystérésis ;
- stéréomoteurs.

Le degré croissant d'automatisation dans les systèmes, et le développement de l'électronique, ont conduit à utiliser le moteur pas à pas qui permet un contrôle en boucle ouverte de la vitesse et du positionnement.

Le développement des moteurs pas à pas a été favorisé par :

- la qualité des aimants permanents ;
- la commande à microprocesseurs.

1. Différents types de moteurs pas à pas

On peut définir le moteur pas à pas comme un moteur dont la partie mobile se déplace d'une quantité élémentaire appelée « pas » chaque fois que le moteur reçoit une impulsion.

Un moteur pas à pas est caractérisé par sa résolution ou encore son nombre de pas par tour.

Pas par tour	12	24	36	48	60	100	200	400
Pas angulaire 2	10	15	10	7,5	6	3,6	1,8	0,9

On distingue trois principes de fonctionnement :

- moteurs à réluctance variable ;
- moteurs à aimant permanent ;
- moteurs hybrides.

1.1. Moteur à réluctance variable

a) Constitution

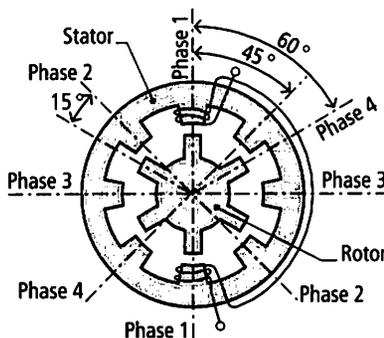
Ce moteur comporte une denture dont le pas est différent au stator et au rotor.

Exemple :

Stator 8 pôles - rotor 6 pôles :

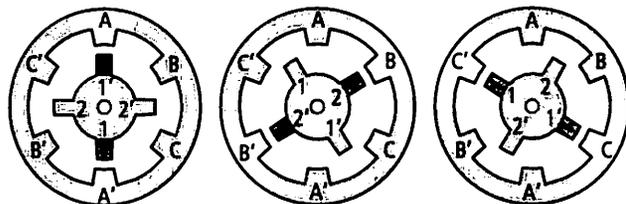
$$\text{Pas statorique} = \frac{360}{8} = 45^\circ$$

$$\text{Pas rotorique} = \frac{360}{6} = 60^\circ$$



b) Fonctionnement

Quand on alimente les bobines AA' puis BB', et enfin CC', le rotor se place de telle façon que le flux qui le traverse soit maximal (Réluctance minimale).



Le nombre de pas par tour est donné par la relation :

$$N_p = \frac{360}{\alpha_r - \alpha_s}$$

α_r : pas dentaire rotorique (en degrés) ;
 α_s : pas dentaire statorique (en degrés).

Exemple :

Moteur avec $Z_s = 6$ dents au stator et $Z_r = 4$ dents au rotor :

$$\alpha_s = \frac{360}{6} = 60^\circ \quad \alpha_r = \frac{360}{4} = 90^\circ \quad N_p = \frac{360}{90-60} = 12 \text{ pas/tr.}$$

c) Caractéristiques

- Nombre de pas par tour important (bonne résolution).
- Construction assez facile.
- Couple moteur proportionnel au carré du courant dans les bobines, mais assez faible.
- Le sens de rotation dépend de l'ordre d'alimentation des bobines (minimum 3 phases).

Ce type de moteur présente une simplicité de construction mais, du fait de son faible couple, il est le plus souvent remplacé par des moteurs à aimant permanent ou par des moteurs hybrides.

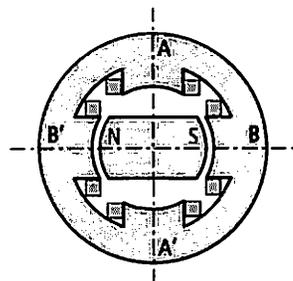
1.2. Moteurs à aimant permanent

Ce moteur est basé sur l'application de la règle du flux maximal ; le rotor est constitué par des aimants.

a) Constitution

Le stator comporte des pôles électromagnétiques A, B, A', B' dont on peut fixer la polarité selon le sens du courant dans les bobines.

Le rotor est constitué par un aimant en ferrite ayant une perméabilité faible.

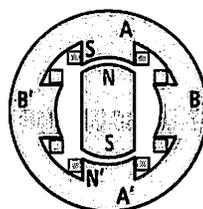


Moteur au repos

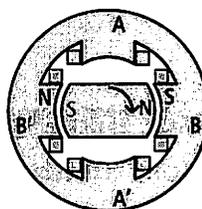
b) Fonctionnement

Au repos, le rotor aimant NS se place en face d'une paire de dents du stator. Quand on alimente les bobines, le rotor se place en face des bobines alimentées de telle façon que le flux qui le traverse soit maximal.

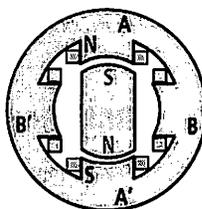
Bobines A et A' alimentées



Bobines B et B' alimentées



Bobines A et A' alimentées



$$N_p = \frac{360}{\alpha_r - \alpha_s}$$

Exemple :

$$\text{Nombre de pas par tour} : N_p = \frac{360}{180 - 90} = 4 \text{ pas par tour.}$$

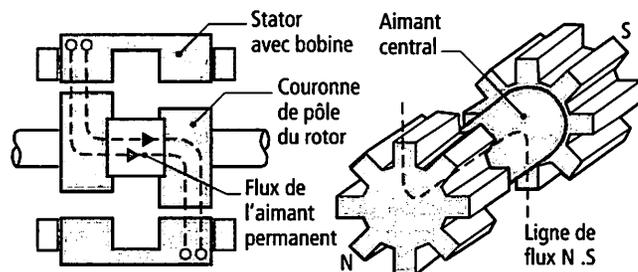
c) Caractéristiques

- Nombre de pas par tour plus faible, dû à la difficulté de loger les aimants du rotor.
- Couple moteur élevé, dû à la puissance des pôles aimantés ; le couple est proportionnel au courant.

1.3. Moteurs hybrides

C'est un moteur qui associe les deux principes précédents ; on l'appelle aussi moteur réluctant polarisé.

a) Constitution

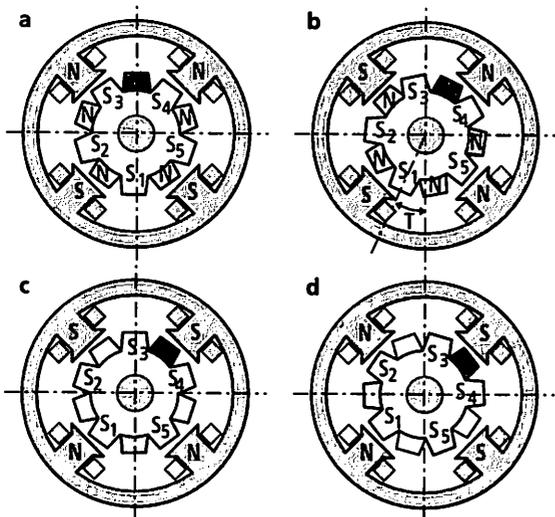


Exemple de rotor de moteur hybride.

b) Fonctionnement

Le moteur prend une position présentant la résistance magnétique minimale en fonction de l'excitation du stator et du flux magnétique de l'aimant permanent.

Les figures a, b, c, d, ci-après montrent les positions successives du rotor après l'alimentation des bobines du stator. Après 4 impulsions de pas, le champ statorique a pivoté de $4 \times 90^\circ = 360^\circ$; le rotor a pivoté d'une distance de pôle soit, pour 5 pôles, $360/5 = 72^\circ$, soit par impulsion de $72/4 = 18^\circ$; il s'agit donc d'un moteur de résolution 20 pas par tour.



c) Caractéristiques

- Très bonne résolution : jusqu'à 200 ou 400 pas par tour.
- Couple moteur élevé dû à l'aimantation du rotor, proportionnelle au courant.

2. Fonctionnement statique et dynamique

2.1. Caractéristiques statiques

a) Courant par phase

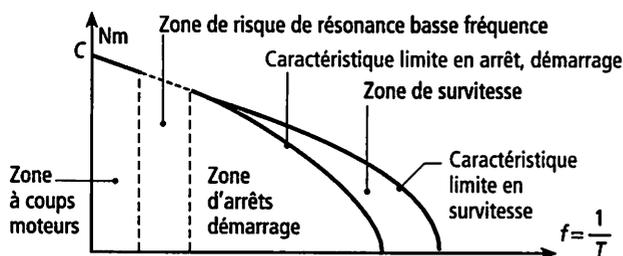
C'est l'intensité par phase à fréquence nulle (moteur à l'arrêt) qui provoque l'échauffement maximal admissible.

b) Couple de maintien statique (C_m)

C'est le couple qu'il faut appliquer au moteur pour effectuer 4 pas quand il est alimenté « 2 phases à la fois ». Ce couple est proche de la forme d'une sinusoïde.

2.2. Caractéristiques dynamiques

Pour un système donné, la variation du couple résistant et la fréquence des impulsions déterminent les caractéristiques dynamiques du moteur.



Exemple de caractéristiques de moteurs pas à pas.

	À aimant permanent		Moteurs hybrides	
Nbre de phases	2	4	4	4
P en (W)	7,5	125	14,5	23
R en Ω	46	26,5	19,5	0,55
I en A	0,28	0,48	0,61	4,6
C_m mNm	70	240	600	2
U en V	12,9	12,7	12	2,5
Pas/tr	48	48	200	200

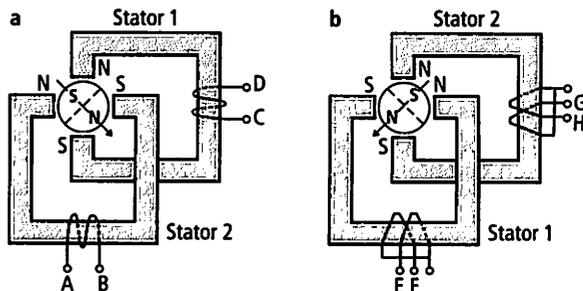
3. Alimentation des moteurs pas à pas

Le principe de fonctionnement des moteurs pas à pas reposant sur la commutation successive des enroulements stator ou phases, il est nécessaire d'avoir un commutateur à transistor qui distribue les polarités dans les enroulements.

3.1. Moteurs diphasés ou à 4 phases

a) Moteurs à deux phases

Ce sont des moteurs comportant des enroulements qui sont alimentés soit dans un sens, soit dans l'autre.



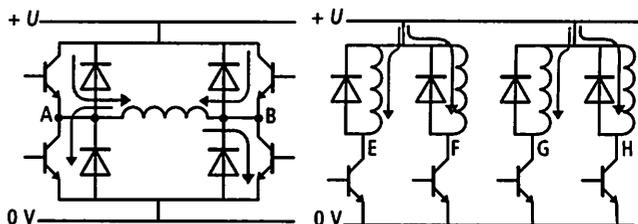
b) Moteurs à quatre phases

Ce sont des moteurs comportant des bobines à point milieu; dans chaque demi-bobine, le courant circule toujours dans le même sens.

3.2. Alimentation des enroulements

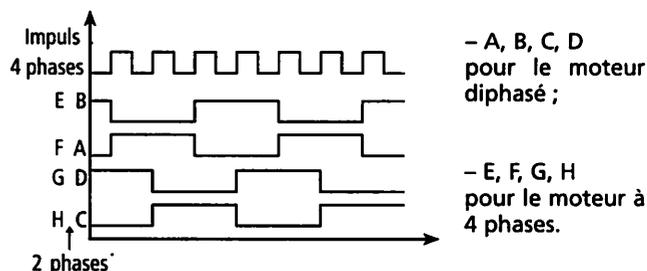
Moteur diphasé

Moteur à 4 phases



(Schéma identique pour l'enroulement CD)

3.3. Ordre d'alimentation des phases



Remarques :

Dans les moteurs diphasés, le nombre de phases (deux) ne doit pas être confondu avec le nombre de bobines.

Cette étude est limitée, elle n'aborde pas les problèmes de commutation des enroulements qui sont alimentés par des impulsions. Enfin, il n'est pas fait état de commandes par demi-pas qui nécessitent 8 états différents d'alimentation.

4. Sélection d'un moteur pas à pas

Pour bien sélectionner un moteur pas à pas, il faut fixer :

- le nombre de pas par tour ;
- les fréquences de travail et les couples nécessaires
- l'inertie de la charge, la température ambiante.

Ces différents points étant fixés, il faut définir :

- le type de moteur : aimant permanent, hybride, à réluctance (avec ou sans réducteur) ;
- l'alimentation : tension et courant par phase ;
- le mode d'excitation : 1 phase à la fois, 2 phases à la fois, par 1/2 pas.

Index alphabétique

A

Absence de tension 56
Accumulateurs 42
Additionneur 88
Aériennes (canalisations) 44
Aériennes (lignes) 14, 45
Aimant permanent (moteur) 141
Alimentation moteurs pas à pas 142
Alimentation à découpage 105
Alimentation double 43
Alimentation normale, secours 41
Alimentation sans coupure 40, 43
Alternateur 7, 10, 12, 133
Amont (réseau) 52
Amorçage thyristor 81
Ampèremétrie (sélectivité) 64
Amplificateur opérationnel 88
Appel de courant 128
Arbre 138
Armement (des supports) 44
Artère (coupure) 16
Asservissement 108
Association (fusibles) 64
Asynchrone (moteur) 120 à 124
Autopilote 134

B

Balais 138
Barrage 8
Barres (jeu de) 53
Batterie (décondensateur) 39
Blindage 116
Bloc DGPT2 29
Bobinage 121, 122
Boîtes (jonction dérivation) 47
Boîtiers 79, 82, 84, 86
Boucle (distribution en) 43
Boucle (ouverte, fermée) 108
Buchholz 29
Bulbe (groupe) 9

C

Câble 46, 53
Cahier des charges 22
Caloporteur (fluide) 12
Canalisation aérienne 44
Canalisation souterraine 46
Canalisations préfabriquées 48 à 50, 53
Capteur de température 119
Caractéristiques machines (CC) 139
Caractéristiques moteurs 130
Carcasse 136, 138
Catégorie d'emploi 76
Cellules (haute tension) 24
Centrales électriques 6 à 12
Champ tournant 120
Charge superficielle 116
Chauffage industriel 116 à 119
Chronométrique (sélectivité) 64
Chute de tension 49, 58, 59, 128
Chute (haute, moyenne, basse) 7, 8, 9
Circuit électrique 27, 137

Circuit magnétique 26, 136
Classe d'isolation 123
Cogénération 18
Collecteur 138
Colonne 26
Combustion (gaz) 10
Commander la puissance 75, 76
Commutation (CALC) 99
Comparateur (AOP) 89
Compensation 37, 39
Composants électroniques 78 à 89
Comptage 24, 35
Condamnation 56
Condensateur (installation) 38
Condenseur 10, 12
Conducteurs 44
Consignation 56
Contact indirect (protection) 49
Contacteur 75
Contrôle permanent CPI 73, 74
Cos φ 37
Cos φ (amélioration) 17
Couplage (transformateur) 31, 32
Couple 106, 107, 128, 129, 135
Coupure d'artère 16
Courant admissible 51, 52
Courants de court-circuit 50, 54, 60
Courant d'emploi 58
Courbes de sécurité 69
Couvercle 28
Culasse 136
Cuve 28

D

Décalage (consommation) 17
Déclenchement (conditions) 73
Découpage (alimentation à) 105
Défaut (1^{er} ou 2^e) 72
Délestage 17
Démarrage (temps de) 124, 128, 129, 139
Démarrateur 125
Départs moteur 75
Dérivateur (AOP) 89
Dérivation (simple, double) 16
Dérivée (action) 109
Diac 83
Diélectrique 29
Dimensions (moteur) 131
Diodes 79
Disjoncteur 53, 70, 72
Disjoncteur différentiel 68
Disjoncteur limiteur 65
Disjoncteur moteur 75
Dispatchings 15
Distribution (énergie) 13
Distribution (formes) 43

E

Eau lourde 11
Eau pressurisée (centrale) 12
Échangeur 11
Écran 27
Électrogène (groupe) 43

Électronique (composants) 78 à 89
Électronique (fonction) 90 à 105
Emploi (catégorie) 76
Énergie (gestion) 17
Énergie (transport) 13
Énergie primaire 6
Énergie réactive 39
Énergie secondaire 6
Enroulements 122
Entrefer plan (moteur à) 140
Environnement 123
Éolienne (énergie) 42
Équipotentiels (liaisons) 69
Étoile (couplage) 31
Étuves 117
Extrémité (câble) 47

F

Facteur de puissance 37
Faisceau 121
Faisceau (posé tendu) 44
Filiation de l'appareillage 65, 66
Flamme (thermique à) 10
Flèche 45
Fly-back (alimentation) 105
Fonctionnelles (cellules) 24
Fonctionnement (point de) 124
Fonctions de l'électronique 90 à 105
Four 117
Forward (alimentation) 105
Francis (turbines) 8
Freinage 125, 126, 127
Fréquence 128
Fusible (protection) 70, 71, 72

G

Gaz (combustion) 10
Gestion d'énergie 17
Gradateur 78, 103
Gradateur triphasé 104
Graëtz (pont de) 92
Groupe bulbe 9
Groupe électrogène 43
GTO (thyristor) 81

H

Hacheur 78, 97, 98, 99
Hautes chutes (centrales) (7)
Haute tension 13
Hybride (moteur) 141
Hydraulique (centrale) (6) 42
Hydroréfrigérant 28
Hypersynchrone 127
Hypothèses simplificatrices 71

I

Identification 56
Impédance (avec ou sans) 72
Inducteurs 136
Inertie 107, 128, 129
Infrarouge 118
Injection (courant continu) 127
Installation distribution 43 à 56

Intégrale (action) 109
Intégrateur (AOP) 89
Interconnexion (réseau) 13-14
Interrupteur 56
Inverseur (AOP) 88
Isolateur 44
Isolement 27, 116
Isolement (CPI) 73,74

J

Jeu de barres 53
Jonction (câble) 47

K

Kaplan (turbine) 9

L

Liaisons à la terre 36
Liaisons équipotentielles 69
Limiteur (disjoncteur) 65
Linéaire (moteur) 132
Longueur canalisations 50

M

Machines courant continu 135 à 139
Machines tournantes 120 à 143
Marée-motrice 9
Matériaux résistants 116
Mécanique (organes) 28
Mécanique (partie) 123, 136
Mécanique (rappel) 106
Méthode de calcul 71
Méthode simplifiée 55
Mise à la terre 56
Mise au neutre 67-69 à 71
Mode de pose 47
Modérateur 11
Modulateur (MLI) 102
Monoalternance (redressement) 91, 92
Moteur asynchrone 120 à 124, 128
Moteur départ 75
Moteur entrefer plan 140
Moteur monophasé 132
Moteur pas à pas 141, 142
Moteur universel 140
Mouvement d'énergie 15
Moyenne tension 16
Multivibrateur 89

N

Neutre à la terre 67-68
Neutre isolé 67, 72, 73, 74
Neutre (mise au) 67, 69 à 71
Neutre (régimes de) 67 à 74
Nucléaire (centrale) 6, 11

O

Onduleur 78, 100, 101
Onduleur assisté 95
Ondulé (bobinage) 122, 137
Organes mécaniques 28, 136

P

Paramétrage 111

Pas (avant, arrière) 122
Pas à pas (moteur) 141 à 142
Peigne (distribution en) 43
Pelton (turbine) 7
Permutation 41
Pertes en lignes 13, 14
Perturbations (réseau) 40
Piquetage 45
Point de livraison 35
Pollué (réseau) 39
Pont complet 95
Pont de Graëtz 92
Pose (mode de) 47
Poste d'intérieur 23
Poste haut de poteau 22
Poste préfabriqué 23
Postes de livraison 22
Poteaux (supports) 44, 45
Pouvoir de coupure 49, 55
Préfabriqué (poste) 23
Production d'énergie 6
Programmation 111
Programmation temporelle 18
Proportionnel (régulateur) 109
Protection contacts indirects 49, 51, 60, 62
Protection courts-circuits 51, 60, 61
Protection des matériels 58 à 66
Protection des personnes 67 à 74
Protections surcharges 48, 51
Puissance 106
Puissance 128
PWR (centrale) 11, 12

Q

Quadrants (quatre) 107

R

Radiale (distribution) 43
Radiateur (transformateur) 28
Radioactivité 11
Ralentissement 125, 126
Réacteur (nucléaire) 11, 12
Redresseur 78, 90 à 93
Redresseur contrôlé 94 à 96
Régime (TNR, ITR, TTN, ITN...) 36
Régimes de neutre 67 à 74
Règles de protection 51
Régulateur 109
Régulation 18, 108
Relstage 17
Réductance variable (moteur) 141
Rendement 135
Réseau amont 52
Réseau en basse tension 43
Réseau interconnexion 13
Réseau pollué 39
Résistances 116
Rotor 121, 128, 129
Roue libre (diode) 91

S

Schéma des liaisons à la terre 36
Schéma type 48
Section (bobinage) 122

Sections 48, 58
Sectionneurs 56
Sécurité (courbes de) 69
Sélectivité des protections 63, 64
Sélectivité (différentiels) 68
Séparation 56
Simple dérivation 16
Solaire (énergie) 42
Sources d'alimentation 22 à 42
Souterraine (canalisation) 46
Spire 121
Stator 121
Structure (réseau) 16
Suiveur (AOP) 88
Superficielle (charge) 116
Surgénérateur 11
Surtension 27
Symboles 34, 113
Synchrone (moteur) 133, 134

T

Tableau de comptage 35
Tarif (bleu, jaune, vert) 19
Tarification (énergie) 19
Température (capteur de) 119
Tempo (Tarif) 19
Temporelle (programmation) 18
TEP (Tonne Équivalent Pétrole) 6
Thermique (centrale) 6, 10
Thermocouple 119
Thermorésistance 119
Thyristor 80, 81
Thyristor GTO 81
TNC 69
TNS 69
Transformateur en parallèle 32, 55
Transformateur sec 30, 78
Transformateur (distribution) 25 à 34, 53
Transistor IGBT 87
Transistor MOS 87
Transistor (effet de champ) 86
Transistors bipolaires 85
Transport énergie 13 à 15
Traversée isolante 27
Très haute tension 14
Triacs 83
Triangle (couplage) 31
Triphasé (redressement) 93, 96
Turbines 7, 8, 9, 10, 12

U

Universel (moteur) 140
Uranium 11

V

Vapeur (générateur) 12
Variateur de vitesse 110 à 112
Variateur U/F 126
Variation demande 15
Variation production 15
Vitesse variable 106 à 113

Z

Zig-zag (couplage) 31, 32