



Office de la Formation Professionnelle
et de la Promotion du Travail

Technicien Spécialisé

Génie Electrique

Tronc commun

Manuel de cours

Module 13

Dépanner les circuits d'électronique de puissance



VERSION AOUT 2022



Direction de la Recherche et Ingénierie de la Formation



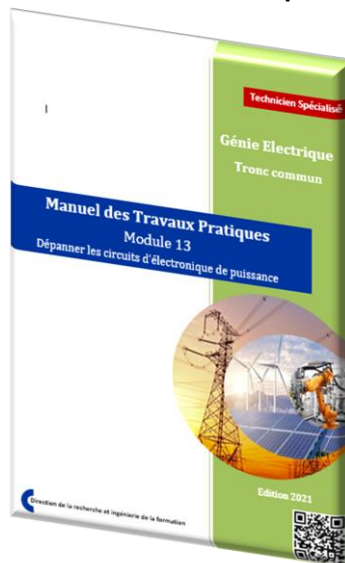
Avant-propos

Les manuels de cours, de travaux pratiques et le guide e-learning sont téléchargeables à partir de la plateforme e-learning moyennant les codes QR suivants :

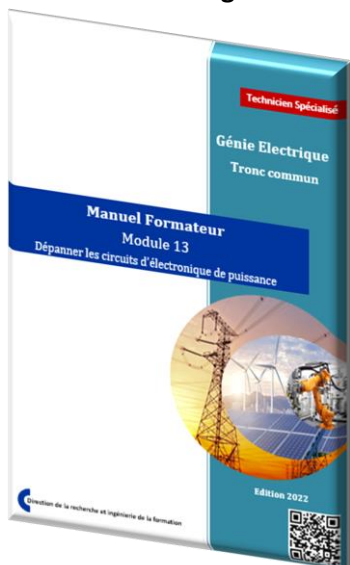
Manuel de cours



Manuel des travaux pratiques



Guide e-learning



SOMMAIRE

AVANT-PROPOS.....	1
SOMMAIRE.....	2
COMPETENCES-CIBLES ET OBJECTIFS OPERATIONNELS	5
CHAPITRE I.....	7
LES COMPOSANTS D'ÉLECTRONIQUE DE PUISSANCE.....	7
1. INTRODUCTION.....	8
2. LES COMPOSANTS PASSIFS.....	9
2.1 Les résistances	10
2.2 Les Condensateurs	14
2.3 Les Bobines et les Transformateurs.....	17
3. COMPOSANTS ACTIFS.....	23
3.1 Les diodes	23
3.2 Les Thyristors.	27
3.3 Les Triacs.....	29
3.4 Les Thyristors GTO	30
3.5 Les transistors bipolaires.....	32
3.6 Les transistors MOSFET,	36
3.7 Les transistors IGBT.....	38
CHAPITRE II.....	42
MÉTHODES DE DÉPANNAGE EN ÉLECTRONIQUE DE PUISSANCE.....	42
1. INTRODUCTION.....	43
2. SÉCURITÉ ET PRÉVENTION	43
2.1 Espace de travail sécurisé	43
2.2 Poste de travail protégé contre les DES/EOS.....	44
2.3 Mesures de sécurité contre les dangers électriques	45
2.4 Prévention des autres dangers non électriques	47
3. APPAREILS DE DÉPANNAGE	48
3.1 Multimètre numérique	48
3.2 RLC mètre	50
3.3 L'oscilloscope	50
3.4 Le fer à souder.	52
4. APPROCHES DE DÉPANNAGE	56
4.1 L'approche aléatoire	57
4.2 L'approche systématique	57

5. TECHNIQUE DE DÉPANNAGE	65
5.1 Confirmer l'existence d'un défaut dans le circuit	65
5.2 Considérez d'abord l'inspection visuelle (travail hors tension).....	65
5.3 Sélectionnez Outils de dépannage	67
5.4 Passer à la vérification sous tension.....	67
5.5 Vérifier le bloc d'alimentation.....	68
5.6 Vérifier les composants individuels.....	68
5.7 Vérifier le circuit principal	68
5.8 Vérifier les charges par alimentation électrique mesurée	69
CHAPITRE III.....	70
DIAGNOSTIC DES COMPOSANTS D'ÉLECTRONIQUE DE PUISSANCE.....	70
1. INTRODUCTION.....	71
2. LES RÉSISTANCES.....	71
3. LES CONDENSATEURS.....	72
3.1. Examen visuel	73
3.2. Utilisation d'un RLC-mètre	74
3.3. Utilisation d'un ESR-mètre	74
3.4. Utilisation d'un multimètre analogique (Mode résistance)	75
3.5. Utilisation d'un multimètre numérique.....	76
4. LES BOBINES ET LES TRANSFORMATEURS	77
4.1. Utilisation d'un RLC-mètre	77
4.2. Utilisation d'un ohmmètre.....	77
4.3. Vérification d'un transformateur	78
5. LES DIODES	79
5.1. Vérification des diodes par la fonction de « test de diode ».....	80
5.2. Vérification des diodes par la fonction de « ohmmètre ».....	81
5.3. Test en "in situ"	82
5.4. Test du pont de diodes :.....	83
5.5. Tester un pont de diodes sans le dessouder	84
6. LES THYRISTORS.....	84
7. LES TRIACS	86
8. LES TRANSISTORS BIPOLAIRES.....	89
8.1. Test au multimètre d'un transistor bipolaire.....	89
8.2. Test d'un transistor avec la fonction ohm-mètre :.....	92
8.3. Identification d'un transistor bipolaire inconnu	92
9. LES TRANSISTORS MOSFET	94
9.1. Test du MOSFET au multimètre en mode test de diode.	94
9.2. Test du MOSFET au multimètre en mode ohmmètre.	95
9.3. Test du MOSFET sur plaque à essai.	96

9.4. Identification d'un MOSFET inconnu	97
10. LES TRANSISTORS IGBT.....	99
10.1. Test d'un IGBT au multimètre en mode test de diode.	99
10.2. Test d'un IGBT au multimètre en mode ohmmètre.	100
10.3. Test d'un IGBT sur plaque à essai.	101
10.4. Test des modules doubles IGBT.....	101
BIBLIOGRAPHIE.....	106
CHAPITRE III.....	107

COMPETENCES-CIBLES ET OBJECTIFS OPERATIONNELS

Module 13 : Dépanner les circuits d'électronique de puissance

Code : GETC – 13

Durée : 45 heures

ENONCE DE LA COMPETENCE

Pour démontrer sa compétence, le stagiaire doit **dépanner les circuits d'électronique de puissance**, selon les conditions, les critères et les précisions qui suivent.

CONTEXTE DE REALISATION

- Individuellement ou en groupe
- À partir de :
 - Directives ;
 - Manuels et Fiches techniques ;
 - Schémas ;
 - Représentations graphiques.
- À l'aide de :
 - Composants électroniques ;
 - Matériaux d'assemblage ;
 - Outils et d'instruments de mesure ;
 - Equipement de protection individuelle.

CRITÈRES GÉNÉRAUX DE PERFORMANCE

- Respect des règles de santé et de sécurité au travail.
- Respect de processus de travail.
- Travail soigné et propre.
- Utilisation appropriée des instruments de mesure.
- Exactitude de la terminologie

ÉLÉMENTS DE LA COMPETENCE	CRITÈRES PARTICULIERS DE PERFORMANCE
A. Interpréter le fonctionnement des circuits à base de Thyristors	• Interprétation correcte du fonctionnement d'un thyristor et de ses utilisations; • Distinction juste des types de SCR; • Détermination judicieuse des caractéristiques d'un SCR. • Description correcte des éléments de déclenchement et des méthodes de désamorçage
B. Réaliser des montages fonctionnels des applications de l'électronique de puissance.	• Interprétation correcte des schémas des différents circuits de l'électronique de puissance; • Choix judicieux des caractéristiques techniques des composants • Sélection juste de la protection des circuits de l'électronique de puissance • Montage conforme au schéma électronique; • Montage correct des différents circuits : - Redresseur/chargeur de batterie - gradateurs - hacheur série - Utilisation correcte des appareils de mesure
C. Installer et régler un onduleur.	• Installation correcte d'un onduleur • Branchement juste des entrées/sorties AC/DC de l'onduleur • Paramétrage et réglage judicieux de l'onduleur • Utilisation correcte des appareils de mesure;
D. Dépanner les circuits électroniques de puissance.	• Localisation précise de la source de problème; • Prédiction juste des résultats de mesure; • Application correcte des méthodes de dépannage; • Remplacement judicieux des parties défectueuses

Chapitre I

Les composants d'électronique de puissance

1. Introduction

Quelle que soit la complexité d'un circuit électronique ou d'une carte, il reste toujours l'association d'un nombre fini de types de composants. Ce sont les composants qui tombent en pannes induisant ainsi la défaillance du circuit électronique ou de la carte.

Pour dépanner un circuit d'électronique de puissance ou d'électronique en générale, et quelle que soit la méthode de diagnostic, on finit toujours par vérifier le bon fonctionnement des composants élémentaires.

Dans le but de faire une analyse correcte de fonctionnement des composants électroniques, le technicien doit être capable d'identifier, de caractériser et de savoir les limites de fonctionnements de chaque composant pouvant être la cause de la panne.

Les principaux composants d'électronique de puissance sont les composants actifs. Cependant, même dans les circuits de puissance ils coexistent les composants actifs et passifs d'une façon très corrélée. Le schéma synoptique d'un circuit de commutation et le schéma de montage d'une alimentation à découpage ci-dessous illustrent cette coexistence. Pour cette raison qu'on ne va pas se limiter à l'étude des composants actifs.

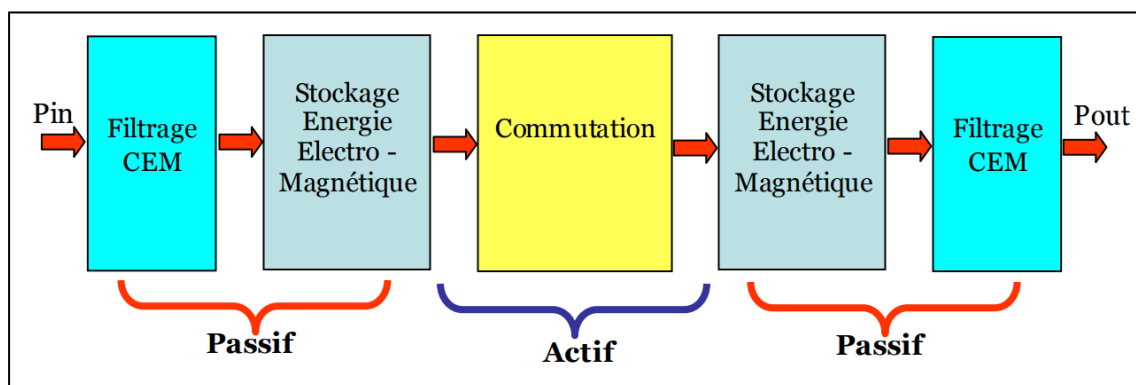


Figure 1.1 : synoptique d'un circuit de commutation

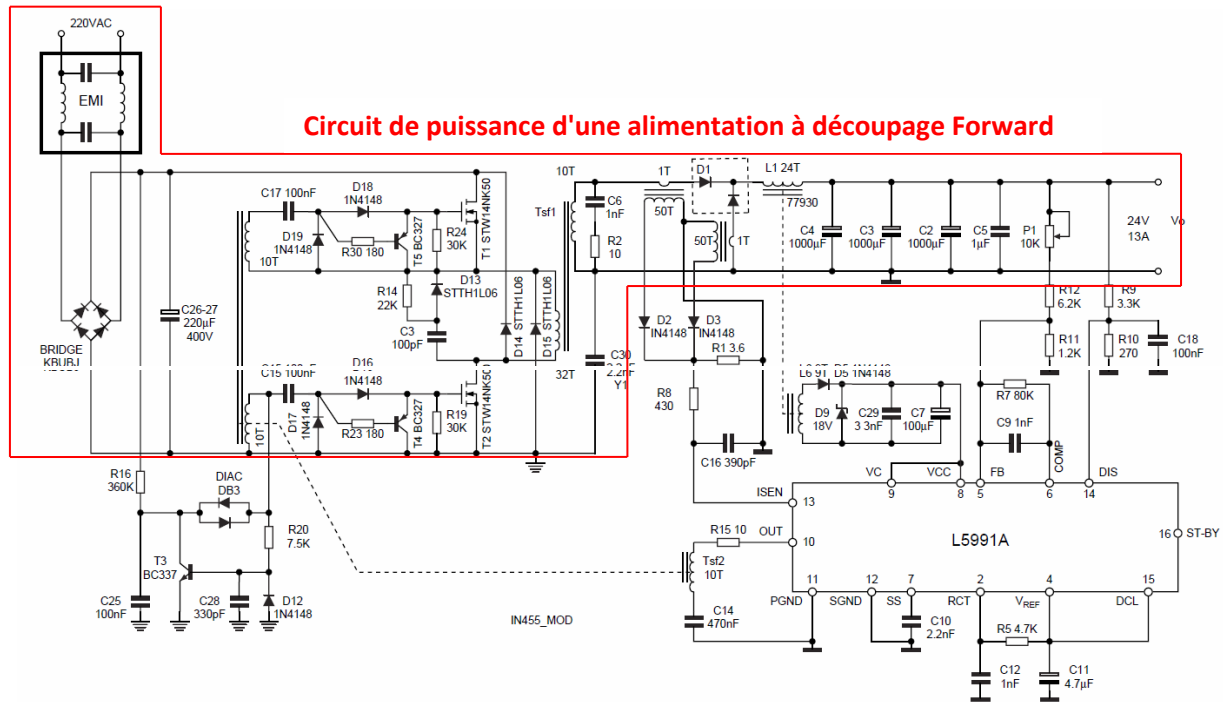


Figure 1.2 : montage d'une alimentation à découpage

L'étude des composants dans ce cours sera une étude appliquée. Elle ne traitera pas les équations des caractéristiques, les modèles dynamiques et la détermination du point de fonction objet d'autres modules. Ce chapitre présentera sommairement les composants ainsi que leurs principes de fonctionnement. Par la suite, s'intéresse particulièrement aux notions indispensables pour le diagnostic correct de ces composants. Tels que les limites de fonctionnement, les technologies existantes et les éléments de protection.

2. Les composants passifs

Un composant est dit passif lorsqu'il ne permet pas d'augmenter la puissance d'un signal. Dans la plupart des cas il s'agit même de réduire la puissance, souvent perdue par effet Joule : résistances, condensateurs, bobines, filtre passifs, transformateurs, ainsi que les assemblages de ces composants. Une autre définition d'un composant dit "passif" est qu'il obéit à la loi d'Ohm généralisée.

2.1 Les résistances

La résistance est la caractéristique d'un composant à s'opposer au passage du courant (flux d'électrons) et s'accompagne d'une dissipation d'énergie dans le composant par effet joule. L'unité de la résistance est l'Ohm dont le symbole est la lettre Oméga (Ω).

La résistance est un composant passif non polarisé (indépendant du sens du courant qui la traverse, ce qui n'est pas le cas des diodes et de certains condensateurs).

La gamme des résistances produites par l'industrie s'étend de quelques dizaines de milli ohms ($m\Omega = 1 * 10^{-3}\Omega$) à quelques dizaines de Mégohms ($M\Omega = 1 * 10^{+6}\Omega$) et ont des valeurs normalisées.

2.1.1 Dimensionnement d'une résistance

Les trois étapes pour dimensionner une résistance de puissance sont les suivantes :

1. déterminer la résistance et sa puissance à dissiper
2. déterminer la taille (encombrement)
3. choisir le boîtier le plus adapté aux contraintes mécaniques (montage, fixation)

La loi d'Ohm permet de déterminer la résistance lorsqu'on connaît la tension et le courant mis en jeu dans le circuit. Si on ne connaît pas le courant ni la tension, des essais doivent être faits.

La puissance dissipée par la résistance vaut le produit tension U par courant I, on peut donc écrire :

$$P = U^2/R = RI^2$$

La puissance (donc l'augmentation de température) varie avec le carré de la tension ou le carré du courant. Une augmentation de 10% de tension entraîne une augmentation de 21% de puissance dissipée. On peut donc déterminer la tension maximale aux bornes d'une résistance.

$$U = \sqrt{PxR}$$

2.1.2 Technologies des résistances

La résistance agglomérée

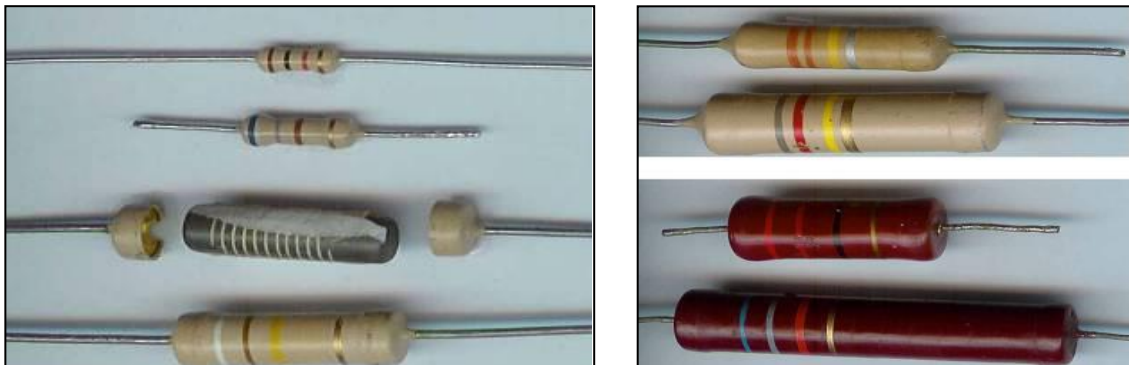
La résistance agglomérée est fabriquée à partir de poudre de carbone mélangée à un isolant et à un liant et entourée d'un enrobage. Elle est non inductive mais assez bruyante.



La résistance à couche de carbone

La résistance à couche de carbone est constituée d'une très fine couche de carbone déposée sur un barreau isolant en céramique et recouverte d'une couche de vernis.

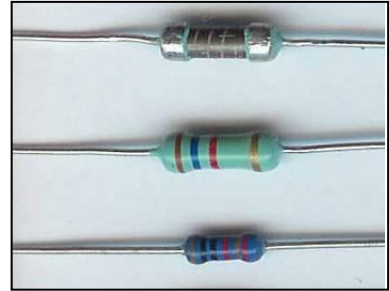
De par sa conception, elle possède en plus une certaine self-induction (bobine). Elle est moins bruyante et plus stable que la résistance agglomérée. C'est la plus courante et la moins chère.



La résistance à couche métallique

La résistance à couche métallique est constituée, en général, d'un film métallique déposé sous vide sur un barreau isolant en céramique. La valeur est ajustée en creusant la couche de métal en forme hélicoïdale.

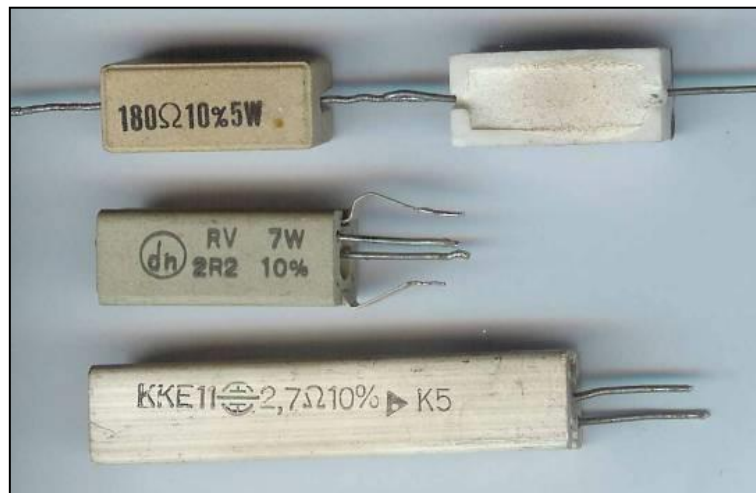
De par sa conception, elle possède en plus une certaine self-induction (bobine). Elle est moins bruyante que la résistance agglomérée et celle à couche de carbone. Elle est, en général, plus précise et a un coefficient de température moindre mais elle est plus chère.



La résistance bobinée de puissance

La résistance bobinée est une résistance de puissance, en général, constituée d'un support cylindrique en céramique (ou autre) sur lequel a été bobiné en spires non jointives un fil résistant. De part sa construction, ce type de résistance est dotée d'une caractéristique inductive importante ce qui ne la prédestine qu'à une utilisation aux basses fréquences.

On trouve plusieurs technologies des résistances bobinées.



La résistance de précision

L'utilisation de ce type de résistance est nécessaire pour effectuer des mesures ou une polarisation de précision. On trouve des résistances avec une précision de 1%, 0,1% et 0,01%.



La résistance montée en surface – CMS

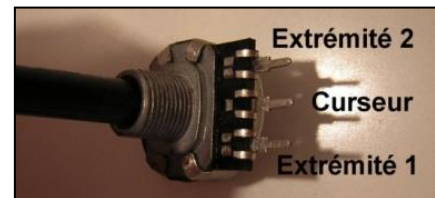
Ce sont des composants miniatures, sans fils de connexion, et directement soudés sur le circuit imprimé. Ces résistances permettent une intégration importante (gain de place) et sont recommandées dans le domaine des (très) hautes fréquences du fait d'une inductance parasite très faible (dimensions réduites sans fils de connexion). Par contre, elles sont difficiles à manipuler et à souder si on ne dispose pas du matériel adéquat.



La résistance ajustable – potentiomètre ajustable

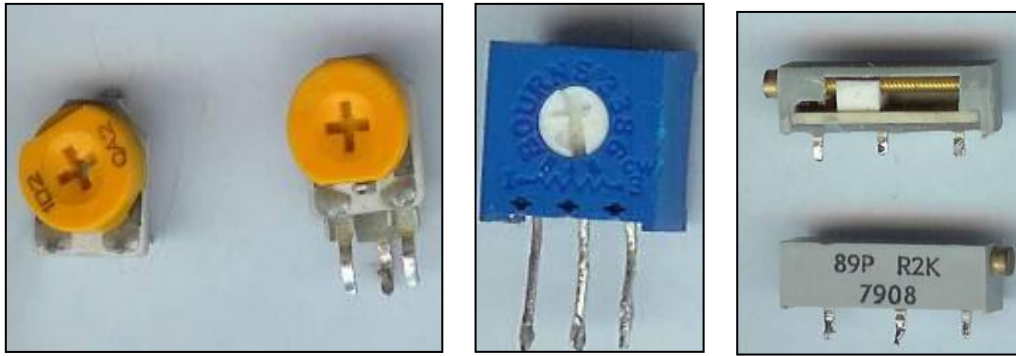
La résistance ajustable ou le potentiomètre ajustable (Trimmer en Anglais) est un composant dont on peut faire varier la valeur de sa résistance en déplaçant un curseur sur une piste résistante en carbone ou en métal.

Le potentiomètre ajustable possède 3 connexions externes. Il peut être considéré comme un diviseur de tension. En réunissant le curseur à une des 2 autres connexions externes on réalise une résistance ajustable.



Différents types de résistances et potentiomètres ajustables :





2.2 Les Condensateurs

Le condensateur, dans son principe, est constitué de deux plaques métalliques (aluminium, cuivre, etc.) appelées aussi armatures et montées en vis-à-vis et isolées par un isolant appelé diélectrique. Le condensateur fonctionne grâce à l'effet électrostatique entre ses deux armatures (ou lames).

Exemple d'un condensateur à air avec des armatures planes :

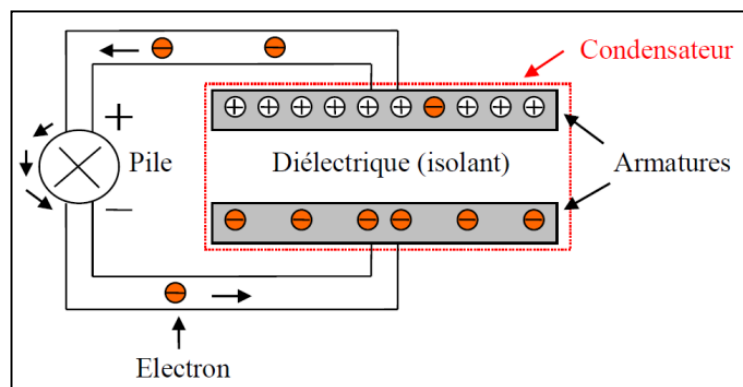
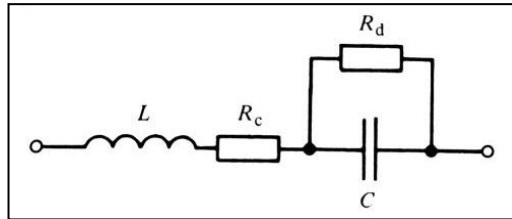


Figure 1.3 : principe d'un condensateur

Le condensateur idéal dont le comportement n'est décrit que par la capacité n'existe pas réellement. La technologie utilisée pour fabriquer un condensateur et les éléments parasites affectent le condensateur d'effets résistifs et inductifs. Ces effets changent le comportement du condensateur surtout en haute et très haute fréquences.

Le schéma réel d'un condensateur :



2.2.1 Principales caractéristiques

Capacité nominale : valeur de la capacité en farad [F] pour laquelle le condensateur a été conçu.

Tolérance : écart admissible sur la valeur nominale, elle n'a pas d'unité mais s'exprime en %.

Tension nominale : valeur de la tension continue qui peut être appliquée au condensateur en régime permanent.

Courant de court-circuit ou ISC : Le courant de court-circuit (ISC = Intensity Short Circuit) désigne le courant maximal qui peut circuler quand le condensateur est chargé et que ses électrodes sont mises en court-circuit franc. Ce courant peut atteindre plusieurs ampères ou plusieurs dizaines d'ampères.

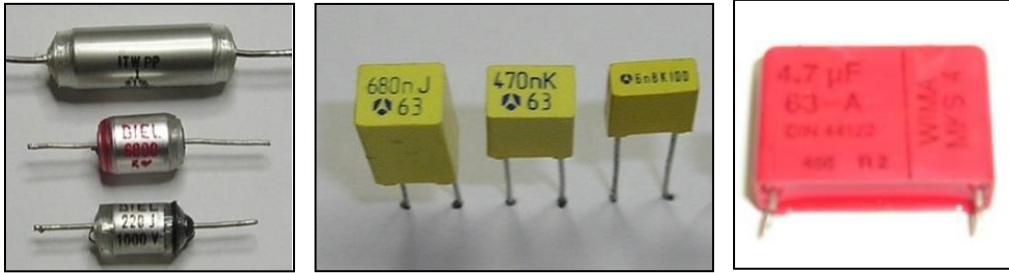
2.2.2 Les différents types de condensateur

Le condensateur non polarisé. On trouve entre autres dans cette catégorie :

- a. le condensateur céramique (terme générique),



- b. Le condensateur à film plastique (terme générique) :

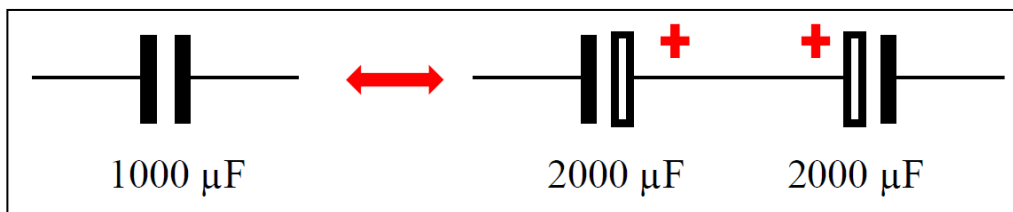


c. Le condensateur mica argenté,



Le condensateur non polarisé réalisé avec 2 polarisés

Parfois, il est utile/nécessaire de monter un condensateur non polarisé de forte capacité pour réaliser une liaison entre 2 étages et malheureusement de ne pas en disposer. Il est possible de réaliser un condensateur non polarisé en reliant en tête-bêche 2 condensateurs polarisés de même capacité et double de celui à réaliser (les connexions marquées + sont reliées ensemble).



Le condensateur polarisé électrochimique / électrolytique



Le condensateur au tantale



2.2.3 Précautions d'emploi :

Le condensateur polarisé (électrolytique / électrochimique) avec 2 connexions dont l'une repérée par le signe + par le fabricant doit être reliée à une tension plus positive que celle sur l'autre connexion repérée par un signe -. Il ne faut surtout pas inverser le raccordement des deux connexions sous peine de destruction du condensateur (explosion ou surchauffe).

Une caractéristique à prendre en compte dans les alimentations à découpage est la résistance équivalente série (ESR) qui doit être le plus faible possible $< 1 \text{ Ohm}$. L'intensité du courant est aussi souvent indiquée sur le boîtier.

La température de fonctionnement est à prendre en compte car l'électrolyte (en général liquide) risque de sécher prématurément et diminuer les caractéristiques du condensateur : la capacité diminue, l'ESR augmente.

2.3 Les Bobines et les Transformateurs

La bobine est un composant passif non polarisé (indépendant du sens du courant qui la traverse, ce qui n'est pas le cas des diodes et de certains condensateurs).

Une bobine est constituée d'un enroulement d'un fil conducteur (ou de plusieurs) à spires jointives ou non, en une ou plusieurs couches sur un support ou non.

La bobine fonctionne grâce à ses propriétés électromagnétiques. En effet, le courant qui parcourt la bobine génère un champ électromagnétique autour et à l'intérieur des spires.

L'inductance d'une bobine dépend de la forme de la bobine, de sa section (donc du carré de son diamètre) et du carré du nombre de ses spires.

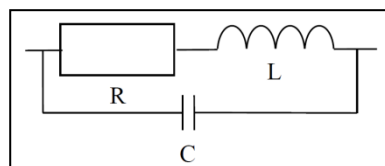
L'inductance de la bobine augmente en introduisant un noyau magnétique à l'intérieur des spires, ce qui augmente artificiellement la section de la bobine. Le noyau est constitué de différents matériaux (feuille de tôle, ferrite, poudre ferromagnétique).

2.3.1 Pertes dans une bobine réelle

Une bobine ne présente jamais une inductance propre pure. Les pertes proviennent de plusieurs causes :

- résistance ohmique du fil enroulé autour du noyau,
- pertes par hystérésis proportionnelles à la fréquence du courant qui traverse la bobine,
- perte par courants de Foucault proportionnelles au carré de la fréquence du courant qui traverse la bobine,
- Les capacités entre spires ne sont plus pas négligeables à haute fréquence.

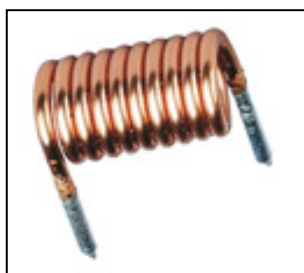
Le schéma réel d'une bobine est la suivante :



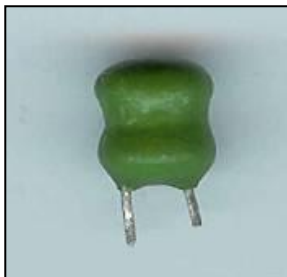
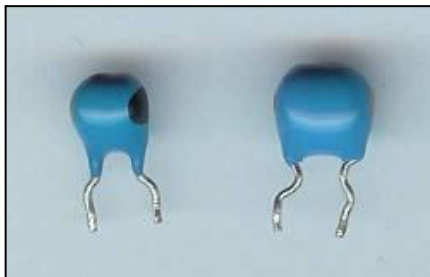
2.3.2 Les différents types de bobine

La bobine à air

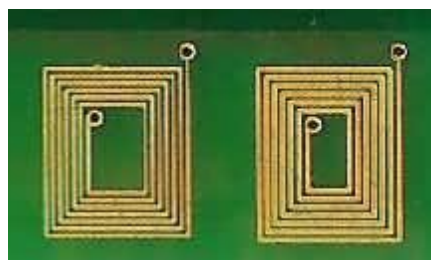
Bobine à air à spires jointives ou non jointives à une ou plusieurs couches.



La bobine moulée et la bobine de choc



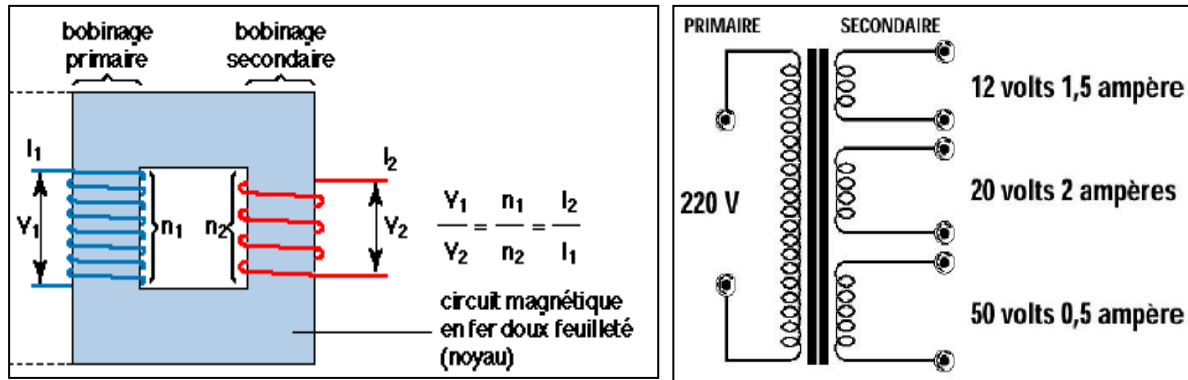
La bobine imprimée



2.3.3 Les Transformateurs

Un transformateur est un appareil qui permet de convertir une tension alternative donnée en une autre tension alternative, en augmentant ou en abaissant sa valeur, sans en changer la fréquence. Contrairement à l'autotransformateur, un transformateur possède une isolation galvanique entre son entrée (primaire) et sa sortie (secondaire), c'est à dire qu'aucun conducteur électrique ne relie les deux parties.

Il est doté d'un ou plusieurs enroulements (bobinage) primaires, et d'un ou plusieurs enroulements secondaires. Le principe de fonctionnement repose sur le transfert d'énergie par mutuelle inductance (induction électromagnétique) : le courant alternatif qui parcourt l'enroulement primaire crée un champ magnétique, qui est "capté" par l'enroulement secondaire qui le retransforme alors en courant. Le rapport de transformation est lié au nombre de spires de l'enroulement primaire, par rapport au nombre de spires de l'enroulement secondaire.



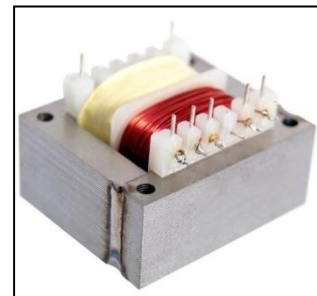
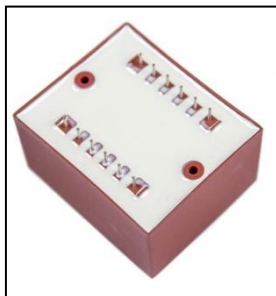
Plusieurs secondaires capables de débiter des tensions et des courants différents peuvent être présents à l'intérieur d'un même transformateur.

Il existe plusieurs sortes de transformateurs,

Transformateur d'alimentation secteur

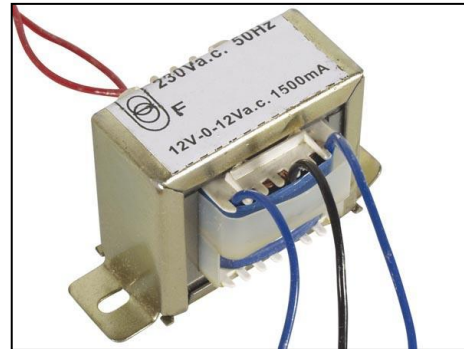
Il existe plusieurs types de transformateurs secteur : transformateurs ordinaires, à étrier ou à souder directement sur un circuit imprimé, transformateurs toriques, transformateurs de type "R".

Transformateurs à souder sur circuit imprimé



Les Transformateurs à étrier :

Pour les transformateurs à étrier les deux bobines se superposent et le plus souvent le primaire est en bas.



Transformateurs toriques

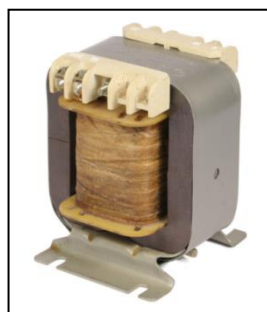


Transformateurs de type "R"



Transformateur d'isolement

Un transformateur crée une isolation galvanique entre son primaire et son secondaire, cette propriété est utilisée tout spécialement dans les transformateurs d'isolement. Ils servent à assurer la sécurité d'une installation en protégeant des électrocutions par exemple.



Transformateurs de mesure de courant



2.3.4 Précaution d'emploi

Il ne faut pas dépasser en valeur instantanée la valeur maximale de l'intensité prescrite par le constructeur. En cas de dépassement, même très bref, on risque de " saturer " le circuit magnétique, ce qui provoque une diminution de la valeur de l'inductance pouvant entraîner une surintensité.

2.3.5 Protection contre les surtensions

L'inductance a comme propriété essentielle qu'on ne peut pas rompre brutalement le courant qui la traverse. Elle assure une continuité de courant. Pour l'inductance, la rupture brutale du courant (di/dt très élevé) entraîne une surtension dangereuse pour les composants électroniques qui sont autour.

$$v_L(t) = L \cdot \frac{di}{dt}$$

Pour éviter les surtensions, il faut protéger les circuits en prévoyant un chemin pour le courant de la bobine lorsque le circuit inductif s'interrompt.

Dans la pratique on place une diode (D, dite diode de roue-libre) en parallèle pour la continuité du courant électrique dans l'inductance. Pour accélérer la démagnétisation on peut ajouter une diode zener ou une diode Transil.

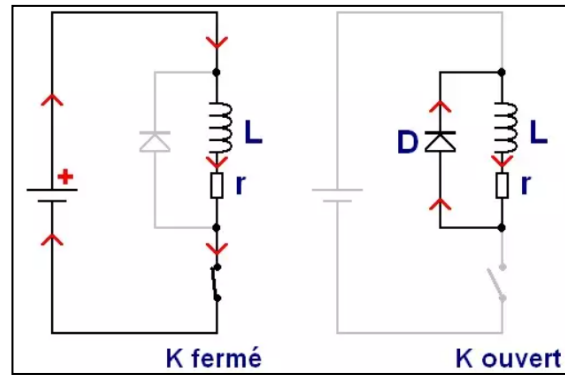


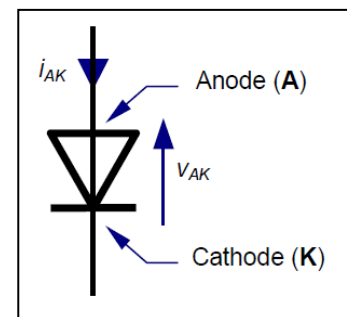
Figure 1.4 : Diode de roue libre en parallèle avec l'inductance

3. Composants actifs

3.1 Les diodes

La diode est un composant actif à semi-conducteur de type polarisé qui ne laisse passer le courant que dans un sens indiqué arbitrairement par une flèche. Les diodes sont formées de deux cristaux semi-conducteurs en Silicium ou en Germanium accolés et dopés N et P d'où la notion de la jonction P-N.

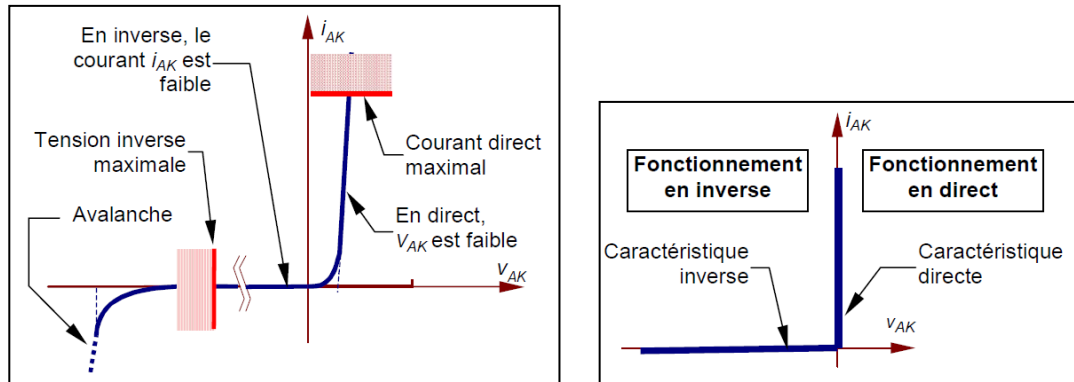
La diode n'est pas réversible en courant et le courant électrique ne circule que dans le sens P (Anode A) $\rightarrow$ N (Cathode K). Elle n'est pas réversible en tension et ne supporte qu'une tension anode-cathode négative ($v_{AK} < 0$) à l'état bloqué.



Une diode se comporte comme un interrupteur parfait dont les commutations sont exclusivement spontanées :

- il est fermé ON tant que le courant qui le traverse est positif.
- il est ouvert OFF tant que la tension à ses bornes est négative.

Le fonctionnement réel est toujours caractérisé par ses deux états passant (En direct) et bloqué (En inverse) :



Le modèle utilisé pour les études de fonctionnement en électronique de puissance est la diode parfaite à deux segments.

3.1.1 Critères de choix d'une diode

Les critères essentiels pour le choix d'une diode sont :

- Courant direct moyen : IFMoy (F pour forward=Direct)
- Courant direct efficace (et/ou) : IRMS (RMS pour Root mean Square)
- Courant direct maximal répétitif : IFRM (R pour repetitive)
- Tension inverse maximale répétitive : VRRM

3.1.2 Protection du composant

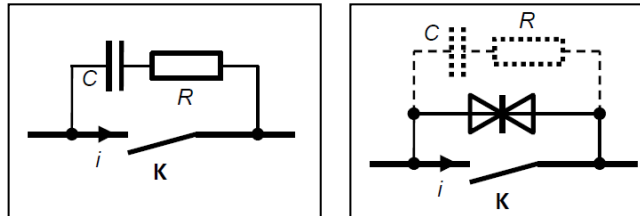
Protection contre les surintensités

Cette protection est assurée par un fusible ultra rapide (UR) dont la contrainte thermique ($I^2.t$) est plus faible que celle de la diode. (Il fond avant la diode.). La désignation est FF (very fast), dont le temps de coupure est inférieur à 1 ms ;



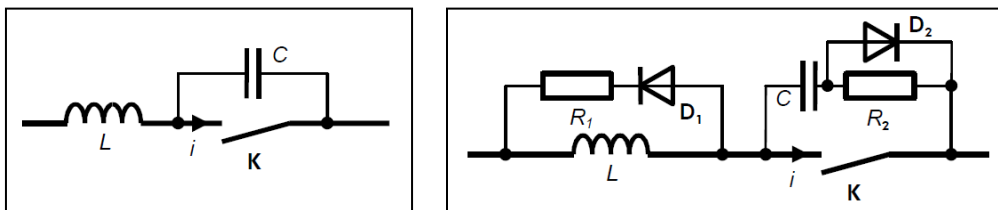
Protection contre les surtensions

Les surtensions peuvent être atténuées en insérant un circuit RC-série en parallèle avec le commutateur ou un élément non linéaire supplémentaire, la diode transil : placée en parallèle avec l'élément ou en tête de l'installation, elle dissipe l'énergie de la surtension.



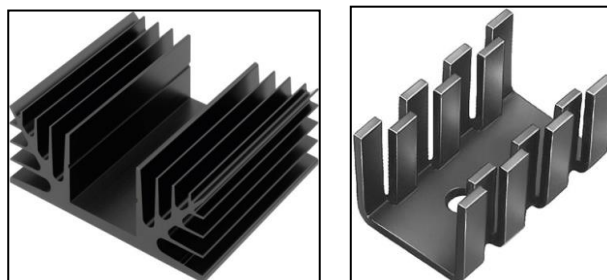
Protection en dv/dt et di/dt

Les semi-conducteurs sont très sensibles aux variations brutales de tension et de courant qui apparaissent lors des commutations. Contre les variations de courant, on utilise une inductance (qui retarde le courant) tandis que le condensateur retarde la tension. Pour amortir les oscillations induites par le circuit LC, les circuits d'aide à la commutation (CALC) ou adoucisseurs sont insérés.



Protection thermique

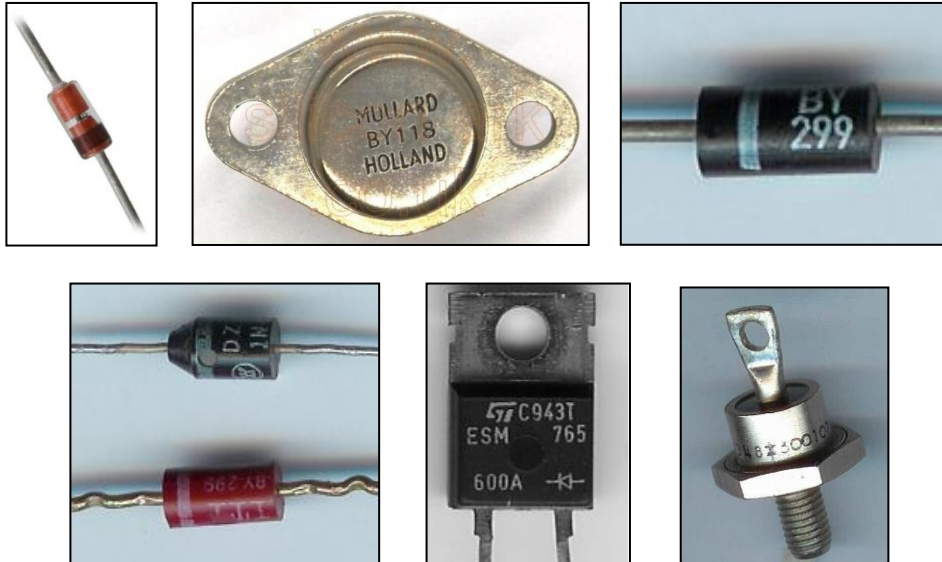
En fonctionnement normal, la jonction PN encoure le risque d'atteindre une température trop élevée. Pour palier cet inconvénient, le composant est protégé par un dissipateur thermique ou radiateur pour assurer l'évacuation de l'énergie thermique.



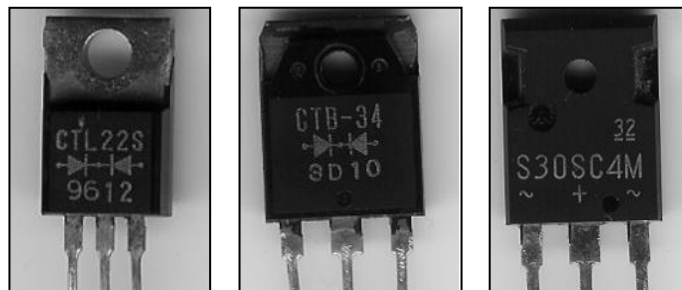
3.1.3 Technologies des diodes

Il y a un très grand nombre de boîtiers pour les diodes. En particulier on présente ci-dessous les formes les plus courantes :

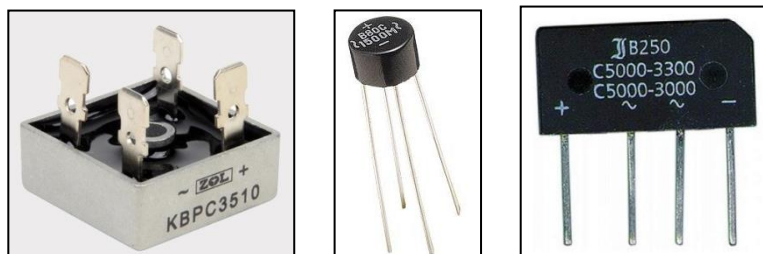
Diodes de redressement.



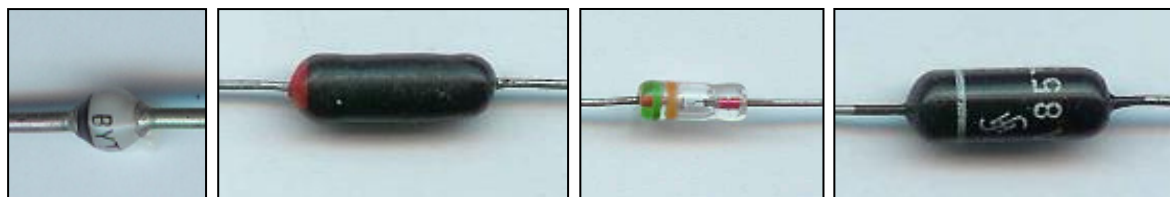
Diodes doubles.



Pont de diodes



Autres types.



3.2 Les Thyristors.

Un thyristor (parfois dénommé SCR (Silicon Controlled Rectifier)) est un interrupteur électronique semi-conducteur à l'état solide constitué de quatre couches, alternativement dopées N et P. C'est un des composants essentiels de l'électronique de puissance. La structure en couches P-N-P-N du thyristor peut être modélisée par deux transistors PNP et NPN connectés selon le schéma ci-dessous.

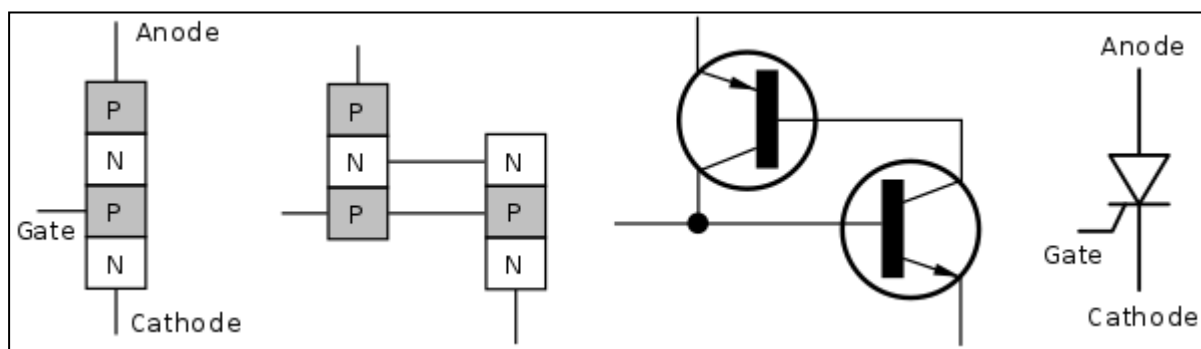


Figure 1.5 : Modélisation physique et électronique d'un thyristor, ainsi que son symbole.

Un thyristor a trois états possibles :

Thyristor amorçable

- $v_{AK} > 0$ et $i_{AK} \approx 0$ (Interrupteur ouvert)

Thyristor bloqué (OFF)

- Comme une diode : $i_{AK} \approx 0$ et $v_{AK} < 0$ (Interrupteur ouvert)

Thyristor passant (ON)

- Comme une diode : $i_{AK} > 0$ et $v_{AK} \approx 0$ (Interrupteur fermé)

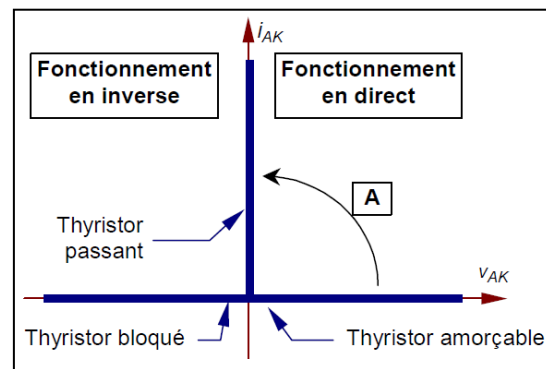
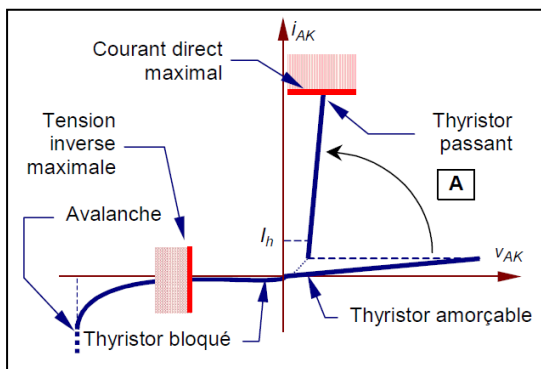
Changements d'états ou commutations entre les deux états stables bloqué ou passant sont :

Amorçage (A) : Transition OFF-ON

- Courant de gâchette $i_G > 0$ quand $v_{AK} > 0$

Blocage : Transition ON-OFF

- Spontané : quand i_{AK} s'annule.
- Forcé : par application d'une tension négative aux bornes du thyristor, provoquant donc son extinction.



Une autre fois le modèle utilisé en électronique de puissance est le modèle parfait de trois segments.

3.2.1 Critères de choix d'un thyristor

Les critères essentiels pour le choix d'un thyristor sont les mêmes que la diode :

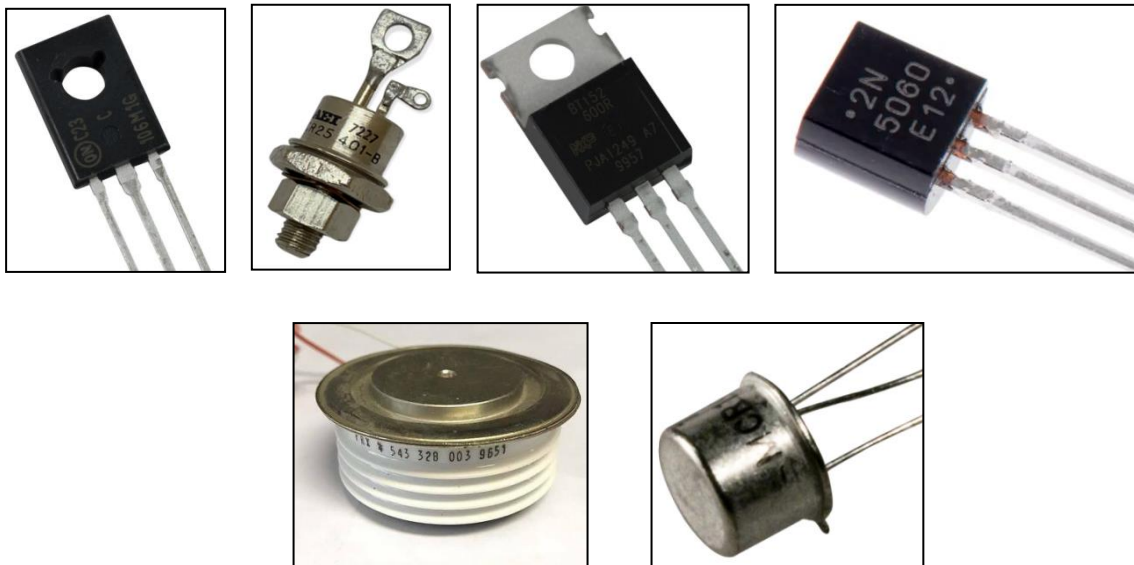
- Courant direct moyen : I_{FMoy}
- Courant direct efficace (et/ou) : I_{RMS}
- Courant direct maximal répétitif : I_{FRM}
- Tension inverse maximale répétitive : V_{RRM}

3.2.2 Protections des thyristors

Les mêmes protections que la diode. Le dimensionnement sera traité comme si le thyristor était dans les pires conditions de conduction, lorsqu'il est passant en permanence, donc équivalent à une diode.

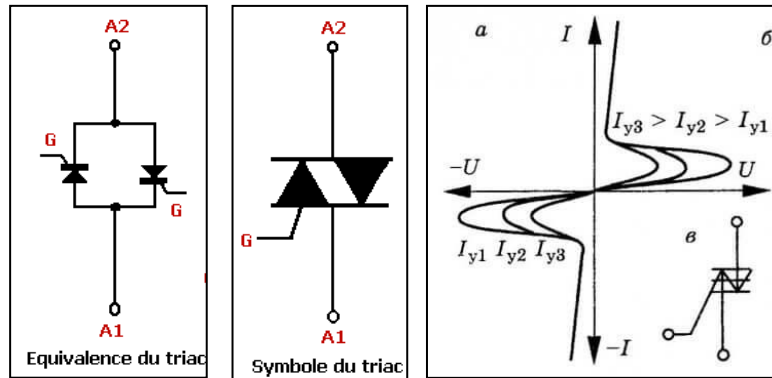
3.2.3 Technologies des thyristors

Les thyristors sont présentés sous différentes formes de boîtiers, suivant les références et la puissance de ces composants. Ci-dessous les formes les plus habituelles.



3.3 Les Triacs

Le triac (de l'anglaise Triode for alternating current) est un composant électronique équivalent à la mise en parallèle de deux thyristors montés tête-bêche (l'anode de l'un est reliée à la cathode de l'autre, les gâchettes respectives étant commandées simultanément).



Contrairement au thyristor qui ne peut conduire que dans un sens, le triac peut conduire dans les deux sens. Il est bidirectionnel, alors que le thyristor est unidirectionnel. La caractéristique tension-courant est symétrique.

Les trois électrodes du triac sont dénommées gâchette (G, électrode de commande), et A1 et A2 (pour Anodes 1 et 2) ou, en anglais, MT1 et MT2 (Main Terminals).

Le principe de fonctionnement du triac dans un sens est celui d'un thyristor. Un courant de commande très faible (environ 50 mA) déclenche le triac, qui reste amorcé jusqu'au passage par zéro de la sinusoïde secteur.

Remarque :

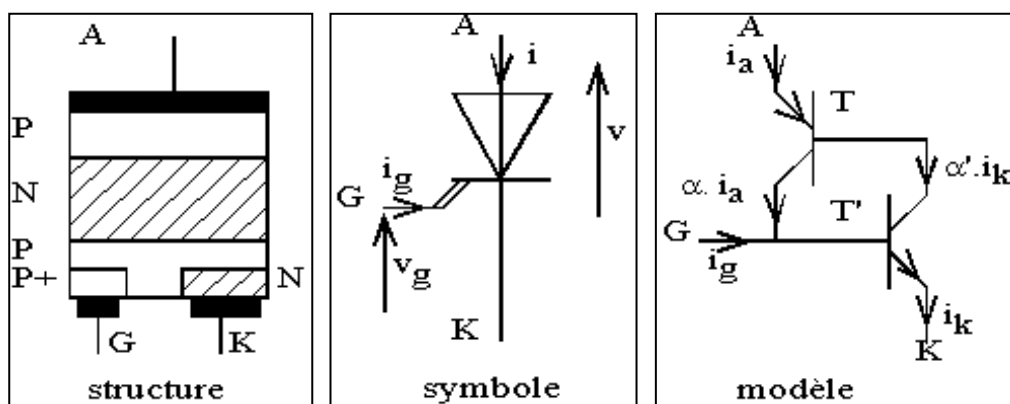
Les critères de choix, les protections et les technologies des triacs sont les mêmes que les thyristors.

3.4 Les Thyristors GTO

Le thyristor a l'avantage de pouvoir contrôler des puissances élevées avec une commande consommant une faible puissance. Il a l'inconvénient d'être lent particulièrement au blocage et n'est pas commandé à l'ouverture. Dans tous les montages où le thyristor ne fonctionne pas en blocage naturel (Exemple dans les hacheurs et les onduleurs), il est nécessaire d'inclure des circuits de blocage forcé ce qui complique l'exploitation.

Le thyristor blocable par la gâchette ou GTO pour Gate Turn Off permet de pallier ces défauts. Il est un composant commandé à la fermeture et à l'ouverture.

La structure est semblable à celle du thyristor et peut être modélisée par deux transistors T de type PNP et T' de type NPN.



3.4.1 Fonctionnement du thyristor GTO

Amorçage

Un thyristor GTO est amorcé de la même manière que le thyristor ordinaire :

- Tension anode-cathode est positive $V_{AK} > 0$;
- Et on injecte une impulsion de courant gâchette-cathode.

La commande de l'amorçage par la gâchette doit être énergique et donc le courant de gâchette peut être de quelques ampères. Une fois la conduction amorcée, elle se maintient, et la gâchette doit être alimentée de manière permanente par un courant I_G . Ce courant permet de réduire la chute de tension directe à l'état passant aux bornes du GTO.

Blocage

Le blocage du thyristor GTO peut se faire de deux façons :

1. par interruption naturelle du courant principal I_{AK} ($I_{AK} = 0$), ce qui se produit par exemple à chaque alternance s'il est utilisé sous tension alternative ;
2. par interruption forcée, obtenue en appliquant une tension négative sur la gâchette, par un circuit appelé "extracteur de charges". En effet, l'application d'une tension négative V_{GK} fait apparaître un courant de gâchette négatif bloquant le GTO.

Ce courant à extraire est important, environ $I_{AK}/5$ (par exemple, pour couper 600 A, il faut extraire un courant de gâchette de 120 A environ) et doit être appliqué pendant un temps minimal de blocage (typiquement 100 μs), ce qui complique le circuit d'extinction et limite la fréquence de commutation du GTO.

Remarque :

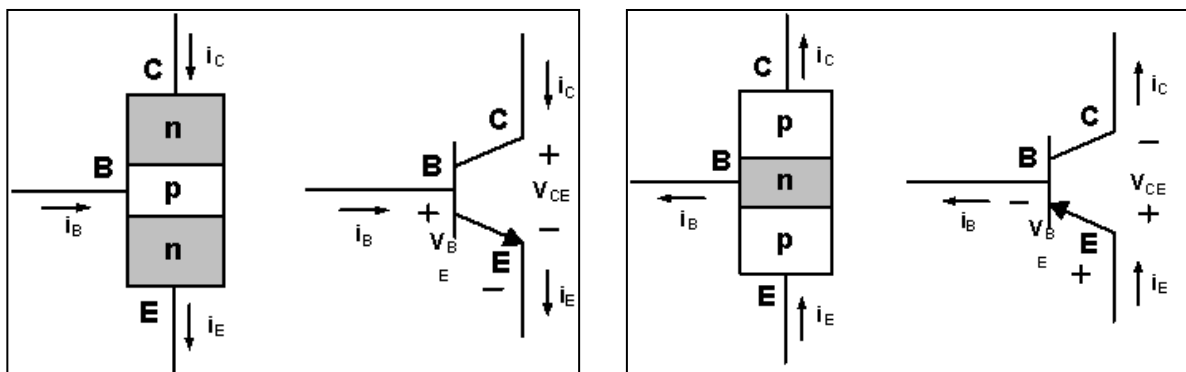
Comme pour les triacs, les critères de choix, les protections et les technologies des triacs sont les mêmes que les thyristors.

3.5 Les transistors bipolaires.

Un transistor bipolaire est un dispositif électronique à base de semi-conducteur. Son principe de fonctionnement est basé sur deux jonctions PN.

Le transistor bipolaire est un semi-conducteur présentant trois zones de dopage différentes N, P et N, ou P, N et P. La zone du milieu, très mince (faiblement dopée), constitue la base. Les deux extrémités, constituent l'émetteur (fortement dopé) et le collecteur (peu dopé).

Le transistor est un composant totalement commandé : à la fermeture et à l'ouverture. Il n'est pas réversible en courant, ne laissant passer que des courants de collecteur i_C positifs. Il n'est pas réversible en tension, n'acceptant que des tensions V_{CE} positives lorsqu'il est bloqué.



Parmi les deux types, NPN et PNP, le transistor de puissance existe essentiellement dans la première catégorie.

3.5.1 Fonctionnement et états du transistor

Le transistor possède deux types de fonctionnement : le mode en commutation (ou non linéaire) employé en électronique de puissance et le mode amplification (linéaire) utilisé en amplification de signaux.

Le transistor se comporte comme une source de courant i_C commandée par le courant i_B (avec $i_C = \beta \cdot i_B$). La tension v_{CE} est imposée par le circuit extérieur.

Le transistor peut être dans deux états différents :

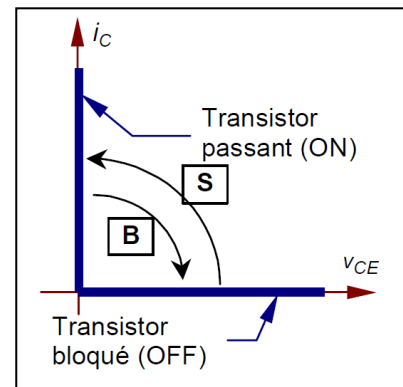
Transistor bloqué (B) ou OFF : L'équivalent est un interrupteur ouvert. Le transistor bipolaire est bloqué lorsque le courant de base I_B est nul.

- $I_B = 0A \Rightarrow I_C = 0A$;
- $V_{CE} > 0$ (est imposée par le circuit extérieur)

Transistor saturé (S) ou ON : L'équivalent est un interrupteur fermé. Le transistor bipolaire est saturé lorsque le courant de base I_B est non nul (supérieur à un courant minimal de saturation I_{BSAT}).

- $I_B > 0 \Rightarrow I_C > 0$;
- $V_{CE} = 0$;

Le transistor bipolaire de puissance est un composant deux segments en raison de la forme de sa caractéristique.

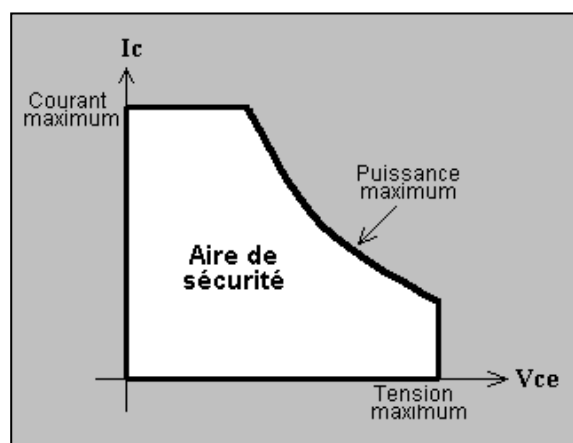


3.5.2 Composant réel et limites de fonctionnement

Le composant réel subit quelques différences par rapport à l'élément parfait.

A l'état saturé

- Le transistor est limité en puissance :
courbe limite dans le plan (v_{CE} , i_C),
l'hyperbole de dissipation maximale ;
- Le courant moyen de collecteur est
limité par un courant maximal (I_{Cmax}).
- La tension v_{CE} n'est pas tout à fait nulle
(= $V_{CEsat} > 0$).



A l'état bloqué

- La tension v_{CE} ne peut dépasser une tension maximale qui provoquerait le claquage de la jonction ;
- Un courant résiduel dû aux porteurs minoritaires circule dans le collecteur ($I_C = I_{C0}$).

3.5.3 Critères de choix d'un transistor

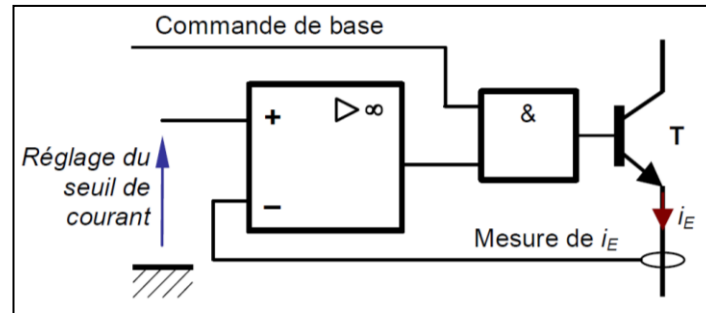
Le choix d'un transistor (au premier ordre) se fera en considérant les paramètres suivants :

- Le V_{CEMax} que peut supporter le transistor.
- Le courant de collecteur maxi I_{CMax} .
- La puissance maxi que le transistor aura à dissiper ($P_{tot} = V_{CE} \times I_C$).
- Le gain en courant β ou h_{FE} .
- Si on utilise le transistor en commutation, la tension de saturation $V_{CEsatmax}$ sera un critère de choix essentiel.

3.5.4 Protection du composant

Les protections des composants restent les mêmes que précédemment sauf pour les courts circuits. Les fusibles ne sont pas suffisamment rapides pour protéger les transistors. En effet ceux-ci claquent très rapidement lorsque le courant dépasse I_{CMax} .

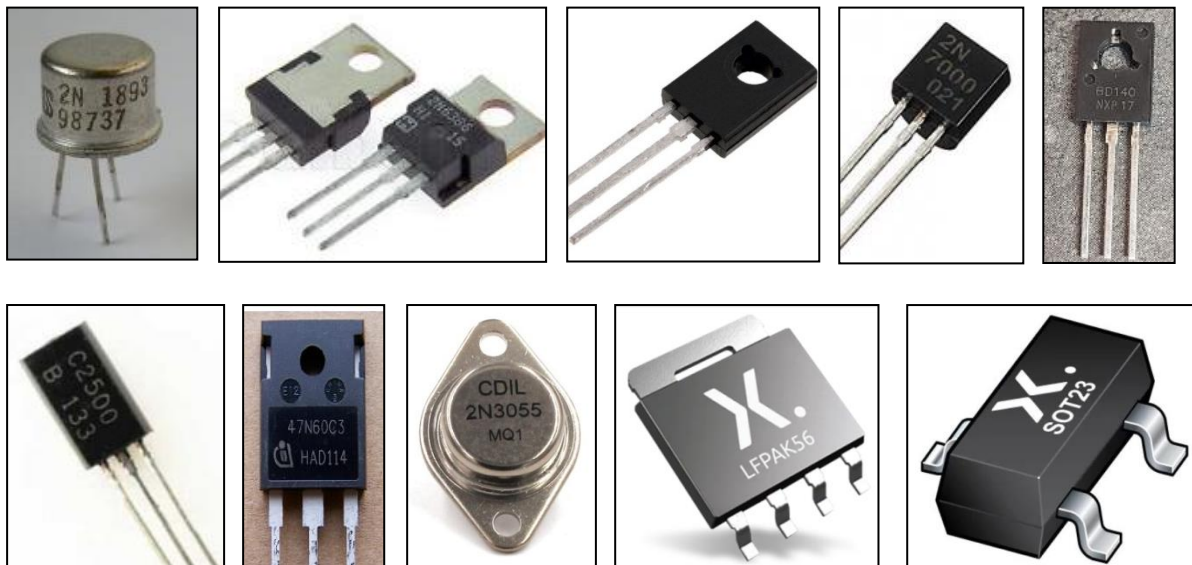
La protection est donc assurée par l'intermédiaire d'un circuit électronique qui mesure i_C ou i_E en permanence et interrompt la commande en cas de danger.



Remarque : Pour la protection thermique par radiateur, le plan de montage des transistors de puissance présente une surface métallique sur laquelle est soudé le semi-conducteur à l'intérieur du composant. La résistance thermique de la liaison métallique est faible et facilite ainsi le refroidissement.

3.5.5 Technologies des transistors bipolaires

Il existe plus que 200 types de boîtiers de base plus ou moins différent suivant le fabricant pour les transistors, mais beaucoup sont très peu utilisé. Voici les principaux boîtiers.



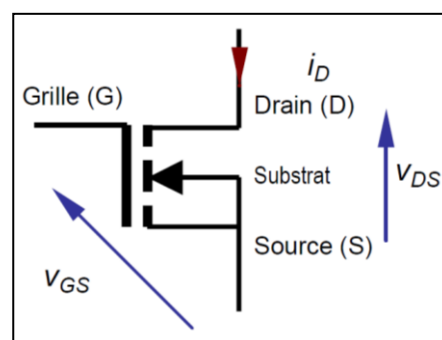
3.6 Les transistors MOSFET,

Le transistor bipolaire présente des Inconvénients : pilotage en courant (pas en tension), courant de base non nul donc consommation non nulle (ces phénomènes sont très problématiques pour la carte de commande) et risque d'emballement thermique.

On souhaite un autre type de transistor : à consommation d'énergie très réduite en commutation, pilotable en tension et sans risque d'emballement thermique. D'où le développement du transistor MOSFET.

Comme le transistor bipolaire, Le MOSFET, présente trois broches :

- La source (équivalente de l'émetteur).
- Le drain (équivalent du collecteur).
- La grille, qui correspond à la base, est l'organe de commande.



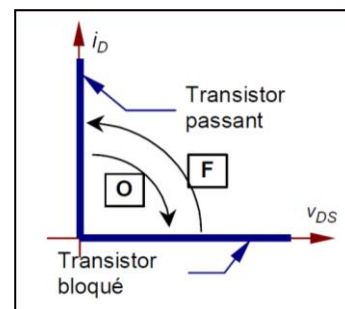
Le MOSFET est un transistor à effet de champ qui se spécifie par le fait que la grille est isolée du canal. Donc, contrairement au bipolaire, aucun courant ne passe au travers de la grille.

La jonction drain-source est alors assimilable à une résistance très faible (R_{DSon} = quelques $m\Omega$). On bloque le MOSFET en annulant V_{GS} , (R_{DS} devient alors très élevée).

Le transistor MOS est un composant totalement commandé à la fermeture et à l'ouverture. C'est le composant le plus rapide à se fermer et à s'ouvrir. Il est classiquement utilisé jusqu'à 300 kHz, voire 1 MHz. C'est un composant très facile à commander. Il est rendu passant grâce à une tension V_{GS} positive (de l'ordre de 7 V à 10 V).

3.6.1 Fonctionnement et modèles du composant parfait

Transistor ouvert (O) : état obtenu en annulant la tension V_{GS} de commande, procurant une impédance drain source très élevée, ce qui annule le courant de drain i_D . La tension V_{DS} est fixée par le circuit extérieur. L'équivalent est un commutateur ouvert.



Transistor saturé (F) : une tension VGS positive rend RDS très faible et permet au courant i_D de croître. L'équivalent est un commutateur fermé.

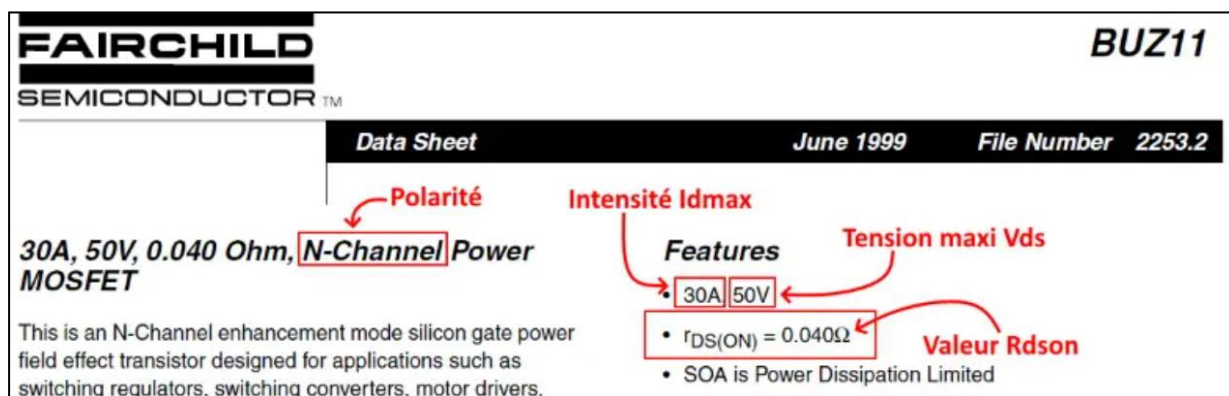
3.6.2 Critères de choix d'un transistor MOSFET

Les principales valeurs caractéristiques qui favorisent le choix d'un modèle de Mosfet plus qu'un autre, sont :

- La polarité du mosfet (canal N ou P)
- Le courant de drain maxi (I_{dmax})
- La tension V_{dsmax} supportable
- La résistance R_{dson} maximale

Ce sont d'ailleurs les valeurs qu'on retrouve toujours en tête des datasheet, fournis par les fabricants.

Exemple : extrait d'un datasheet (mosfet BUZ11) présentant ces critères essentiels.



FAIRCHILD SEMICONDUCTOR™ **BUZ11**

Data Sheet **June 1999** **File Number 2253.2**

30A, 50V, 0.040 Ohm, N-Channel Power MOSFET

This is an N-Channel enhancement mode silicon gate power field effect transistor designed for applications such as switching regulators, switching converters, motor drivers.

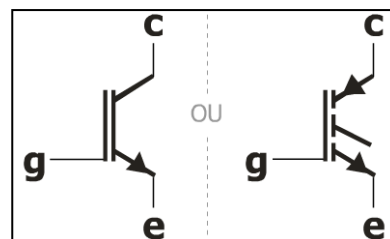
Features

- 30A 50V
- $r_{DS(ON)} = 0.040\Omega$
- SOA is Power Dissipation Limited

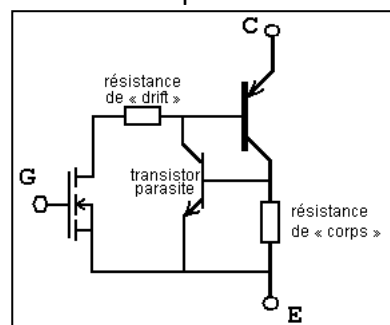
Ensuite viennent toutes les caractéristiques secondaires, permettant d'affiner le choix. On parle ici essentiellement des critères dynamiques qui deviennent importante si on augmente la fréquence de commutation. Les temps de commutation doivent être très inférieurs à la période de découpage.

d'une combinaison entre ces deux types de composants pour aboutir à l'IGBT (Insulated Grille Bipolar Transistor).

L'IGBT présente aussi trois broches : La Grille (organe de commande), un Collecteur et un Emetteur.



L'IGBT, donc, est un transistor hybride, regroupant un transistor à effet de champ du type MOSFET en entrée et un transistor bipolaire en sortie. Il est ainsi commandé par la tension de grille (entre grille et émetteur) qui lui est appliquée, mais ses caractéristiques de conduction (entre collecteur et émetteur) sont celles d'un bipolaire. Le schéma équivalent du transistor IGBT est ci-contre :



Cette structure lui donne la faible puissance de commande d'un MOSFET, avec les faibles pertes de conduction d'un bipolaire. Ses caractéristiques sont reprises de celles du transistor bipolaire : V_{CEsat} et i_{Csat} . Cependant, les IGBT peuvent gérer une tension bien plus élevée que celle gérée par les MOSFET.

L'IGBT présente l'inconvénient d'un blocage moins rapide que le MOSFET, ce qui limite sa fréquence de commutation à quelques dizaines de kHz.

3.7.1 Critères de choix d'un transistor IGBT

La tension maximale de VCE et le courant maximum IC sont les principales caractéristiques du composant et peuvent varier considérablement entre les différentes références.

Les principales valeurs caractéristiques à prendre en considération lors du choix d'un transistor IGBT sont :

- La tension maximale VCE MAX
- Le courant maximum IC MAX
- La tension de commande VGE

- La puissance totale dissipée PTOT

3.7.2 Protection des transistors IGBT.

Les IGBT sont des composants d'une grande fiabilité, cependant comme tous les semi-conducteurs, ils sont très sensibles aux surcharges.

Protection contre les surtensions :

- Surdimensionner les IGBT, le coefficient adopté est d'environ 2.
- Monter des circuits écrêteurs en parallèle sur les IGBT (résistances non-linéaires, diodes TRANSIL).

Protection contre les surintensités :

- Utiliser des fusibles à action rapide.
- Mesurer les paramètres significatifs par l'intermédiaire d'un circuit électronique qui interrompt la commande en cas de danger.

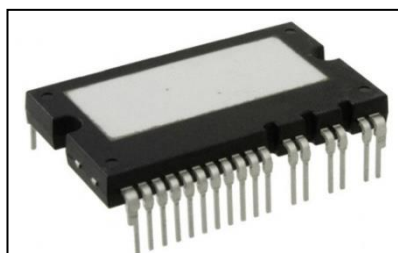
Protection thermique :

La principale cause de destruction de l'IGBT est thermique. La solution la plus simple, c'est la mesure de la température du radiateur de refroidissement. Si la température du dissipateur dépasse une valeur donnée, le driver ouvre l'IGBT et envoie une information de défaut.

3.7.3 Technologies des transistors IGBT

Les IGBT aussi partagent les mêmes boîtiers que les bipolaires et MOSFET que nous avons vu plus haut.

En plus on trouve les boîtiers des modules suivants:





Méthodes de dépannage en électronique de puissance

1. Introduction.

Dépanner un circuit électronique c'est vérifier le comportement des composants et proposer des solutions pour le réparer. Le comportement inattendu présenté par le circuit peut être dû à une localisation ou soudure incorrecte des composants, à des dommages aux composants dus au vieillissement, à des défauts, à une surchauffe, etc. Un tel type de comportement peut entraîner des résultats indésirables ou même endommager le circuit.

La meilleure façon pour maîtriser le dépannage, et être capable de résoudre les problèmes électroniques difficiles, c'est la manipulation pratique des circuits électroniques et l'apprentissage de l'utilisation correcte de divers outils de dépannage. Le dépannage nécessite aussi la connaissance du fonctionnement du circuit et de ses composants.

Dans ce chapitre on présente les principales méthodes de dépannage, qui sont utiles pour les débutants, comme pour les spécialistes. On rappelle les mesures de sécurité, on expose l'essentiel des appareils de dépannage et on formalise une procédure de recherche des pannes dans les circuits d'électronique de puissance.

2. SÉCURITÉ ET PRÉVENTION

La manipulation d'appareils électroniques implique souvent, même pour ceux alimentés par piles ou batteries, des investigations au cœur des circuits. Ceux-ci sont alimentés par des tensions parfois élevées qui peuvent provoquer brûlures ou électrocution. Un simple choc électrique, inoffensif en lui-même, peut s'avérer fatal pour un cœur fatigué ou malade. Il convient donc d'être très prudent en la matière et de respecter un minimum des règles de sécurité, que ce soit dans l'établissement de l'espace de travail ou lors de la manipulation des appareils.

2.1 Espace de travail sécurisé

La première précaution à respecter au niveau de l'espace de travail dédié à la réparation des appareils électriques ou électroniques sera d'utiliser une alimentation électrique aux normes et surtout d'éviter les bricolages qui peuvent se révéler dangereux. En particulier, on devra s'assurer de disposer :

1. d'une prise de terre efficace sur chaque prise ;
2. d'un nombre suffisant de prises électriques (éviter ainsi les prises multiples et les rallonges) ;
3. d'une protection par interrupteur ou disjoncteur différentiel (minimum 30 mA, voire 10 mA si possible) ;
4. d'une protection par disjoncteur modulaire (16 A ou moins) ;
5. d'un transformateur d'isolement (pas un autotransformateur qui n'isolait pas du réseau électrique) pour certaines manipulations particulières que nous évoquerons ;
6. d'un local non humide dans lequel vous disposerez d'une table de travail en matériau isolant et d'un sol non humide.

2.2 Poste de travail protégé contre les DES/EOS

Deux problèmes sont à prendre en considération lors de dépannage des circuits d'électronique de puissance : DES et EOS.

Décharge électrostatique (DES), c'est-à-dire un transfert rapide d'une charge électrique statique avec un potentiel différent créé par une source électrostatique. En contact avec ou tout près d'un composant, cette "DES" peut endommager le composant.

Tout dans notre environnement crée des transferts de charges. L'humidité de l'air ambiant apporte une grande importance dans l'accentuation ou la diminution des transferts de charge. Ce tableau montre les valeurs de charge générées par des actions simples.

Activité	10 à 20 % Humidité Relative	65 à 90% Humidité Relative
Marcher sur une moquette	35000 Volts	1500 Volts
Marcher sur un sol vinyl	12000 Volts	250 Volts
Ouverture d'un sac PE classique	20000 Volts	1200 Volts

Surcharge électrique (EOS), qui peut être la conséquence d'une mauvaise manipulation.

Un poste de travail protégé contre les DES/EOS empêche la détérioration des composants sensibles, par des pointes de tension et des décharges électrostatiques, pendant le déroulement des opérations. Les postes de travail protégés doivent inclure la prévention contre les détériorations EOS en évitant l'utilisation d'équipements produisant des pointes de tension. Les fers à souder, pompes à dessouder et instruments de test peuvent produire un niveau d'énergie suffisant pour détruire les composants extrêmement sensibles, et gravement détériorer les autres.

Ci-contre un exemple d'un poste de travail protégé contre les DES (EPA).

1. Bracelet antistatique personnel
2. Plateau, shunts, etc. de protection EOS
3. Dessus de table de protection EOS
4. Plancher ou tapis de protection EOS
5. Sol du bâtiment
6. Référence de mise à la terre
7. Mise à la terre

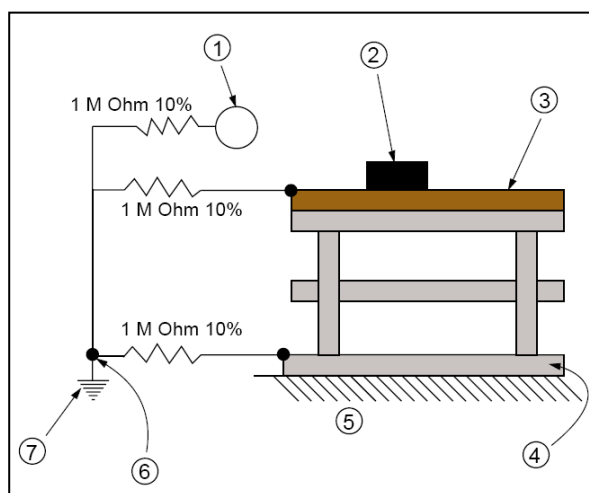


Figure 2.1 : poste de travail protégé contre les DES (EPA)

Pour la protection DES, il faut prévoir un chemin de mise à la terre afin de neutraliser les charges électrostatiques qui pourraient circuler vers un composant ou une carte électronique. Les postes de travail protégé contre les DES (EPA) comportent également des surfaces de travail antistatiques ou dissipant la statique, connectée à un point commun de mise à la terre. Il est également prévu de mettre à la terre la peau de l'opérateur, de préférence par un bracelet antistatique permettant l'élimination des charges produites sur sa peau ou ses vêtements.

2.3 Mesures de sécurité contre les dangers électriques

Avant toute intervention de dépannage le technicien doit se rappeler des mesures de sécurité ci-dessous.

1. Respecter les normes de sécurité en vigueur et les informations données par les constructeurs dans les manuels techniques.
2. Remplacer toujours les composants, critiques en termes de sécurité, par des composants certifiés conformes. L'utilisation des pièces de rechange ayant des spécifications différentes de celles d'origines, peut entraîner un risque d'électrocution, d'incendie ou autres (dans ce cas, la responsabilité du constructeur s'en trouverait déchargée). Il ne reste que la responsabilité du technicien.
3. Vérifier qu'aucun fil n'est coincé ou mal positionné. Il faut en particulier contrôler l'état du cordon d'alimentation.
4. Les éléments conducteurs doivent être parfaitement isolés du secteur et ne doivent pas pouvoir présenter de potentiels électrostatiques importants, désagréables pour l'utilisateur.
5. Toujours mettre l'appareil à l'arrêt et débrancher la prise secteur avant de couper, dessouder ou ouvrir l'appareil. Des petites intensités peuvent être dangereuses.
6. Après un essai sous tension secteur, certains condensateurs de forte capacité peuvent conserver une charge importante susceptible de provoquer de forts désagréments. Il est important d'être vigilant et de ne pas tenter une intervention sans être capable d'en estimer les conséquences.
7. Avant toute intervention, on prendra soin de décharger correctement ces condensateurs, en conformité avec les prescriptions des constructeurs. Une résistance de 100Ω à $1K\Omega$, isolée, peut être utilisée à cet effet. Une ampoule de 220V peut aussi être mise en œuvre.
8. Certains composants peuvent présenter des risques d'explosions ou de brûlure, consécutivement à une mauvaise utilisation (Condensateurs électrolytiques à l'aluminium ou les piles lithium équipant certains châssis).
9. Ne jamais brancher un ohmmètre aux bornes d'un condensateur chargé.
10. Bien considérer la protection des circuits et plus particulièrement les composants les plus importants. Vérifier toujours que les tensions d'isolement ne sont pas dépassées. Il faut être attentif au respect des plans ou ligne de masse.
11. Ne remplacer les composants de sécurité (fusibles, thermistances, etc.) que par des composants certifiés. Il n'est absolument pas admissible de chercher des équivalents

et de faire du bricolage. Les modifications ne peuvent être réalisées qu'en conformité avec les avis spécifiés par le constructeur. Dans le cas contraire, une autre fois seule la responsabilité du technicien serait engagée.

12. En fin d'intervention, il est important de vérifier l'état des soudures et l'aspect des éléments de puissances. Vérifier le bon état des éléments contribuant aux isollements et le bon état des câbles ainsi que leur point de fixation mécanique ou de passage. Nettoyer les voies d'aérations.

2.4 Prévention des autres dangers non électriques

Les autres dangers spécifiques à la réparation des appareils électroniques concernent essentiellement le soudage/dessoudage des composants et l'utilisation des produits chimiques lors du nettoyage ou décapage des circuits.

2.4.1 RISQUES DE BRÛLURES ET D'INCENDIE

- Un fer à souder électrique génère une température de l'ordre de 300 à 400 °C selon la soudure employée. Une telle température peut provoquer des brûlures importantes et profondes sur la peau humaine. Il faudra donc prendre garde à ne toucher ni les éléments chauds du fer à souder, ni les composants lors de leur soudure. De même, si la soudure concerne un élément à inertie thermique importante (blindage métallique par exemple), il ne faut pas toucher trop rapidement, après l'opération de soudage.
- Le contact des outils de soudure avec les plastiques environnants, provoque l'émission d'une fumée souvent nocive (plastiques).
- Des produits hautement inflammables sont fréquemment utilisés pour nettoyer ou décapier, acétone ou alcool isopropylique par exemple. Il faudra se méfier de ne pas provoquer d'arc électrique lors de leur utilisation.

2.4.2 RISQUES CHIMIQUES

Des produits hautement toxiques ou fortement inflammables sont fréquents. Les principaux produits toxiques au toucher ou par inhalation sont :

- peintures et vernis (protection des circuits imprimés) ;
- solvants (alcool, a cétone, produit de nettoyage des contacts...) ;
- flux de soudure (lorsqu'il est chauffé) ;
- plastique surchauffé ou en combustion.

Évitez de respirer les vapeurs dégagées lors de leur utilisation ou d'une surchauffe accidentelle durant une réparation, et notamment au cours des soudures faites sous une loupe, contraignant le dépanneur à rester très près de la source de dégagement toxique.

2.4.3 RISQUES DE BLESSURES

- Quelques précautions sont à prendre durant le démontage, notamment avec des appareils dont les boîtiers sont « éclipsés » (ordinateurs, petits appareils divers, ...) car ces boîtiers sont difficiles à ouvrir parfois, surtout si on ne connaît pas la position des clips : risques de cassure du boîtier, ou de pincement des doigts.
- Une autre cause fréquente de blessures des mains est la manipulation des appareils ouverts munis de plaques ou d'équerres métalliques dont les bords, mal ébavurés, se révèlent souvent très blessants.
- On se méfiera également des outils tranchants : cutters, pinces à dénuder, pince coupante qui, outre les possibilités de pincement, peuvent provoquer des coupures.

3. Appareils de dépannage

Pour trouver une panne vous aurez essentiellement besoin, en plus de quelques-uns de sens habituels comme la vision, l'odorat et l'ouïe, de quelques outils tels qu'un multimètre digital, un RLC mètre ou un oscilloscope.

3.1 Multimètre numérique

Un multimètre numérique est un outil de test qui sert à mesurer les valeurs électriques, principalement la tension (volt), le courant (ampère), la résistance (ohm) et peut être équipé d'un ohmmètre et d'une fonction test diode. Il s'agit d'un outil standard de diagnostic pour les techniciens des domaines de l'électricité et de l'électronique.

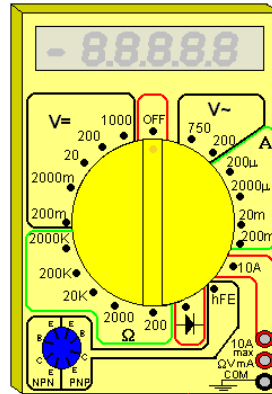


Figure 2.2 : Multimètre numérique équipé d'un ohmmètre et d'une fonction test diode

La fonction test diode, symbolisée par un dessin de diode sur le sélecteur de fonctions du multimètre permet de mesurer la tension de seuil dans le sens passant et bloquant (tendant vers l'infini dans ce cas) d'une jonction mesurée entre ses bornes.

Il est utilisable pour évaluer l'état des diodes, mais également celui des transistors, qui apparaissent aux yeux de l'instrument, comme deux diodes montées tête-bêche (entre la base et le collecteur et la base et l'émetteur).

La deuxième fonction bien utile (hormis le voltmètre, ohmmètre et tout ce qui s'en suit) est la fonction testeur de continuité. C'est tout simplement un signal sonore qui est émis par le multimètre si la résistance électrique d'un circuit est inférieure aux dizaines d'ohms en général. C'est donc une fonction bien pratique pour vérifier la présence ou l'absence de court-circuit, de faux contacts.

Les multimètres évolués sont équipés d'autres fonctions aidant le dépanneur à vérifier aisément et précisément les composants d'électronique de puissance.

3.2 RLC mètre

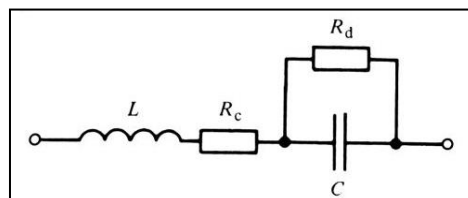
Un RLC mètre permet de mesurer des résistances, des selfs et des condensateurs.

Contrairement à un multimètre, le RLC-mètre fait des mesures en alternatif, puisqu'il s'agit d'impédances. En plus il possède une fonction mesure de résistances en courant continu : DCR.

Le RLC mètre mesure les valeurs des éléments du schéma équivalent.

Exemple d'illustration : mesure des éléments du schéma équivalent d'un condensateur.

Comme déjà vu précédemment un vrai condensateur est loin d'être parfait. Son schéma équivalent est ci-



contre :

- C : représente le condensateur parfait.
- Rc : sa résistance série (une valeur généralement faible)
- Rd : sa résistance de fuite (une valeur généralement très élevée)
- L : l'inductance série (généralement faible)

On aura besoin de mesurer les paramètres du schéma équivalent parce que ces paramètres peuvent changer et dégrader ou perturber le fonctionnement du circuit ou appareil électronique. Le RLC mètre permet de mesurer tous ces paramètres.

AVERTISSEMENT : toujours décharger les condensateurs avant de les mesurer ; sinon on risque d'endommager le RLC mètre.

3.3 L'oscilloscope

L'oscilloscope est un instrument de mesure destiné à visualiser un signal électrique, le plus souvent variable au cours du temps. La trace de l'oscilloscope est déterminée par deux composantes : une horizontale et une verticale.

- La composante horizontale est en abscisse : c'est le temps,



- La composante verticale est en ordonnée : c'est la tension appliquée par l'utilisateur.

L'oscilloscope dispose aussi d'un mode XY (où la composante horizontale est aussi une tension) qui permet, entre autres :

- de visualiser des caractéristiques de dipôle, à la condition qu'une des tensions soit l'image du courant qui traverse le dipôle ;
- de visualiser un déphasage entre deux tensions sinusoïdales ;
- de générer une courbe, permettant de tracer la caractéristique d'un moteur électrique par exemple.



3.3.1 Utilisation des entrées différentielles

Lors de l'utilisation d'oscilloscopes alimentés par le réseau électrique que l'on cherchera à visualiser, différents problèmes peuvent apparaître :

- défaut d'isolement entre l'oscilloscope et son alimentation, pouvant provoquer des courts-circuits lors des mesures ;
- défaut d'isolement entre plusieurs entrées de l'oscilloscope. Par exemple, si l'oscilloscope est utilisé pour la visualisation de tension sur un circuit RLC série et que l'on mesure la tension aux bornes de la résistance et la tension aux bornes du condensateur, les différentes masses de mesures seront portées au même potentiel, ce qui peut être dangereux.

Pour éviter ces défauts, on doit soit utiliser des oscilloscopes à entrées différentielles intégrées, soit utiliser une ou plusieurs sondes différentielles. Ces appareils auront pour but d'assurer l'isolation galvanique (avec des opto-coupleurs par exemple) entre les différents potentiels de mesure sur le circuit et les potentiels de l'oscilloscope (entrée et masse).

3.3.2 Les oscilloscopes numériques

Contrairement aux modèles analogiques, le signal à visualiser est préalablement numérisé par un convertisseur analogique-numérique (interface A/D). La capacité de l'appareil à afficher un signal de fréquence élevée sans distorsion dépend de la qualité de cette interface.

L'appareil est couplé à des mémoires permettant de stocker ces signaux et à un certain nombre d'organes d'analyse et de traitement qui permettent d'obtenir de nombreuses caractéristiques du signal observé :

- Mesure des caractéristiques du signal : valeur de crête, valeur efficace, période, fréquence, etc. ;
- Transformation rapide de Fourier qui permet d'obtenir le spectre du signal ;
- Filtres perfectionnés qui, appliqués à ce signal numérique, permettent d'accroître la visibilité de détails ;
- Décodage de signaux numériques: LIN, CAN, USB, etc.

3.4 Le fer à souder.

Souder correctement est une compétence fondamentale que tout technicien de dépannage électronique doit maîtriser. Il doit avoir les connaissances de base sur les fers à souder, les stations de soudage, les types de soudure, le dessoudage et les conseils de sécurité.

3.4.1 Différents modèles des fers à souder

Il existe plusieurs variantes des fers à souder allant de la simple forme d'un stylo ou d'un pistolet à une station de soudage sophistiquée. En plus de l'existence d'un support pour le fer à souder, d'une éponge pour essuyer la panne du fer ; l'avantage principal d'une station de soudage est la possibilité d'ajuster avec précision la température du fer à souder, ce qui est idéal pour une grande variété de projets.



3.4.2 Les pannes de fer à souder

Il y a beaucoup de modèles de pannes. Chaque modèle est utilisé dans une situation spécifique et il offre des avantages par rapport aux autres modèles. Les pannes les plus courantes sont :

- **Panne conique** : Utilisée dans la soudure électronique de précision.
- **Panne biseautée** : Utilisée dans la soudure de fils ou des composants de grande taille.



3.4.3 La Soudure

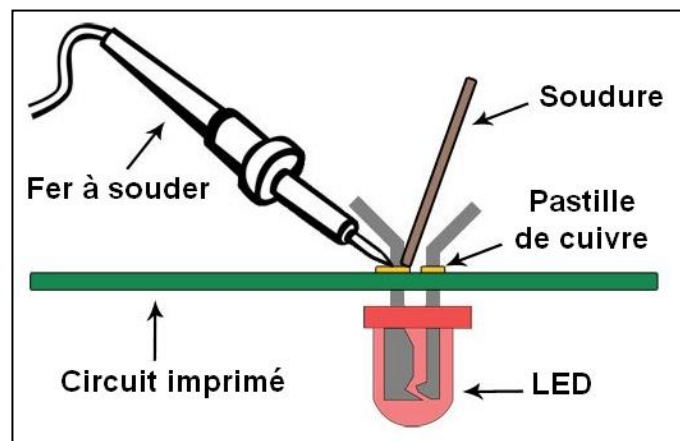
La soudure est un alliage métallique qui est fondu pour créer une liaison permanente entre les pièces électriques. Il existe en deux versions, avec ou sans plomb.

Pour la soudure électronique, favoriser l'utilisation de la soudure à la colophane sans plomb, en raison des problèmes de santé engendrés par ce dernier. Cependant, si vous utilisez de la soudure au plomb, assurez-vous d'avoir une bonne ventilation, de ne pas respirer les vapeurs et de vous laver correctement les mains après usage.



3.4.4 Procédure de soudage

- Monter le composant.
- Retournez la carte et pliez les fils vers l'extérieur suivant un angle de 45°. Cela permettra au composant d'établir une meilleure connexion avec la pastille de cuivre et surtout d'éviter qu'il ne tombe pendant la soudure.



- Chauffer la jonction : s'il est muni d'un réglage de température, réglez-la entre 250°C et 280°C (à adapter selon vos conditions locales).
- Étamez légèrement l'extrémité de la panne (pour augmenter le contact thermique).
- Appuyez (par le fer à souder) la sur la pastille en cuivre **ET** sur le fil simultanément.
- Maintenir le fer à souder en place pendant 3 à 4 secondes afin de chauffer la pastille de circuit imprimé et le fil.
- Appliquer la soudure à la jonction : Continuez de maintenir le fer à souder sur la pastille et le fil simultanément toute en appliquant la soudure sur la jonction.

IMPORTANT : Ne mettez surtout pas la soudure directement sur la panne du fer à souder mais de l'autre côté. La jonction doit être suffisamment chaude pour faire fondre la soudure lorsqu'elle la touche. Si la jonction pastille/fil est trop froide, la soudure établira une mauvaise connexion.

- Enlevez le fer à souder et laissez la soudure refroidir naturellement. Ne soufflez pas sur la soudure car cela provoquerait une mauvaise connexion.
- Une fois l'ensemble refroidi, couper le fil excédentaire.

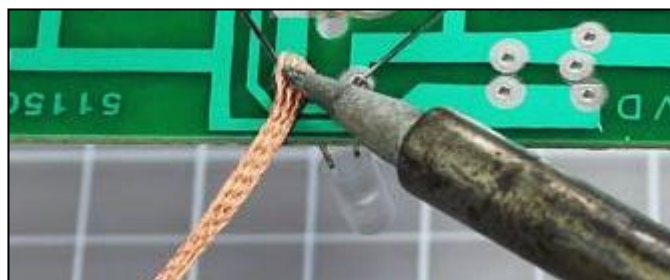
Une bonne soudure doit être lisse, brillante et ressemble à un cône. Il faut apporter juste assez de soudure pour couvrir toute la jonction, mais pas trop pour qu'il ne se forme pas une boule ou que la soudure déborde sur un fil ou sur une pastille de circuit imprimé proche.



3.4.5 Le dessoudage

La soudure peut être facilement enlevée par une technique connue sous le nom de dessoudage. Deux techniques sont couramment utilisées:

La tresse à desouder : c'est une tresse en cuivre ou en laiton qui va absorber la soudure par capillarité. On place un morceau de tresse à dessouder sur la soudure qu'on veut enlever. On applique la panne chaude du fer sur la tresse. La soudure en dessous sera chauffée et absorbée par la tresse.



La pompe à dessouder : c'est un aspirateur mécanique qui aspire la soudure à chaud lorsqu'on appuie sur un bouton de déverrouillage. Cela crée une dépression dans le cylindre et la soudure est aspirée.



4. Approches de dépannage

Le dépannage est une technique utilisée pour rechercher, identifier et résoudre les problèmes les plus courants qui surviennent dans un circuit électronique, entraînant son dysfonctionnement.

De nombreuses méthodes existent pour mener à bien cette analyse ; avant de les discuter, il est conseillé de retenir les points suivants :

- Le manuel de maintenance utilisé pour une recherche de pannes doit être parfaitement à jour, particulièrement en ce qui concerne les performances de l'équipement.
- On doit disposer de tous les moyens de test spécifiés par le manuel de maintenance.
- Le diagnostic de la panne ne supporte pas l'à-peu-près. La panne doit être parfaitement définie avant toute opération qui risquerait d'être inopérante. L'appareil en panne doit être testé méthodiquement, fonction par fonction, et les symptômes observés doivent être soigneusement notés.

Considérons par exemple un variateur de vitesse présentant une panne d'alimentation. Avant de retirer le capot et de vérifier les circuits d'alimentations,

1. On vérifiera le fusible secteur.
2. On contrôlera le câble d'alimentation.
3. On contrôlera les sorties sur toutes les gammes.
4. On notera tous les détails.

Le circuit électronique d'un équipement quelconque peut être divisé en sous-ensembles fonctionnels. En traitant un appareil comme ensembles de fonctions il est possible de circonscrire le défaut à une fonction, et d'y trouver le ou les composant(s) en panne.

Les méthodes qui permettent de reconnaître quel bloc fonctionnel est en panne sont les suivantes :

- Méthode aléatoire.
- Méthode systématique.

Chacune de ces méthodes présente ses avantages et ses cas d'emploi préférentiels.

4.1 L'approche aléatoire

Elle n'est pas utilisée que si l'on possède une certaine connaissance statistique de l'appareil en dépannage. Par exemple si 60% d'appareils d'un même type ont présenté la même panne, due à la défaillance d'une capacité électrochimique, il est fort probable que la recherche des pannes ultérieures commencera à priori par la vérification de la capacité électrolytique concernée.

4.2 L'approche systématique

Contrairement à l'approche aléatoire, l'approche systématique repose un ensemble de processus ordonnés pour parvenir à localiser le défaut. Dans la plupart des cas de dépannage, une approche systématique est absolument nécessaire.

Les méthodes test d'entrée à la sortie et de sortie à l'entrée sont deux exemples d'une telle approche. Elle consiste à injecter un signal à l'entrée de l'appareil et de relever les réponses en différents points de l'appareil en procédant avec l'entrée comme référence vers la sortie ou en remontant de la sortie vers l'entrée, bloc par bloc, jusqu'à localiser l'unité en panne. Cette méthode n'est applicable que dans le cas où le nombre des blocs fonctionnels est relativement limité.

Deux autres méthodes systématiques sont très utiles : le test V/I et la méthode de fragmentation.

4.2.1 Principe du testeur de composant (ou test V/I)

Le test V/I est une technique fondamentale pour localiser les pannes sur des cartes électroniques. Il consiste à exciter le point test par un signal variable et contrôlé (limitations

en courant et tension) pour obtenir une signature électronique du point test, représentant une impédance. Lors des tests V/I, la carte doit être non alimentée. Cette technique est d'autant plus efficace lorsqu'on peut comparer deux cartes : une carte étalon en état de marche et une carte défectueuse. Une simple comparaison visuelle permet alors d'attribuer le critère BON ou MAUVAIS pour le point test en cours.

Un signal variable est appliqué en divers points du composant ou de la carte à tester, par rapport à la masse. On obtient alors l'affichage sur un oscilloscope d'une caractéristique de l'impédance où l'axe X représente la tension, l'axe Y le courant.

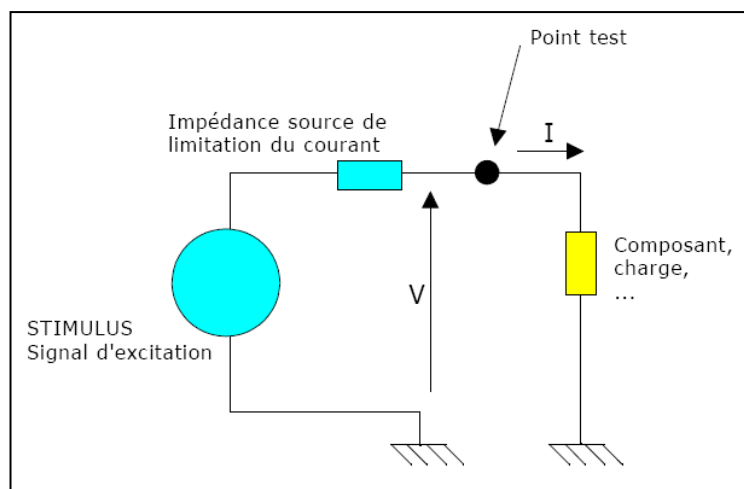
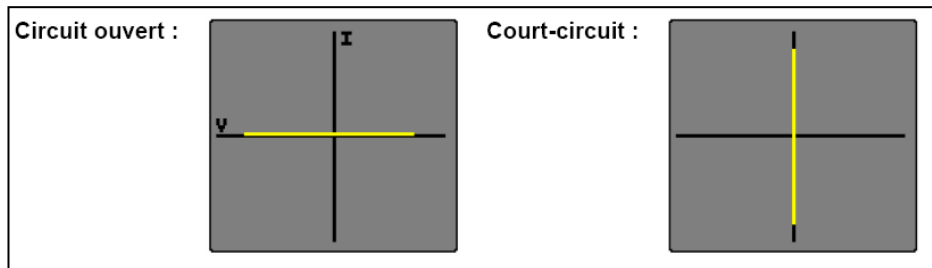


Figure 2.3 : principe du test V/I

A partir de la relation $Z = V/I$, on voit donc que la caractéristique représente l'impédance du composant sous test. Le stimulus appliqué est habituellement un signal sinusoïdal. Pour les composants sensibles aux fréquences telles que condensateurs et inductances, l'impédance est fonction de la fréquence utilisée. En conséquence, une fréquence variable pour le stimulus est nécessaire pour ces types de composants. Il faut également noter que la résistance de limitation de courant (impédance source) forme avec le composant sous test un pont diviseur de tension. Pour obtenir une trace correcte, l'impédance source doit être de la même grandeur que l'impédance du composant sous test à la fréquence considérée. C'est ainsi qu'il est nécessaire pour cette technique d'avoir une gamme très large d'impédance source pour tester la plus grande variété possible de composants.

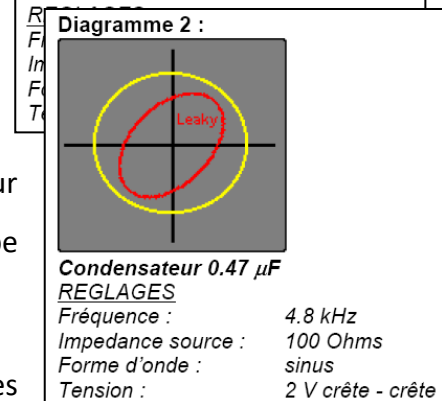
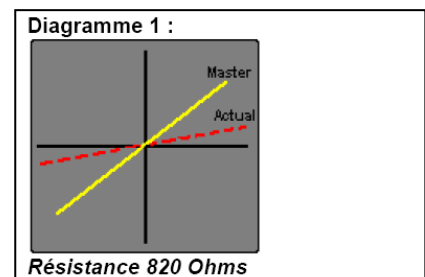
4.2.2 Analyse du test V/I

La relation entre V et I n'est pas la même dans tous les composants. Différents composants dans différentes configurations, produiront différentes signatures. Par exemple, un court-circuit affichera une ligne verticale, car en théorie le courant est infini (voir ci-dessous), alors qu'un circuit ouvert affichera une ligne horizontale, car il n'y a dans ce cas aucun courant (voir ci-dessous).



Une résistance pure donnera une ligne diagonale, car le courant est proportionnel à la tension appliquée.

Les signatures V/I des résistances pures sont des droites (voir Diagramme 1). La valeur de la résistance sous test affecte la pente de la droite ; plus la valeur de la résistance est importante, plus la droite se rapproche de l'horizontale (circuit ouvert). En mode comparaison, une différence entre la pente de deux résistances indique une différence de valeur des résistances sur les deux cartes (courbe jaune et courbe rouge).



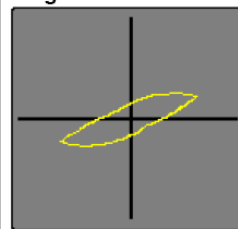
Les condensateurs de faibles valeurs ont des signatures elliptiques presque plates et horizontales, alors que pour les fortes valeurs, les signatures sont toujours elliptiques et plates, mais verticales. La signature optimale doit être proche d'un cercle (voir Diagramme 2), lequel peut être obtenu en choisissant la fréquence et l'impédance source les plus appropriées.

Un condensateur avec un courant de fuite, donnera une courbe inclinée due à l'effet de la résistance effective en parallèle avec la capacité (voir courbe rouge sur diagramme 2).

Les signatures des inductances sont elliptiques ou circulaires, mais montrent parfois une hystérésis (voir Diagramme 3). Les inductances de grandes valeurs ont des signatures elliptiques plates presque horizontales similaires à celles des condensateurs. La signature optimale est un cercle parfait.

Habituellement, les inductances nécessitent une impédance source de faible valeur et une fréquence élevée pour pouvoir afficher une signature elliptique.

Diagramme 3 :

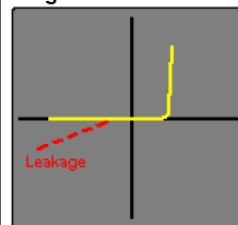

Inductance 10 mH
REGLAGES

Fréquence :	1.2 kHz
Impédance source :	100 Ohms
Forme d'onde :	triangle
Tension :	4 V crête - crête

Une inductance ouverte peut être facilement détectée par comparaison d'une carte étalon par rapport à une carte en panne, c'est une panne fréquente sur des cartes avec des composants CMS.

La signature d'une diode peut être facilement identifiée (voir Diagramme 4). Les diodes défectueuses peuvent facilement être identifiées par une déviation de leurs caractéristiques. Par exemple, une diode ayant un courant de fuite inverse significatif aura une partie de la signature en diagonale dans la région inverse, similaire à une résistance.

Diagramme 4 :


Diode 1N4148
REGLAGES

Fréquence :	60 Hz
Impédance source :	1 kOhms

Les diodes Zener conduisent dans les deux parties de la signature. La caractéristique de courant inverse est similaire à celle d'une diode (voir ci-dessous). La caractéristique dans la direction inverse est aussi similaire à une diode jusqu'à ce que la tension Zener soit atteinte, à partir duquel le courant croît rapidement (voir Diagramme 5). La tension de test doit être supérieure à celle de la tension Zener pour obtenir une signature correcte.

Diagramme 5 :


Diode ZENER BZX55C5V1
REGLAGES

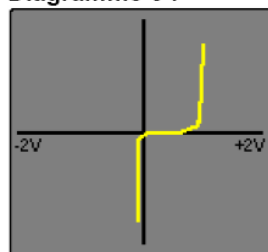
Fréquence :	60 Hz
Impédance source :	1 kOhms

Les transistors bipolaires NPN et PNP ont des signatures similaires aux diodes (voir Diagramme 4) lors du test entre les jonctions base/collecteur et base/émetteur. Un test entre collecteur et émetteur montre une signature identique à celle d'un circuit ouvert.

Le générateur d'impulsions peut être utilisé pour appliquer une tension de

polarisation, via une résistance adéquate, sur la base du transistor afin d'observer la commutation du transistor (voir Diagramme 6). Le générateur d'impulsions peut aussi être utilisé pour déclencher des composants de types triacs et thyristors.

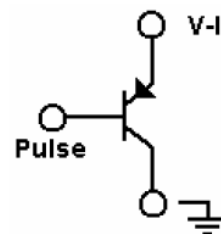
Diagramme 6 :



Transistor PNP

REGLAGES

Fréquence :	120 Hz
Impedance source :	1 kOhms
Tension :	10 V crête – crête
Type impulsion :	bipolaire (V+ : 0.12V, V- : -0.7V)
Impulsion positive :	0 μ s stop 4.18 ms
Impulsion négative :	4.18 ms stop 8.33 ms



4.2.3 La méthode par FRACTIONNEMENT :

La méthode par FRACTIONNEMENT est très efficace dans le cas d'équipement comportant un grand nombre de blocs fonctionnels en série.

Pour dépanner un circuit, vous devez commencer de l'extérieur en cherchant le chemin jusqu'à l'intérieur. Il s'agit d'un processus qui se fait étape par étape et chaque étape vous mène en effet à l'étape suivante.

Avant d'entrer dans les circuits du système, vous devez savoir que celui-ci se divise en sections, la figure 2.4 en montre les différents éléments. Le système représenté comporte trois sections mais il pourrait en compter davantage. Chacune des sections remplit une fonction ou un rôle précis.

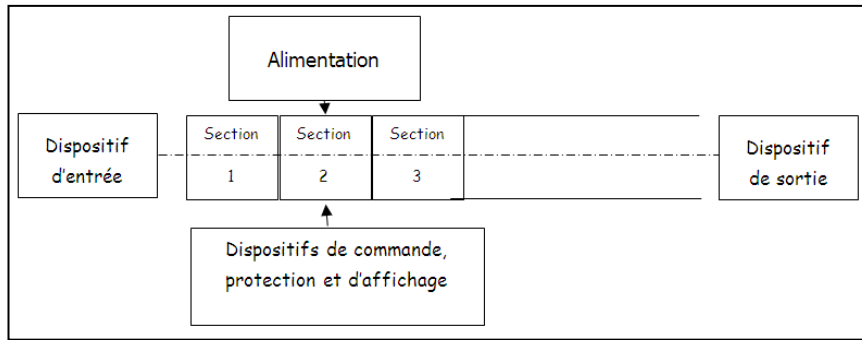


Figure 2.4 : les différents éléments d'un système.

Chaque section comporte des circuits électroniques souvent une section est constituée d'une simple carte sur laquelle les circuits sont montés, ce qui en facilite la localisation et l'utilisation. Lorsque l'un des composants devient défectueux, le système au complet peut tomber en panne.

Considérons par exemple le cas d'un circuit comportant 8 sections. Il est possible de séparer les 8 sections qui le composent en deux groupes de 4, et de tester chacune de ses deux moitiés. La moitié en panne peut elle-même être scindée en deux parties qui l'on teste individuellement, et ainsi de suite.

Nous allons supposer que la section 6 est en panne. La séquence de teste serait la suivante :

- a. On coupe l'ensemble en deux, on injecte un signale à l'entrée (Section 1) et on teste le signal de sortie en section (4) : sortie correcte. La panne se situe dans les sections (5) à (8).
- b. On divise l'ensemble (5) - (8) en deux parties, en testant la sortie de la section (6). Le signal d'entrée restant appliqué en (1) : pas de signal de sortie.
- c. On teste la sortie de la section (5), qui est correcte ; la panne réside donc dans la section (6).

Du fait que cet ensemble comporte 8 blocs fonctionnels, il suffit de 3 tests pour identifier les blocs en panne ($2^3 = 8$). La méthode par fractionnement est avantageuse quand le nombre de composants ou de blocs fonctionnels en série est très important.

Cette méthode suppose néanmoins :

- Que tous les composants présentant la même fiabilité ;
- Qu'il est possible de faire une mesure significative au point de coupure ;
- Que les contrôles demandant à peu près la même durée et son d'égale difficulté ;

Ces conditions ne sont pas toujours rassemblées, et l'on devra adapter la méthode au problème rencontré.

La méthode par fractionnement peut deviner compliquée :

- Du fait que l'on est en présence d'un nombre impair de blocs fonctionnels ;
- A cause de la divergence entre deux blocs (1 entrée, plusieurs sorties) ;
- A cause de la convergence (plusieurs entrées, 1 sortie) ;
- A cause des circuits de réaction (amplificateur ou oscillateur).

Le critère permettant de choisir une méthode plutôt qu'un autre reste bien sûr le temps global passé à identifier la panne.

4.2.4 Exemples des cartes électroniques découpés en modules ou sections :

Alimentation linéaire

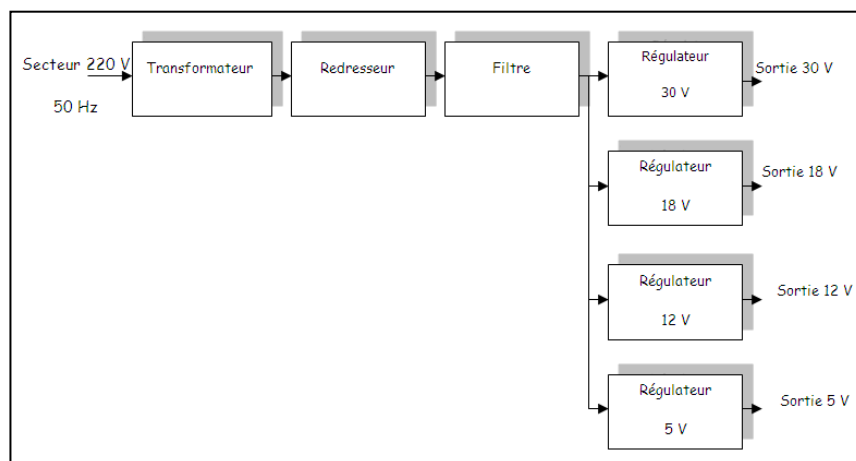


Figure 2.5 : Cartes électronique d'alimentation linéaire.

- Section1 : Le transformateur permet de réduire la tension du secteur de 220 V à 30 V efficace

- Section2 : Le redresseur permet de rendre le signal unidirectionnelle (+ et -) à partir d'un signal bidirectionnelle (phase et neutre) mais variable en fonction du temps
- Section3 : Le filtre permet de réduire la variation de la tension en fonction du temps
- Section 4.1 ; 4.2 ; 4.3 ; 4.4 : Les régulateurs permet de fixer une tension constante stable et précise (30 V, 18V, 12V et 5V) pour alimenter les différentes cartes ou blocs électroniques

Carte d'alimentation à découpage

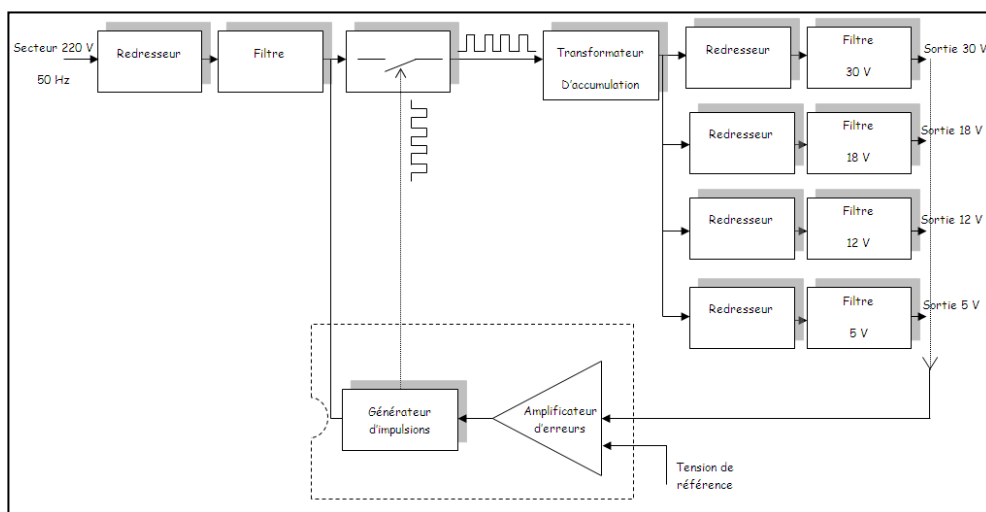


Figure 2.6 : Carte d'alimentation à découpage.

- Section1, 2 : Le redresseur et le filtre ont le même rôle que pour une alimentation linéaire
- Section 3 : Le commutateur permet de produire un courant à travers le transformateur de type carré comme le montre la figure précédente
- Section 4 : Le transformateur permet d'une part de transformer la tension appliquée à une plus grande ou plus réduite de tension suivant le nombres de spires d'autre part assurer une isolation galvanique entre le secteur et la charge.
- Section 5 : Le générateur d'impulsion est un circuit électronique ou un circuit intégré spécialement conçue pour produire un signal carré pour commander le commutateur
- Section 6 : L'amplificateur d'erreur contrôle les court-circuit au niveau de la charge.

5. Technique de dépannage

Le dépannage des circuits électroniques nécessite certaines procédures de vérification et de test pour qu'il soit concluant. Dans cette partie on essaye de fournir les principales étapes donnant un moyen chronologique de la technique de dépannage.

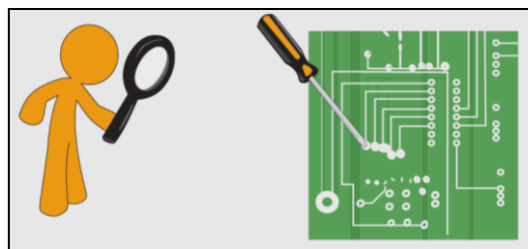
5.1 Confirmer l'existence d'un défaut dans le circuit

Ne démarrez le processus de dépannage qu'après avoir confirmé le problème dans le circuit, qui peut concerner les sorties souhaitées ou des conditions de fonctionnement inappropriées du circuit. Il est inconcevable de chercher un défaut sur un circuit qui n'est pas en panne.



5.2 Considérez d'abord l'inspection visuelle (travail hors tension)

Cette étape peut nécessiter un contact physique avec le circuit. Il est donc obligatoire de retirer l'alimentation du circuit et d'attendre un certain temps pour décharger le courant dans certains composants. Travailler hors tension, cela vous évitera les risques d'électrocution et permet d'éviter également une aggravation éventuelle de la panne.



En fait, la plupart des pannes se recherchent avec l'ohmmètre et/ou le testeur de continuité, ou encore simplement "à l'œil", donc nul besoin de travailler sous tension et de prendre de risques inutiles. Dans le cas d'appareils basse tension, faites de même, cela vous évitera de faire un court-circuit par inadvertance et de griller tout le reste du circuit. Travailler hors tension permet d'éviter également une aggravation éventuelle de la panne.

1. Vérifiez les parties explosées ou brûlées du circuit en les voyant et en les sentant.

En effet, une première observation visuelle vous livrera d'innombrables indices comme la déformation d'un condensateur, les traces de produits ayant coulé sur les circuits, les signes d'échauffement ou de brûlures, d'oxydation, d'arc électrique, etc.

Avec l'oreille, vous entendrez les circuits d'alimentation souffrir parfois d'une surcharge ou d'un court-circuit. Un son provenant de l'alimentation réessayant sa mise en marche sans cesse.

Essayez de sentir si le composant suspect à une odeur de brûlé, genre plastique fondu.

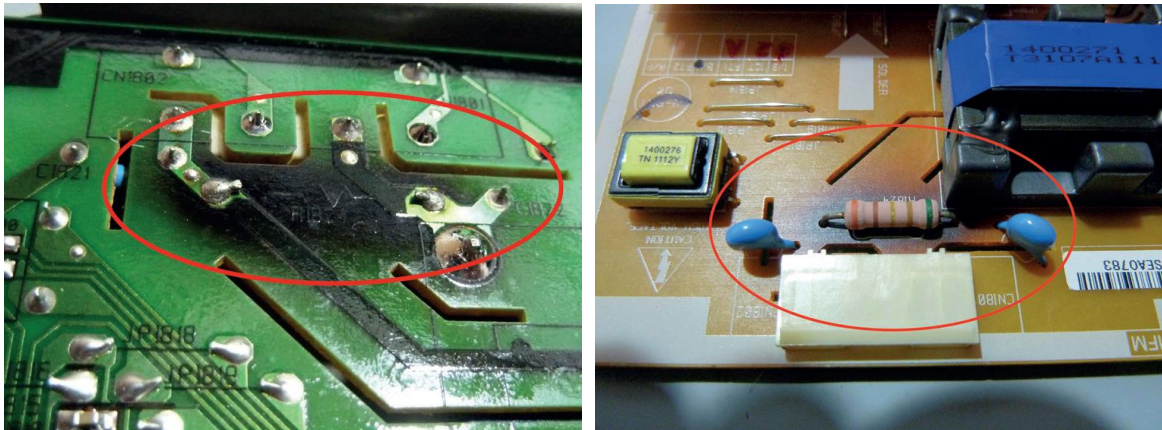


Figure 2.7 : pistes noircies et ébréchées

2. Recherchez les mauvaises connexions desserrées et vérifiez également la piste de masse.
3. Observez les points de soudure pour savoir s'ils sont correctement soudés ou non.
4. Vérifiez les court-circuit ou les contacts sur les points de soudure adjacents.

Remarque : si l'une des conditions mentionnées ci-dessus nécessite une réparation immédiate, effectuez l'action requise, comme dessouder les points court-circuités, souder les pièces détachées ou les connexions, remplacer les composants brûlés par les nouveaux, etc.

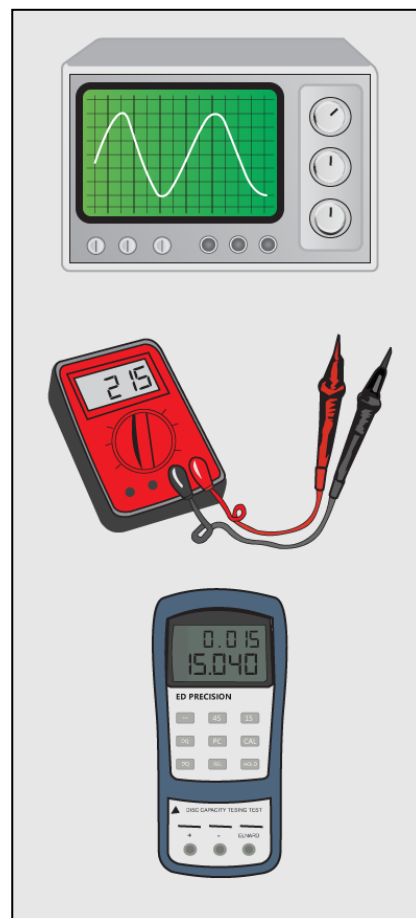
Si ce n'est pas le cas, il doit être confirmé que le problème dans le circuit est important, et maintenant vous pouvez passer par les étapes ci-dessous.

5.3 Sélectionnez Outils de dépannage

Le processus de dépannage consiste à vérifier la tension aux bornes des différents composants et appareils du circuit ; vérifier la continuité du courant pour les défauts de circuit ouvert, les composants tels que la résistance, le condensateur, les transistors et leur état.

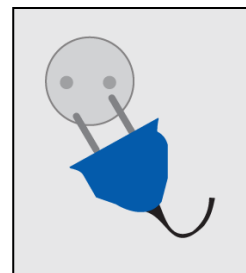
Chaque méthode et chaque test a un outil adéquat. Il faut bien choisir l'outil qui convient pour avoir le bon résultat confirmé qui ne laisse aucun doute. Certains de ces outils sont :

- Multimètre numérique ou analogique
- Oscilloscope
- RLC mètre
- Alimentation variable avec une indication mesurée
- Générateur de signaux



5.4 Passer à la vérification sous tension

Dans cette étape on passe aux tests sous tension, pour cela **il faut qu'on soit très prudent et on vérifie avant tout que les mesures de sécurités déjà vu précédemment sont respectées.**



Tous les systèmes utilisant les circuits d'électronique de puissance tels que les variateurs de vitesses et les démarreurs des machines sont à commande par cartes électroniques. L'une des premières étapes du dépannage du système consiste à la vérification sous tension des dispositifs extérieurs telles que les cartes d'affichages, les claviers de paramétrage, les voyants, les capteurs..., ces dispositifs extérieurs permettent de localiser le circuit en panne ; l'alimentation du système représente une deuxième source d'indices.

A défaut de schéma, munissez-vous des datasheets des composants (circuits intégrés principalement) susceptibles d'être impliqués dans la panne. Cela vous permettra de vérifier

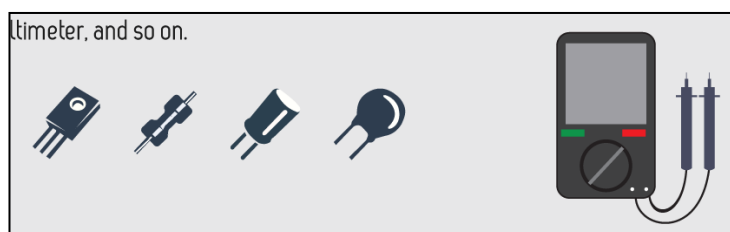
par exemple que le gestionnaire de l'alimentation à découpage doit être alimenté en 15 volts sur sa patte 8, et donc de remonter à la "source" si ces 15 volts sont absents (par ex : résistance grillée). De plus, la plupart des constructeurs ajoutent quelques schémas d'applications de leurs composants, souvent repris par les fabricants d'appareils. Vous aurez donc, peut-être, un schéma partiel de l'appareil.

5.5 Vérifier le bloc d'alimentation

Gardez les sondes du multimètre à travers le transformateur, les diodes, le condensateur et le régulateur IC, et vérifiez si les valeurs appropriées sont trouvées ou non en insérant le multimètre en mode volts.



5.6 Vérifier les composants individuels



Vérifiez la tension à travers les composants individuels, et si un composant ne montre aucune tension à travers lui, coupez l'alimentation, puis testez à nouveau les composants respectifs tel que le condensateur par un RLC mètre, diode par multimètre, etc.

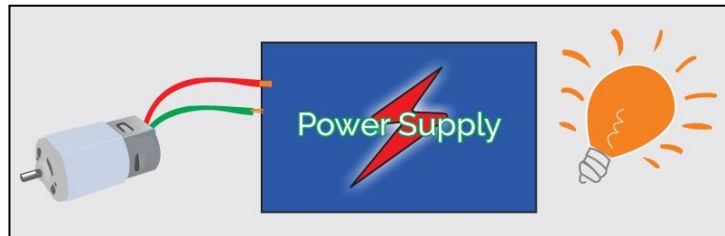
5.7 Vérifier le circuit principal



Testez l'alimentation du contrôleur principal par rapport à la masse. Vérifiez aussi si certaines broches sont court-circuitées ou non pour des circuits intégrés spéciaux comme les timers et les amplificateurs opérationnels.

Donnez l'entrée au contrôleur, puis vérifiez si les signaux de contrôle de sortie arrivent ou non aux broches appropriées.

5.8 Vérifier les charges par alimentation électrique mesurée



Vérifier les sorties après l'isolation du contrôleur principal. Appliquez l'alimentation directement aux charges et vérifiez si le problème puisse être facilement identifiée.

Diagnostic des composants d'électronique de puissance

1. Introduction.

La meilleure façon pour maîtriser le dépannage, et être capable de résoudre les problèmes électroniques difficiles, c'est la manipulation pratique des circuits électroniques et l'apprentissage de l'utilisation correcte de divers outils de dépannage. Le dépannage nécessite aussi la connaissance du fonctionnement du circuit et de ses composants.

2. Les Résistances

La vérification d'une résistance s'effectue tout simplement avec un multimètre fonctionnant en mode ohmmètre.

Une résistance en état de défaut ne permet plus le passage du courant électrique. Elle présente une interruption dans sa continuité et sa résistance est infinie ou au moins très grande.

Pour la tester précisément,

1. on la dessoude du circuit électrique dans lequel elle se situe,
2. on place le multimètre en mode ohmmètre
3. on mesure la valeur de la résistance entre les bornes de la résistance.

Une résistance est considérée comme défectueuse si le multimètre indique l'infini ou si la valeur de la résistance est assez écartée (+ de 20-30% environ) de la valeur prévue.



Une résistance électrique peut être testée de façon analogue avec un RLC-mètre.

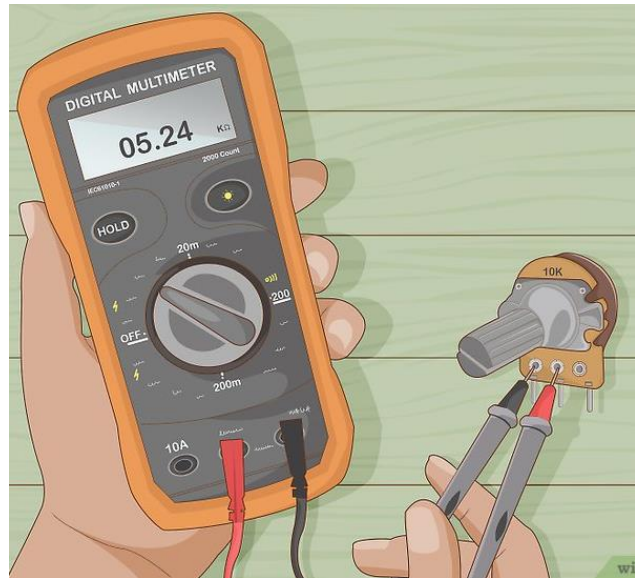
Remarque : Avant de faire une vérification avec le multimètre, on peut faire une vérification visuelle. Une résistance défectueuse peut montrer des déformations de sa forme, des traces noires de la fumée ce qui témoigne d'un possible état défectueux.

Vérification d'un potentiomètre

La vérification d'un potentiomètre est similaire à celle d'une résistance. En faite, le potentiomètre est une résistance variable.

Pour le tester précisément,

1. retirer le potentiomètre du circuit électrique.
2. réaliser hors tension un test de résistance entre les bornes et le curseur (borne centrale).
3. vérifie que la résistance varie lorsqu'on tourne le curseur du potentiomètre.



Si la résistance ne varie pas nettoyer le potentiomètre avec de la bombe à contact.

Dans le cas contraire le potentiomètre est considéré comme défectueux.

Pour tester le potentiomètre rapidement en circuit, on vérifie au multimètre (hors tension), une résistance qui varie entre les bornes et le curseur lorsqu'on tourne le curseur.

3. Les Condensateurs

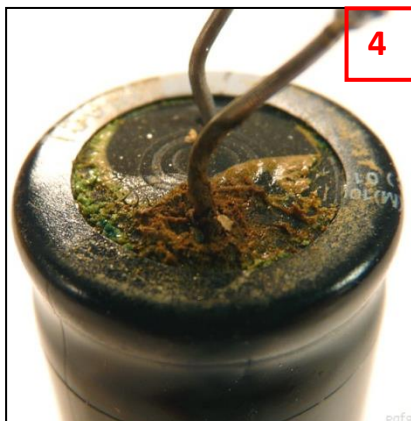
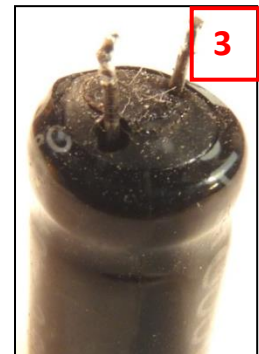
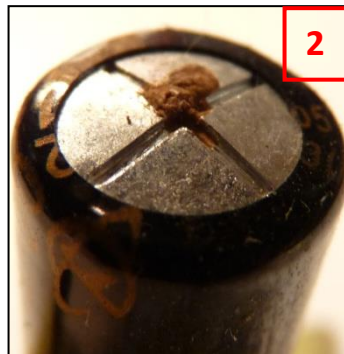
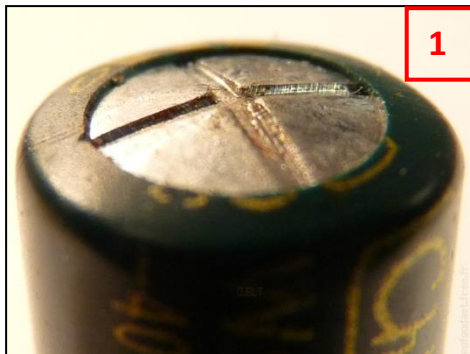
Les condensateurs électrochimiques sont la cause d'un nombre relativement important de pannes. Ils peuvent être en court-circuit et provoquer aussi la destruction d'autres composants ou être " secs " donc sans effet ou à efficacité diminuée.

Les autres condensateurs (papier, mica, céramique) peuvent présenter aussi des fuites importantes (laissent passer le courant continu).

3.1. Examen visuel

Les condensateurs cylindriques électrolytiques vieillissent au cours du temps. La réaction chimique à l'intérieur avoir tendance à faire gonfler le condensateur. Un examen visuel des condensateurs suffit dans la majorité des cas. Un dessoudage est parfois nécessaire pour regarder en dessous. Les anomalies à distinguer sont :

1. Le sommet est gonflé, même légèrement.
2. Le sommet est gonflé, et les stries d'évacuation sont plus ou moins ouvertes (avec suintement de l'électrolyte).
3. La base en caoutchouc est gonflée ou boursouflée, ou hors du sertissage.
4. Présence d'oxydation ou de suintement au niveau d'une ou des deux connexions : toute trace de liquide plus ou moins marron est suspecte (hors traces de colle de fixation).
5. Les cas extrêmes l'explosion du condensateur.



Si l'examen visuel n'est pas concluant, on passe aux autres méthodes par lesquelles nous pouvons effectuer le test de condensateur.

3.2. Utilisation d'un RLC-mètre

Pour le tester précisément on dessoude le condensateur du circuit électrique dans lequel il est situé, on relie ses bornes respectivement aux bornes d'un RLC-mètre puis on effectue la mesure. Le RLC-mètre indique la valeur du condensateur. Un condensateur est considéré comme défaillant si la valeur de sa capacité est écartée de plus de 20-30% de la valeur indiquée sur son corps.

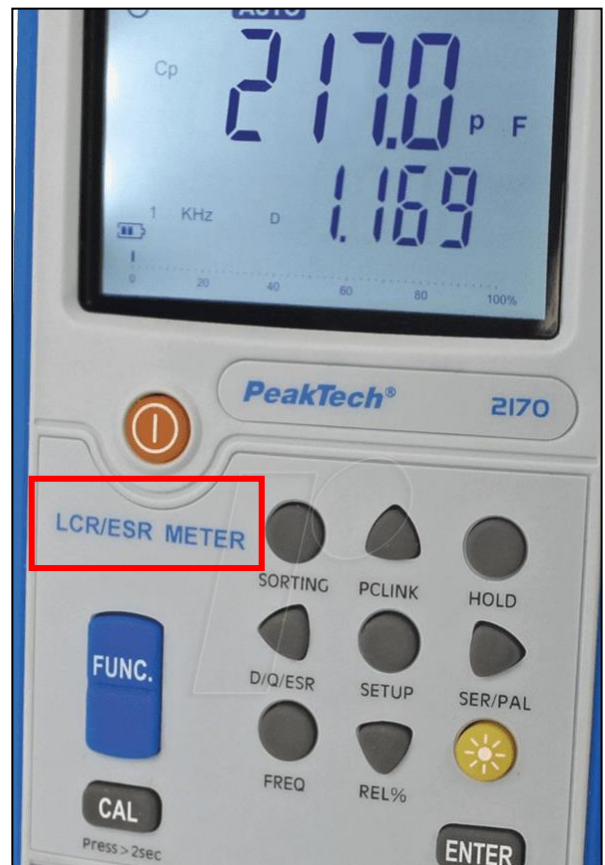
3.3. Utilisation d'un ESR-mètre

Dans les condensateurs, la résistance métallique des connecteurs et des électrodes et les pertes dans le diélectrique génèrent une ESR (Résistance série équivalente) mesurée avec un LCR-mètre ou un ESR-mètre.

Un ESR-mètre est efficace lorsque l'on veut contrôler un condensateur sans le dessouder, c'est-à-dire dans un circuit.

Un ESR-mètre teste le condensateur en lui faisant passer un courant alternatif de fréquence 100 kHz. Par conséquent, une certaine tension est produite et l'ESR-mètre affiche la valeur. Si cette valeur est équivalente à la valeur mentionnée sur le corps, alors le condensateur est en bon état.

En particulier, un condensateur électrolytique (dit chimique), peut être considéré comme défaillant si la mesure d'ESR (Résistance série équivalente) excède les valeurs du tableau ci-dessous.



	10V	16V	25V	35V	63V	160V	250V
4,7 μ F	>40 Ω	35,0 Ω	29,0 Ω	24,0 Ω	19,0 Ω	16,0 Ω	13,0 Ω
10 μ F	20,0 Ω	16,0 Ω	14,0 Ω	11,0 Ω	9,3 Ω	7,7 Ω	6,3 Ω
22 μ F	9,0 Ω	7,5 Ω	6,2 Ω	5,1 Ω	4,2 Ω	3,5 Ω	2,9 Ω
47 μ F	4,2 Ω	3,5 Ω	2,9 Ω	2,4 Ω	2,0 Ω	1,60 Ω	1,40 Ω
100 μ F	2,0 Ω	1,60 Ω	1,40 Ω	1,10 Ω	0,93 Ω	0,77 Ω	0,63 Ω
220 μ F	0,90 Ω	0,75 Ω	0,62 Ω	0,51 Ω	0,42 Ω	0,35 Ω	0,29 Ω
470 μ F	0,42 Ω	0,35 Ω	0,29 Ω	0,24 Ω	0,20 Ω	0,16 Ω	0,13 Ω
1000 μ F	0,20 Ω	0,16 Ω	0,14 Ω	0,11 Ω	0,09 Ω	0,08 Ω	0,06 Ω
2200 μ F	0,09 Ω	0,07 Ω	0,06 Ω	0,05 Ω	0,04 Ω	0,03 Ω	0,03 Ω
4700 μ F	0,04 Ω	0,03 Ω	0,03 Ω	0,02 Ω	0,02 Ω	0,02 Ω	0,01 Ω
10000 μ F	0,02 Ω	0,02 Ω	0,01 Ω	0,01 Ω	0,01 Ω	0,01 Ω	0,01 Ω

3.4. Utilisation d'un multimètre analogique (Mode résistance)

Pour tester le condensateur nous suivons les étapes suivantes :

1. Vérifiez que le condensateur est entièrement déchargé.
2. Déplacez le bouton du multimètre et pointez sur le mode résistance ou Ohm. La résistance choisie doit être élevée.
3. Rejoindre les bornes du condensateur avec les sondes multimètres correspondantes.
4. Si la lecture est d'abord très faible, puis augmente progressivement jusqu'à presque l'infini, alors c'est un condensateur approprié. Sinon, le condensateur n'est pas en bon état de fonctionnement. Il est soit ouvert, soit en court-circuit.



3.5. Utilisation d'un multimètre numérique

Dessouder le condensateur du circuit principal et le décharger (s'assurer qu'il ne reste aucune charge).

Le mode capacitif :

La technique la plus recherchée pour tester les condensateurs à l'aide d'un multimètre consiste à utiliser le mode capacitance. Cette fonctionnalité ne figure que dans les multimètres améliorés.

La procédure est la suivante :



1. Pointer le bouton sur le réglage de la capacité.
2. Effectuer les connexions nécessaires à l'aide des sondes du multimètre et des bornes du condensateur.
3. Si le multimètre indique une valeur dans la plage indiquée proche des lectures mentionnées dans le corps du condensateur (avec une tolérance de 5%), alors le condensateur n'est pas défectueux.
4. Si la valeur affichée est très faible, on peut dire que le condensateur est défectueux.

Le mode ohmmètre :

Ce mode de fonctionnement est analogue au mode ohmmètre par un multimètre analogique.



1. Régler le commutateur sur le mode ohmmètre (grand calibre) et effectuer les connexions correctement.
2. Si le multimètre affichera un zéro et augmente à l'infini en quelques secondes. Alors le condensateur n'est pas défectueux.
3. Si la lecture montre constamment zéro ou une valeur faible, le condensateur est défectueux.

Le mode hFE :

On peut tester cette capacité entre les bornes hFE, si elle existe, et COM d'un multimètre placé en mode mesure de capacité.



4. Les bobines et les transformateurs

Une bobine, comme tout autre composant électrique, peut être défectueuse à la suite:

- d'un défaut de l'isolant du fil conducteur;
- d'un échauffement excessif;
- ou d'une surcharge.

Le fil conducteur de la bobine est se caractérise par une faible résistance.

4.1. Utilisation d'un RLC-mètre

Pour tester une bobine on la dessoude du circuit électrique dans lequel il est situé, on relie ses bornes respectivement aux bornes du RLC-mètre puis on effectue la mesure. Une bobine est considérée comme défectueuse si la valeur de son inductance est écartée de plus de 20-30% de la valeur indiquée sur son corps.

4.2. Utilisation d'un ohmmètre

La vérification des bobines s'effectue avec un multimètre fonctionnant en mode ohmmètre.

Les bobines ont une résistance très faible. Même un multimètre de sensibilité élevé peut indiquer une résistance de valeur zéro. Une bobine défectueuse présente généralement une coupure qui augmente beaucoup sa résistance.

Pour tester une inductance, il faut la débrancher du circuit.

1. si l'ohm-mètre indique une résistance infinie, l'inductance est en circuit ouvert,
2. si l'ohm-mètre indique une faible résistance (zéro), l'inductance est court-circuitée.
3. si l'ohm-mètre indique une faible résistance (de 1 à quelques 100Ω), l'inductance est en bonne état.

Remarque : Il existe d'autres méthodes plus précises (et plus complexes) pour la mesure des inductances utilisant un générateur de fonction et un oscilloscope.

4.3. Vérification d'un transformateur

Un transformateur est composé de deux (ou plus) bobines. Chaque bobine est mesurée comme mentionner ci-dessus.

Pour le tester précisément,

1. Dessouder le transformateur du circuit électrique.
2. Mesurer hors alimentation la résistance entre les bornes de chaque bobine du transformateur.
3. Si on obtient les valeurs de résistances pas infinies, cela signifie que les bobines ne sont pas coupées.
4. Vérifier également qu'en alimentant le transformateur avec sa tension nominale primaire on obtient la tension nominale au bornes de la bobine secondaire.

Car parmi les défauts affectant un transformateur on trouve le court-circuit entre les spires ce qui diminue la résistance de la bobine et change le rapport de transformation.

5. Vérifier la résistance d'isolement entre les bobines deux à deux et entre les bobines et le circuit magnétique.

La valeur de la résistance d'isolement dépasse en générale l'ordre des Mégohms ($10^6 \Omega$). On utilise donc un contrôleur de tension l'isolement ou un Mégohmmètre.



Pour tester rapidement le transformateur en circuit, on vérifie au multimètre hors tension avoir une résistance non infinie entre les bornes des bobines et sous tension avoir une première tension alternative aux bornes de la bobine primaire et une deuxième tension alternative aux bornes de la bobine secondaire respectant le rapport de transformation.

5. Les diodes

La diode présente une résistance très faible lorsqu'elle est polarisée en direct et une résistance extrêmement élevée lorsqu'elle est polarisée en inverse et nécessite une tension de 0,7 V pour devenir polarisée en direct. Un ohmmètre applique une tension connue d'une source interne (piles) à la résistance mesurée. Théoriquement, cette tension peut être de 1,5 ou 3 V.

Si le fil de test positif de l'ohmmètre est connecté à l'anode et que le fil de test négatif de l'ohmmètre est connecté à la cathode, la diode devient polarisée en direct. Dans ce cas, l'ohmmètre lit une très faible résistance en (a). Si les fils de test sont inversés par rapport à l'anode et à la cathode, la diode devient polarisée en inverse et l'ohmmètre montre une résistance très élevée en (b) ("OL" sur certains modèles de multimètres numériques).

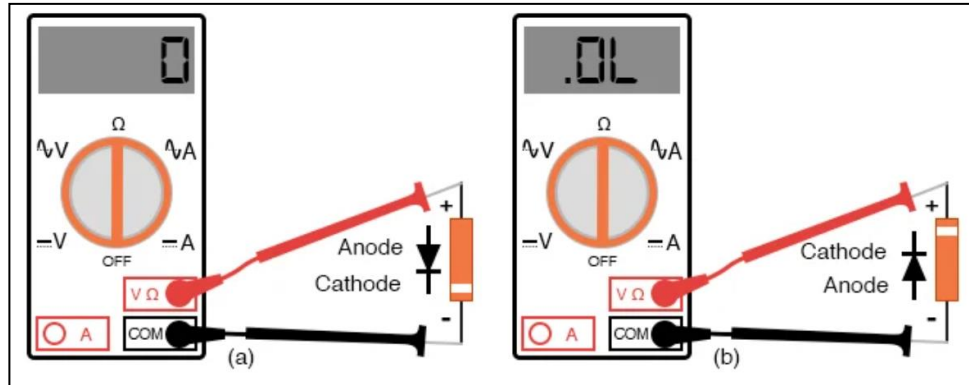


Figure 3.1 : Détermination de la polarité de la diode : (a) directe, (b) inverse.

5.1. Vérification des diodes par la fonction de « test de diode »

La plupart des multimètres numériques ont une fonction de test de diode. Il est marqué sur le commutateur de sélection par un petit symbole de diode. Lorsque le multimètre numérique est réglé sur le mode de test de diode, il fournit une tension interne suffisante pour tester la diode dans les deux sens. Le fil de test positif du multimètre (en couleur rouge) est connecté à l'anode, et le fil de test négatif du multimètre (en couleur noire) est connecté à la cathode. Si la diode est en bon état de fonctionnement, le multimètre doit afficher une valeur comprise entre 0,5 V et 0,9 V (typiquement 0,7 V).

Ensuite, les fils de test du multimètre numérique sont inversés par rapport à l'anode et à la cathode. La diode dans ce cas apparaît comme un circuit ouvert vers le multimètre, pratiquement toute la tension interne du multimètre apparaîtra à travers la diode. La valeur affichée dépend de la source de tension interne du multimètre et se situe généralement entre 2,5 V et 3,5 V.

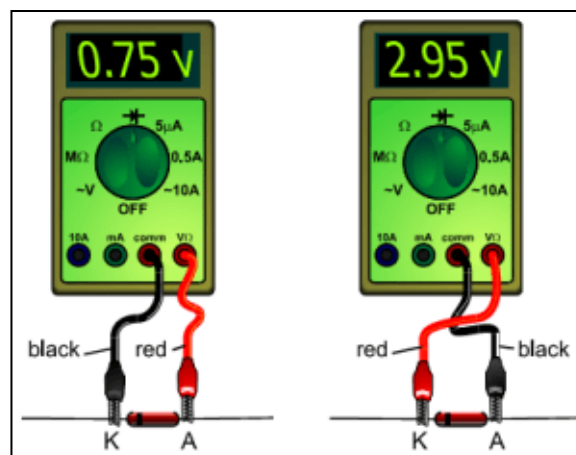


Figure 3.2 : Diode qui fonctionne correctement

Une diode défectueuse apparaît soit comme un circuit ouvert, soit comme un circuit fermé dans les deux sens. Le premier cas est principalement causé par des dommages internes de la jonction PN dus à une surchauffe. Une telle diode présente une résistance très élevée lorsqu'elle est à la fois polarisée en direct et polarisée en inverse.

Si la diode est en court-circuit, le multimètre indique 0 V (ou résistance nulle) dans les deux sens.

Parfois, une diode défectueuse peut ne pas présenter un court-circuit complet (0 V) mais peut apparaître comme une diode résistive, auquel cas le multimètre lit la même résistance dans les deux sens (par exemple 1,5 V).

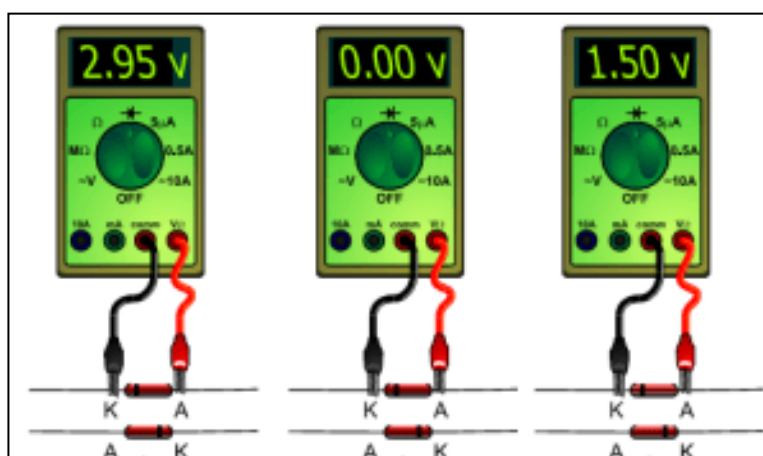


Figure 3.3 : Diodes défectueuses

5.2. Vérification des diodes par la fonction de « ohmmètre »

Si une fonction spéciale de test de diode n'est pas fournie dans un multimètre particulier, la diode peut toujours être vérifiée en mesurant sa résistance dans les deux sens. Le sélecteur est réglé sur OHMs.

Lorsque la diode est polarisée en direct, le multimètre lit de quelques centaines à quelques milliers d'ohms. La résistance réelle de la diode ne dépasse normalement pas 100 Ω , mais la tension interne de nombreux multimètre est relativement faible dans la gamme des OHM et

elle n'est pas suffisante pour polariser complètement la jonction PN de la diode. Pour cette raison, la valeur affichée est plus élevée.

Lorsque la diode est polarisée en inverse, le multimètre affiche généralement un type d'indication hors plage, telle que "OL", car la résistance de la diode dans ce cas est trop élevée et ne peut pas être mesurée à partir du multimètre.

Les valeurs réelles des résistances mesurées sont sans importance. Ce qui est important, cependant, est de s'assurer qu'il y a une grande différence dans les lectures, lorsque la diode est polarisée en direct et lorsqu'elle est polarisée en inverse. Cela indique que la diode fonctionne correctement.

Les possibilités que peut donner une diode défectueuse sont :

- **Coupée.** On mesure une coupure dans les deux sens.
- **En court-circuit.** Le claquage est total. On mesure 0 dans les deux sens
- **En fuite.** La résistance inverse n'est pas infinie, elle présente une résistance non négligeable.

5.3. Test en "in situ"

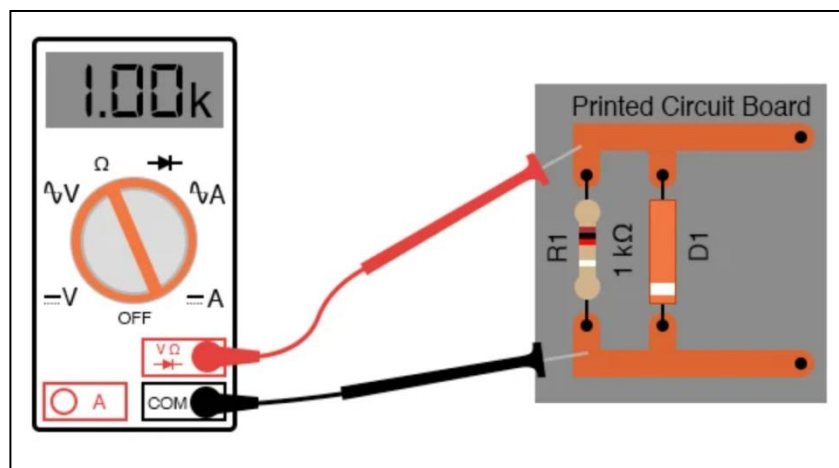
Le test de la diode peut se faire "in situ", c'est à dire dans le circuit en mesurant la résistance du composant (circuit hors tension bien sûr). Mais si vous suspectez un court-circuit, il faudra ré-tester la diode une fois celle-ci dessoudée, car il est possible que la valeur mesurée est dû à la résistance du circuit en parallèle de la diode. Le cas d'une diode de roue libre montée en parallèle d'un transformateur ou d'une self par exemple.

Cas particulier

Certains multimètres numériques équipés d'une fonction de "vérification de diode" peuvent produire une tension de test très faible (moins de 0,3 volt) lorsqu'ils sont réglés sur la fonction "résistance" (Ω) habituelle : trop faible pour polariser la diode.

Dans ce cas la fonction « vérification de diode » doit être utilisée pour tester les dispositifs à semi-conducteurs, et la fonction « résistance » pour tout le reste.

En utilisant une tension de test très faible pour mesurer la résistance, il est plus facile pour un technicien de mesurer la résistance des composants non semi-conducteurs connectés aux composants semi-conducteurs puisque les jonctions des composants semi-conducteurs ne seront pas polarisées en direct avec des tensions aussi basses.

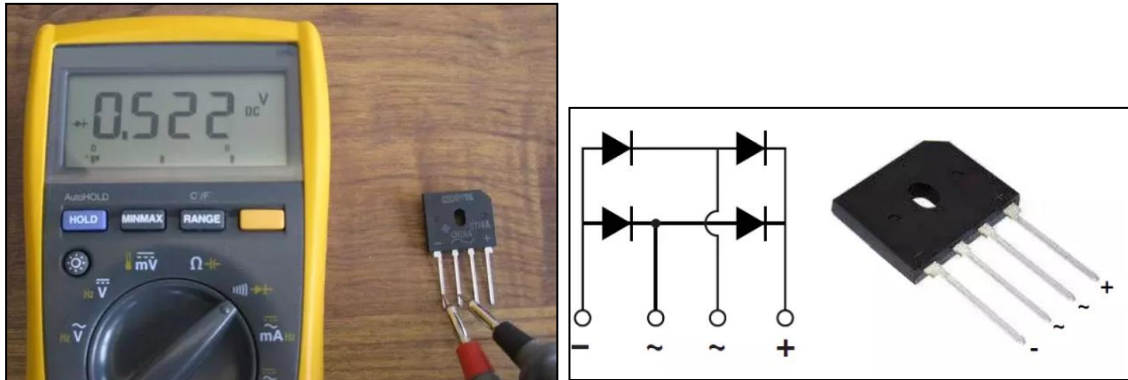


Exemple de test : L'ohmmètre équipé d'une faible tension de test ($<0,7\text{ V}$), ne voit pas les diodes, permet de mesurer des résistances parallèles.

Prenons l'exemple d'une résistance et d'une diode connectées en parallèle, soudées en place sur une carte de circuit imprimé (PCB). Normalement, il faudrait dessouder la résistance du circuit (la déconnecter de tous les autres composants) avant de mesurer sa résistance, sinon, tout composant connecté en parallèle affecterait la lecture obtenue. Lors de l'utilisation d'un multimètre qui délivre une tension de test très faible aux sondes en mode de fonction "résistance", la jonction PN de la diode n'aura pas assez de tension à travers elle pour devenir polarisée en direct et ne laissera passer qu'un courant négligeable. Par conséquent, le multimètre "voit" la diode comme une ouverture (pas de continuité) et n'enregistre que la résistance de la résistance. (Figure ci-dessus)

5.4. Test du pont de diodes :

Le plus simple est de tester chacune des 4 diodes du pont de diodes : diode passante dans un sens, bloquée dans l'autre, conformément au schéma interne du pont comme ci-dessous :



Si on trouve 0mV ou presque (moins de 100mV) ou encore qu'une diode est passante dans les 2 sens (quand on intervertit les cordons du multimètre), la diode concernée est défectueuse. On peut donc considérer que le pont de diodes est défectueux. En effet, on ne peut plus l'utiliser pour redresser une tension alternative.

5.5. Tester un pont de diodes sans le dessouder

Si on ne souhaite pas dessouder un pont de diodes de son circuit, on peut aussi le tester de cette façon. Si le multimètre affiche soit la tension de seuil (450 à 600 mV typiquement) soit "OL" ou "1-" (circuit ouvert) pour chacune des 4 diodes, le pont de diodes est bon.

Si sur le circuit, le pont de diodes présente une diode qui semble passante dans les 2 sens, c'est peut-être une branche parallèle du circuit qui est passante. Dans ce cas, il faut dessouder le pont de diodes et le tester tout seul.

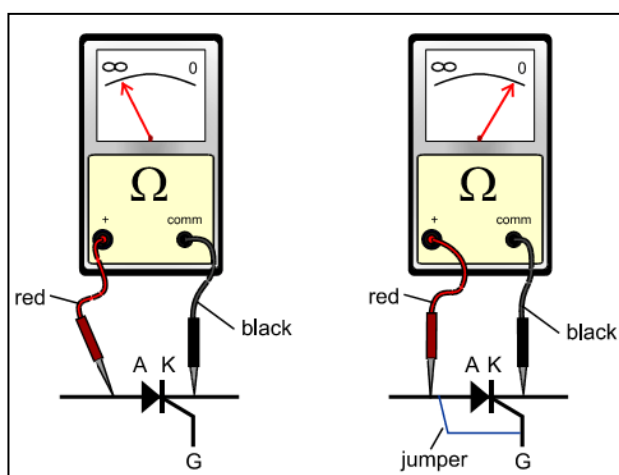
6. Les Thyristors.

Le Thyristor est une diode, avec une borne de grille supplémentaire. Le Thyristor ne peut être mis en conduction que s'il est polarisé en direct et s'il est déclenché à partir d'une impulsion appliquée à la grille.

Ainsi, le Thyristor peut être vérifié d'une manière similaire à la diode conventionnelle, en utilisant un **multimètre numérique avec une fonction de vérification de diode** ou avec un ohmmètre ordinaire.

Le fil de test positif (rouge) du multimètre est connecté à l'anode du Thyristor et le fil de test négatif (noir) est appliqué à la cathode. L'instrument doit montrer une haute résistance infinie.

Un cavalier peut être utilisé pour déclencher le Thyristor. Sans déconnecter le multimètre, utilisez le cavalier pour court-circuiter la borne de grille du Thyristor avec le fil positif du multimètre. Le Thyristor devrait présenter une forte diminution de résistance.



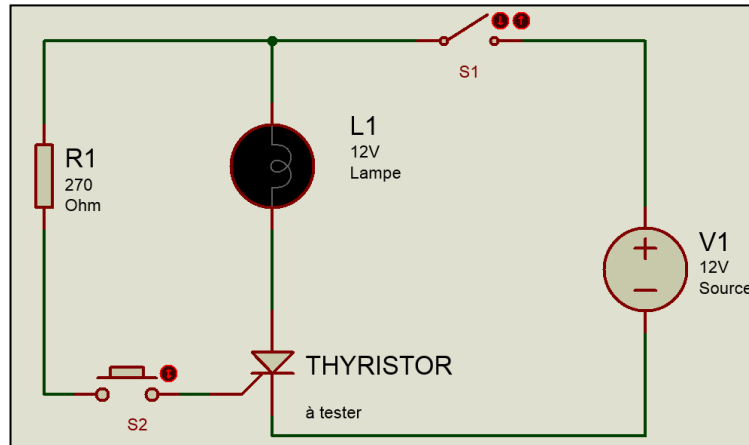
Lorsque le cavalier est déconnecté, l'appareil peut continuer à conduire ou peut s'éteindre. Cela dépend des propriétés du Thyristor et du multimètre. Si le courant de maintien du Thyristor est faible, l'ohmmètre pourrait être capable de fournir suffisamment de courant pour le maintenir allumé. Cependant, si le courant de maintien du Thyristor est élevé, l'appareil s'éteindra lors de la déconnexion du cavalier.

Les défauts qui peuvent affecter le thyristor sont ceux qui affectent les diodes : coupé, en court-circuit ou en fuite.

Certains Thyristor haute puissance peuvent avoir une résistance interne connectée entre la cathode et la grille. Cette résistance empêche le Thyristor de se déclencher en raison de petites surtensions parasites. Un technicien de maintenance, qui n'est pas au courant de l'existence de cette résistance, peut diagnostiquer par erreur un tel Thyristor comme présentant une fuite entre la cathode et la grille. Il est possible aussi qu'un thyristor donne de bonnes indications d'Ohmmètre et soit toujours défectueux. En fin de compte, le seul moyen de tester un SCR est de le soumettre à un courant de charge.

Schéma d'un testeur de thyristor.

Le schéma ci-dessous permet de tester le thyristor en lui imposant un courant de charge.



1. S1 fermé, S2 ouvert, L1 doit être éteinte. Si L1 allumé alors le thyristor est défectueux en court-circuit ou en fuite.
2. S1 fermé, si on appuie sur S2, L1 s'allume. Si non le thyristor est défectueux en mode coupé.

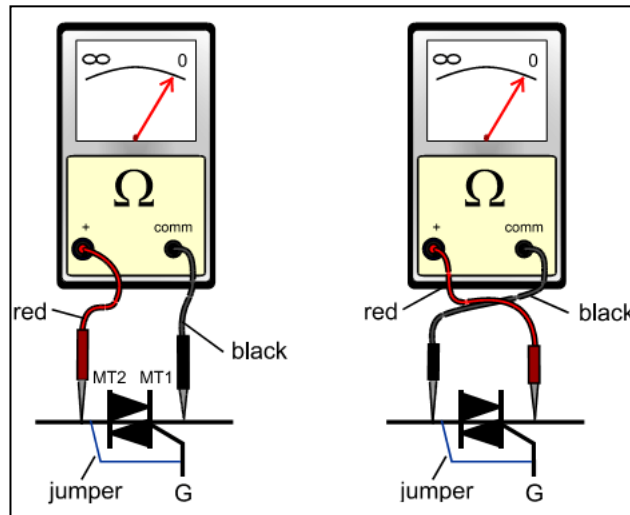
7. Les Triacs

Étant donné que le TRIAC se compose en fait de deux Thyristors connectés en parallèle et dans des directions opposées, la procédure de test d'un TRIAC est essentiellement la même que pour tester un Thyristor. Le fil de test positif du multimètre est connecté à A2(ou MT2) et le fil de test négatif est appliqué à A1 (ou MT1). En l'absence d'une commande sur la gâchette, l'ohmmètre doit indiquer une résistance infinie.

Ensuite, de manière similaire à la procédure de test Thyristor, un cavalier est utilisé pour toucher la borne de porte à A2 (une impulsion de déclenchement positive est appliquée à la porte). Le TRIAC devrait présenter une forte diminution de la résistance. Cela indique que l'un des Thyristor de la paire fonctionne correctement.

Ensuite, les fils de test de l'ohmmètre sont inversés par rapport à l'anode et à la cathode. Encore une fois, en l'absence d'une commande sur la gâchette, l'ohmmètre doit présenter une résistance hors plage. A l'aide du cavalier, la borne de porte est brièvement touchée à A2

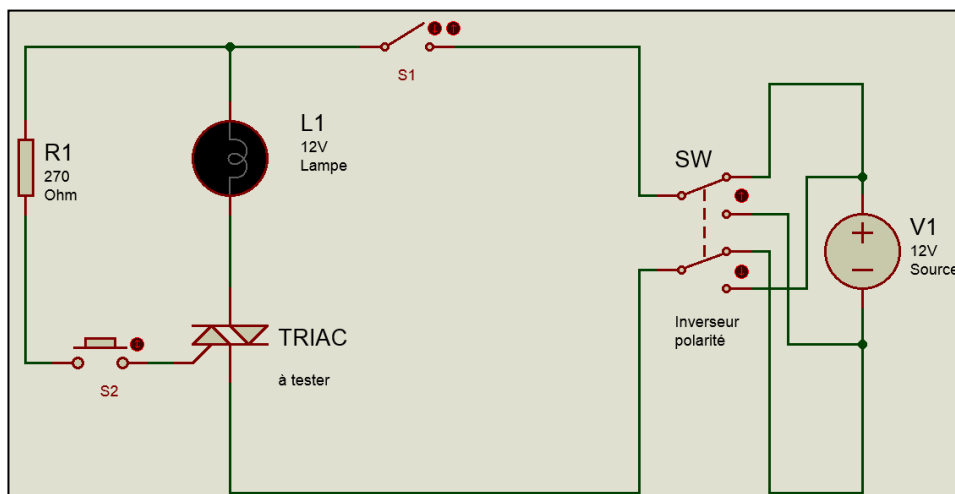
(une impulsion de déclenchement négative est appliquée à la gâchette). La résistance du TRIAC diminue fortement, ce qui indique le bon fonctionnement du deuxième Thyristor de la paire.



Comme pour le thyristor, cette méthode reste limitée et peut ne pas détecter la défaillance du composant. Donc, le moyen sûr de vérification du triac est de le soumettre à un courant de charge.

Schéma d'un testeur de triacs.

Le schéma ci-dessous permet de tester le triac en lui imposant un courant de charge.



SW permet d'inverser la polarité de la source. En effet, le triac est équivalent à deux thyristors en parallèles mais de sens opposés. Donc ce testeur reprend le principe de testeur de thyristor ci-haut avec la possibilité d'inverser la polarité pour tester le deuxième sens du triac.

1. SW position haut.

- S1 fermé, S2 ouvert, L1 doit être éteinte. Si L1 allumé alors le thyristor est défectueux en court-circuit ou en fuite.
- S1 fermé, si on appuie sur S2, L1 s'allume. Si non le thyristor est défectueux en mode coupé.

2. SW position bas.

- S1 fermé, S2 ouvert, L1 doit être éteinte. Si L1 allumé alors le thyristor est défectueux en court-circuit ou en fuite.
- S1 fermé, si on appuie sur S2, L1 s'allume. Si non le thyristor est défectueux en mode coupé.

8. Les transistors bipolaires.

Un transistor bipolaire (NPN ou PNP) est formé de deux jonctions PN et peut donc être testé comme deux diodes au multimètre. On peut même identifier un transistor bipolaire inconnu par des tests au multimètre fonction diode.

8.1. Test au multimètre d'un transistor bipolaire

8.1.1 Test d'un transistor avec la fonction hfe

Un certain nombre de multimètres disposent de la fonction "hfe" qui permet de tester un transistor bipolaire. Il faut respecter les connexions et savoir si c'est un NPN ou un PNP. La valeur qui s'affiche représente le gain en courant β (qui s'appelle hfe) du transistor. Ce gain est compris entre 10 et 50 pour la plupart des transistors de puissance.



En effet, si le transistor est mal inséré ou si l'une de ses jonctions est défectueuse, le multimètre indique 0 ou 1 clignotant, si le transistor est en bon état, le multimètre affiche une valeur qui correspond à β .

8.1.2 Test d'un transistor avec la fonction diode

Si vous ne disposez pas d'un multimètre avec la fonction hfe, vous pouvez tester les deux jonctions PN internes du transistor. Pour faire le test, on choisit le mode "diode" du multimètre. Les étapes sont alors les suivantes (pour un NPN).

1. placer le fil rouge (+) du multimètre sur la base. Placer le fil noir (-) sur l'émetteur. Une tension doit s'afficher, par exemple 638mV.

2. laisser le fil rouge sur la base. Placer le fil noir (-) sur le collecteur. Une tension voisine doit s'afficher, mais un peu plus faible. La plupart des multimètres détectent cette variation. Par exemple : 636mV.

La tension affichée sur la jonction base-collecteur est un peu plus faible que la tension base-émetteur. Cela est dû à la différence de dopages des zones correspondant au collecteur et à l'émetteur. Collecteur et émetteurs ne jouent pas un rôle symétrique et ne peuvent pas être intervertis.

3. En polarisant en inverse les mêmes jonctions, il suffit d'inverse les bornes du multimètre, on obtient une lecture en fonction de la source interne du multimètre. La valeur typique est de 2.6 V. Cette tension peut varier selon la marque du multimètre bien qu'elle se situe typiquement entre 2.5 V et 3.5 V.
4. Dans le cas d'un transistor PNP, il faut inverser la polarité des bornes du multimètre pour chacun des tests.

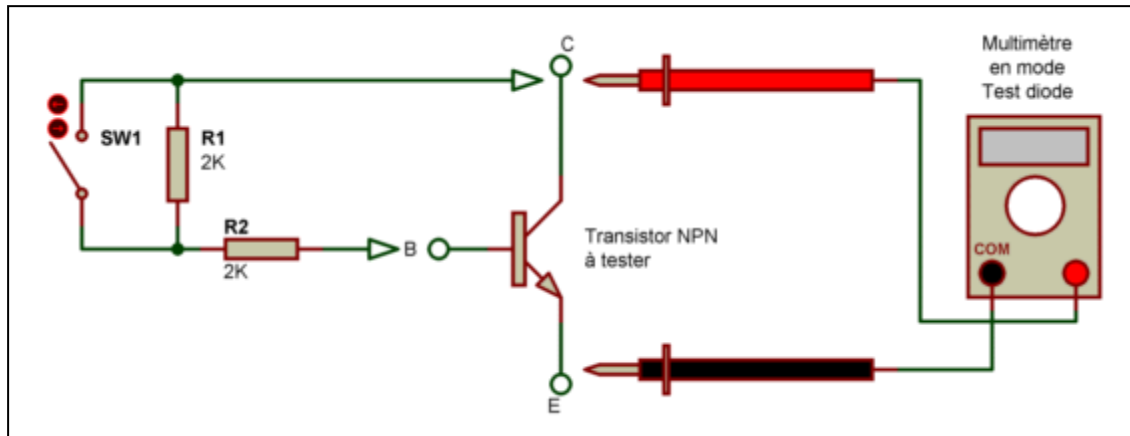
Lorsque le transistor est défectueux :

- lorsque la jonction du transistor est ouverte, on obtient une tension de circuit ouvert (typiquement 2.6V) pour les deux conditions de polarisation (directe et inverse).
- Lorsque la jonction est court-circuitée, le multimètre indique 0V dans les deux tests de polarisation directe et inverse.
- Parfois, une jonction défectueuse peut indiquer une faible résistance pour les deux conditions de polarisation plutôt qu'un court-circuit, dans ce cas le multimètre affichera une faible tension plus faible que la tension exacte en circuit ouvert (1.1 V par exemple).

8.1.3 Mesure de gain (beta, hFE) avec la fonction diode

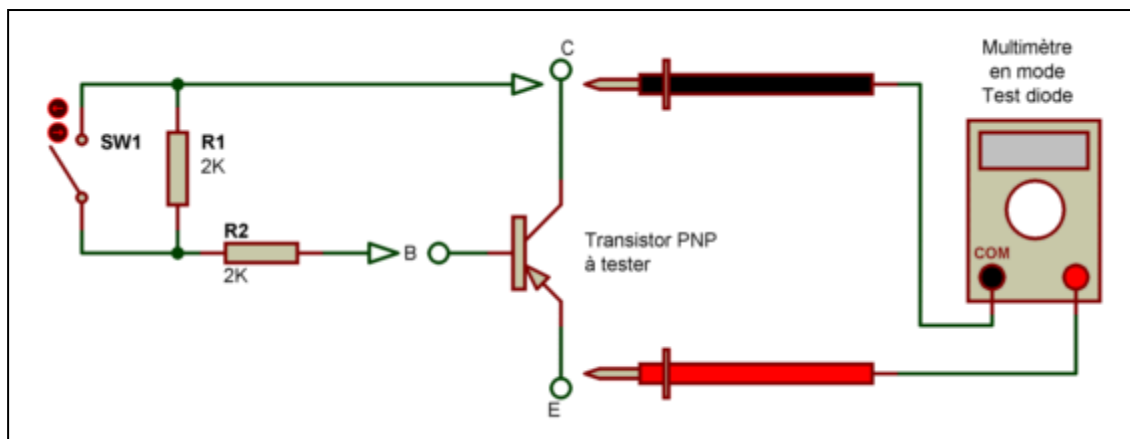
Même si votre multimètre ne dispose pas de la fonction hFE, vous pouvez vous faire une idée grossière du gain d'un transistor en utilisant la fonction test diode du multimètre, et en câblant le transistor comme suit :

Si le transistor à tester est de type NPN :



Transistor à tester est de type NPN

Si le transistor à tester est de type PNP :



Transistor à tester est de type PNP

Méthode de mesure

1 - Ouvrir SW1 et noter la valeur affichée Val1 (en volts et jusqu'au troisième chiffre après la virgule) :

- Si une indication de surcharge est indiquée, inverser les pointes de touche.
- Si une indication de surcharge est indiquée quel que soit le sens des pointes de touches, le transistor est surement défectueux.
- Si la valeur affichée est inférieure à 0.2 V, le transistor est surement défectueux.

2 - Fermer SW1 et noter la valeur affichée Val2 (en volts et jusqu'au troisième chiffre après la virgule) :

3 - Effectuer le calcul suivant : $2 / (Val1 - Val2)$

Exemples de mesures sur un transistor classique le BC108.

- BC108 : Val1 = 0.600 et Val2 = 0.588, Beta 1 = 166, Beta 2 = 148

- Beta 1 = gain calculé avec la méthode précédente (mode test diode),
- Beta 2 = gain mesuré avec la fonction de mesure du gain hFE.

8.2. Test d'un transistor avec la fonction ohm-mètre :

Si l'on désire vérifier les jonctions d'un transistor avec un multimètre dépourvu de la fonction du test de diode ou de prise réceptrice pour tester hFE du transistor, il faudra positionner le multimètre sur la fonction ohm-mètre.

- En polarisation directe de la jonction PN, si elle est en bon état, le multimètre donne une lecture de résistance (quelques centaines d'ohm à quelques milliers d'ohm) en fonction de la batterie interne du multimètre.
- En polarisation inverse de la jonction PN, si elle est en bon état, la lecture sera hors de portée sur la plupart des multimètres. Une indication de résistance hors de portée peut être indiquée par un « 1 » clignotant ou une série de tirets selon le modèle.

La majorité des transistors claquent ou grillent en court-circuit. On peut donc tester le transistor suspect entre collecteur et émetteur. S'il y a court-circuit (valeur affichée proche de 0), le transistor est défectueux.

Cette méthode permet de tester le transistor de façon assez fiable et même trouver les connexions d'un transistor inconnu.

8.3. Identification d'un transistor bipolaire inconnu

Combien de tests possibles peut-on faire avec les 3 broches du transistor inconnu et les deux cordons du multimètre ?

Pour placer le premier cordon, il y a 3 possibilités, pour placer le deuxième cordon, il reste 2 possibilités. On peut donc faire 6 tests au total (a à f) :

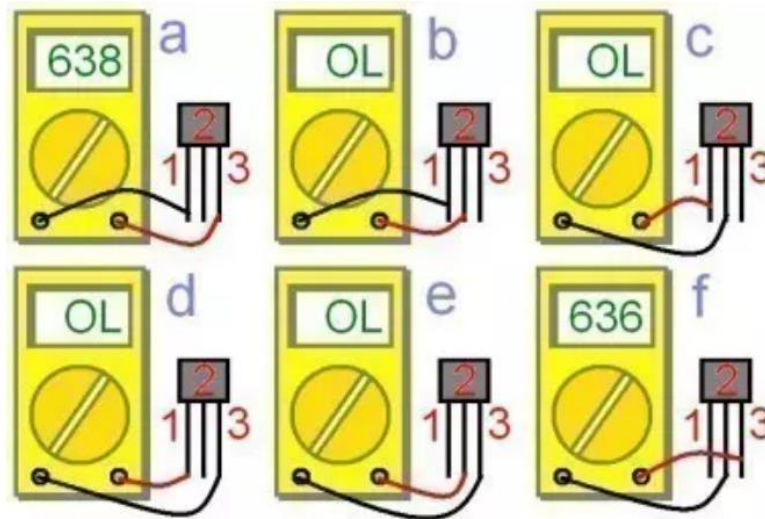


Figure 3.3 : Identification au multimètre d'un transistor bipolaire inconnu

On souhaite identifier les bornes d'un transistor inconnu en utilisant la fonction diode du multimètre. On fait les 6 tests possibles. Lorsque "OL" s'affiche, cela signifie qu'il y a un circuit ouvert.

Seuls les cas a et f affichent une valeur pertinente. Dans ces deux cas, la connexion commune est le + sur la patte 3. La patte 3 est donc reliée aux deux anodes des deux jonctions. C'est la base d'un transistor NPN.

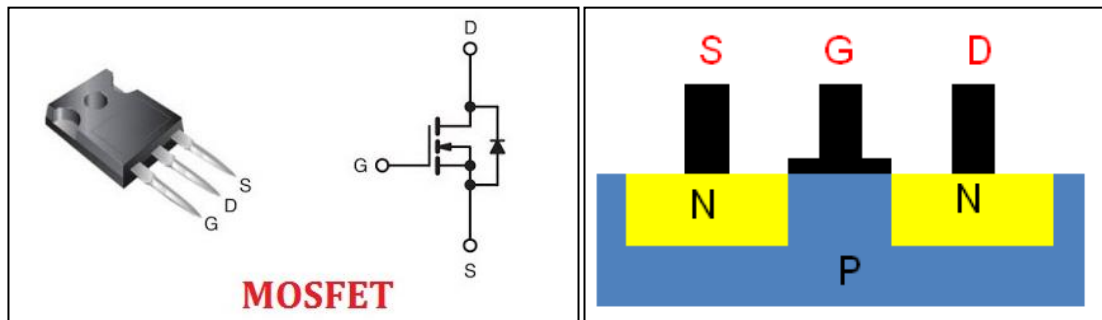
Si la connexion commune était le -, il s'agirait de la base d'un transistor PNP.

Pour départager collecteur et émetteur, on regarde où apparaît la tension la plus faible : en f. La patte 2 est donc le collecteur

On a donc : 1=émetteur, 2=collecteur, 3=base. C'est un transistor bipolaire NPN.

9. Les transistors MOSFET

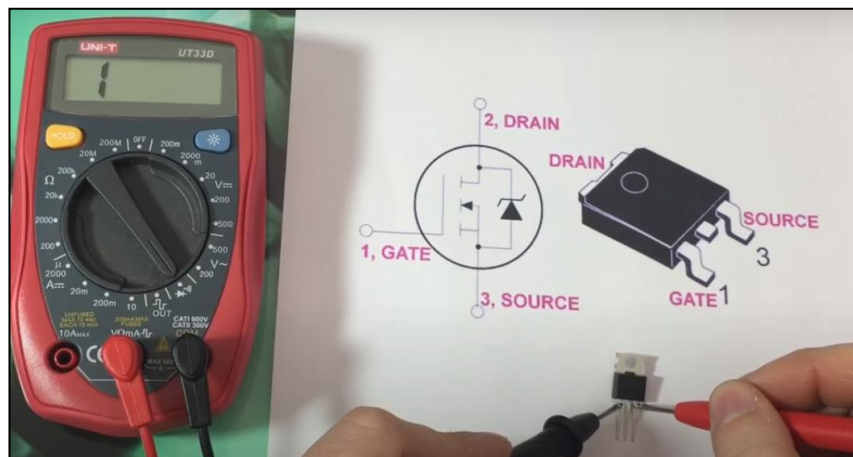
Le transistor MOSFET est un composant qui permet de faire passer un courant important entre la "Source" S et le "Drain" D lorsqu'une tension supérieure à un seuil prédéterminé est appliquée à la "Grille" G.



Le transistor MOSFET qui peut être de type canal P ou N comprend trois bornes (S, G et D).

Attention, consulter toujours le datasheet constructeur pour identifier les bornes avant tout test.

9.1. Test du MOSFET au multimètre en mode test de diode.



1. Placez COM sur S.
2. Tenez le MOSFET par le boîtier, mais ne touchez pas les parties métalliques des sondes de test avec les autres bornes du MOSFET jusqu'à ce que vous en ayez besoin.
3. Tout d'abord, reliez la borne + du multimètre avec la « Grille » du MOSFET. Ce dernier s'amorce par la pile du multimètre.

4. Déplacez maintenant la sonde + vers le 'Drain'. Vous devriez obtenir une lecture "résistance faible". La capacité interne du MOSFET sur la grille a maintenant été chargée par le multimètre et le MOSFET est "passant".
5. Avec la sonde + du multimètre toujours connecté au drain, touchez un doigt entre la source et la grille. La Grille sera déchargée par votre doigt, le MOSFET se bloque et la lecture du multimètre devrait augmenter, indiquant le blocage du MOSFET.

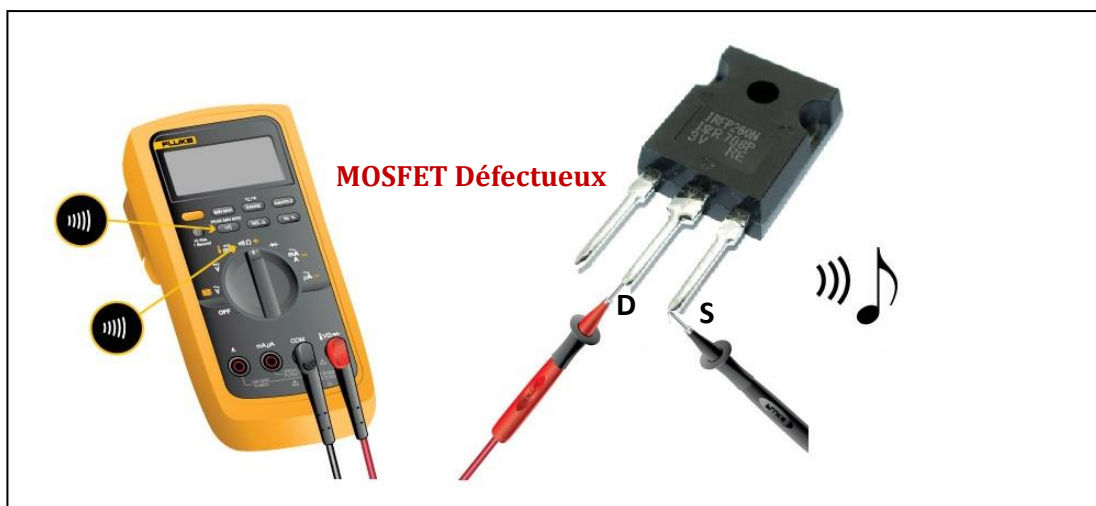
Si l'ensemble de ces tests est concluant le transistor MOSFET fonctionne. Un test aussi simple n'est pas décisif à 100 %, mais il est utile et généralement adéquat.

9.2. Test du MOSFET au multimètre en mode ohmmètre.

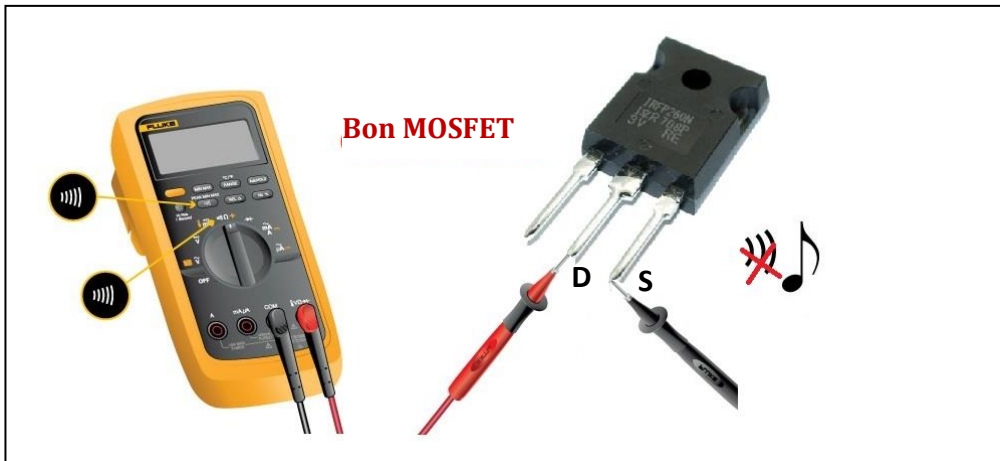
9.2.1 TEST 1 :

Connectez les cordons de test aux bornes D et S du MOSFET. Gardez les fils de test connectés pendant quelques secondes comme ci-dessous.

Si le buzzer du multimètre est activé (résistance faible), le MOSFET est défectueux.



Si le buzzer du multimètre n'est pas activé (grande résistance), le MOSFET est en bonnes conditions.



9.2.2 TEST 2:

Pour le tester rapidement en circuit, on vérifie au multimètre hors tension qu'il n'est pas passant (une résistance nulle) dans les deux sens entre S, G, entre G, D et entre S, D.

Remarque : Le test avec un multimètre ne donne un diagnostic certain que si le transistor est en court-circuit franc. Dans les autres cas le diagnostic n'est pas certain donc la méthode est limitée.

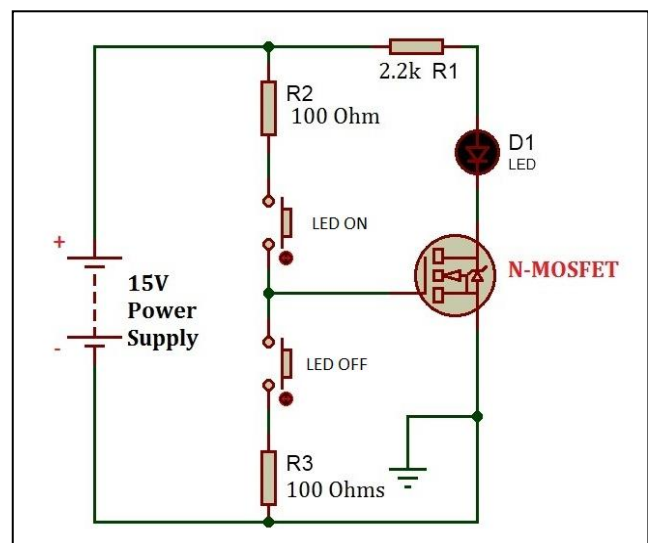
9.3. Test du MOSFET sur plaque à essai.

On peut tester le MOSFET en simulant son fonctionnement dans un montage typique comme ci-dessous.

9.3.1 MOSFET canal N :

Lorsque vous appuyez sur l'interrupteur (LED ON Switch)

- Si la LED est allumée, le MOSFET est bon.
- Sinon, la LED est éteinte, le MOSFET est mauvais.



Lorsque vous appuyez sur l'interrupteur (interrupteur LED OFF) Ω

- Si la LED est éteinte, le MOSFET est bon.

- Sinon, le MOSFET est mauvais.

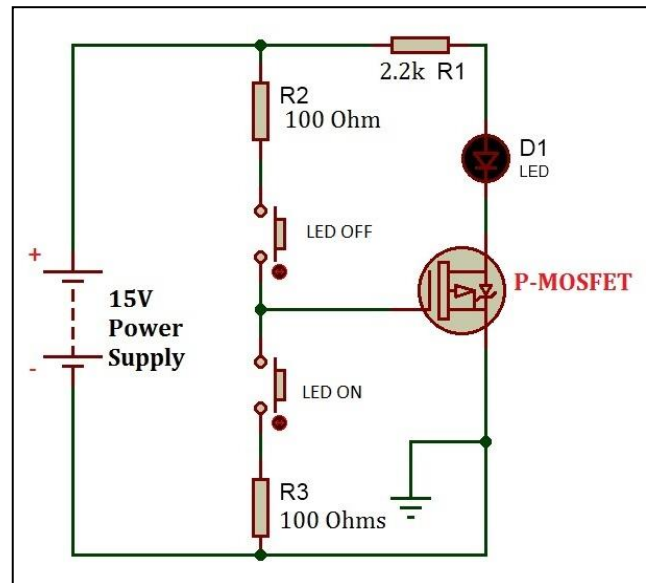
9.3.2 MOSFET canal P :

Lorsque vous appuyez sur l'interrupteur (LED ON Switch)

- Si la LED est éteinte, le MOSFET est bon.
- Sinon, la LED est allumée, le MOSFET est mauvais.

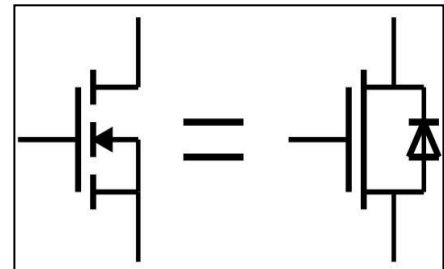
Lorsque vous appuyez sur l'interrupteur (interrupteur LED OFF)

- Si la LED est allumée, le MOSFET est bon
- Sinon, le MOSFET est mauvais.



9.4. Identification d'un MOSFET inconnu

En réalité les connexions internes mettent en contact une zone dopée N avec une zone dopée P, ce qui crée une diode parasite. Un transistor MOSFET à trois broches se comporte comme un transistor FET à grille isolée, en parallèle avec une diode dite intrinsèque, entre la source et le drain. Cette caractéristique va nous aider dans l'identification.



Pour trouver la source et le drain, il suffit de trouver une chute de tension d'environ 0,6V, correspondant à la diode parasite. Cela implique 3 paires de tests, un test dans chaque sens (car la diode n'apparaît que dans un sens).

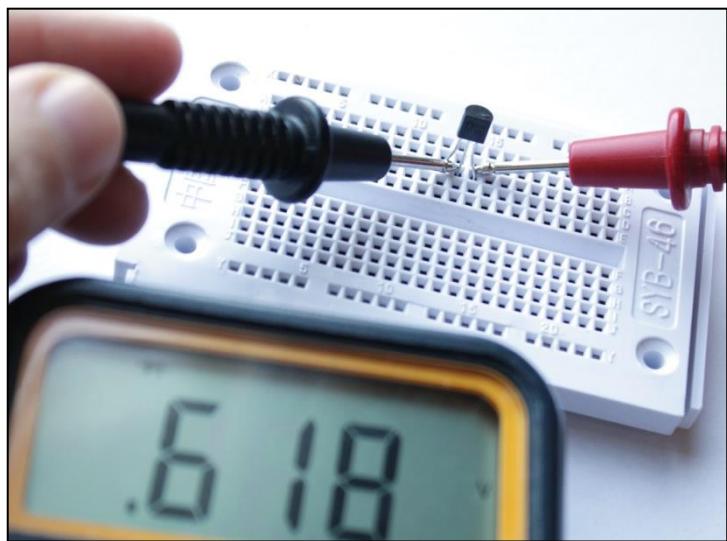
Cependant, à cause de l'effet mémoire, si on charge la grille (une chance sur deux), alors le transistor devient passant : on mesure donc une résistance très faible, ou une tension presque nulle, entre la source et le drain. On ne peut pas savoir le sens (puisque c'est symétrique), car la diode parasite est court-circuitée.

Il est donc important, entre chaque test, de court-circuiter les 3 broches entre elles, pour décharger la grille et rendre le transistor bloqué.

Pour trouver le type, c'est simple : regardez si le transistor devient passant si vous chargez la grille positivement ou négativement (inversez le sens des pointes de mesure).

Puisqu'il y a 3 broches, on peut retrouver le brochage et le type d'un MOSFET avec 6 combinaisons de mesures. La procédure pour trouver la source et le drain est :

- Étiqueter les broches inconnues avec les noms A, B et C, (ou 1, 2, 3)
- Court-circuiter A, B et C,
- Mesurer A – B,
- Mesurer B – A,
- Court-circuiter A, B et C,
- Mesurer C – B,
- Mesurer B – C,
- Court-circuiter A, B et C,
- Mesurer A – C,
- Mesurer C – A.



Une de ces mesures donne 0,6V environ : la source est alors connectée à la sonde positive et le drain à la sonde négative. Par déduction, la broche non testée est la grille.

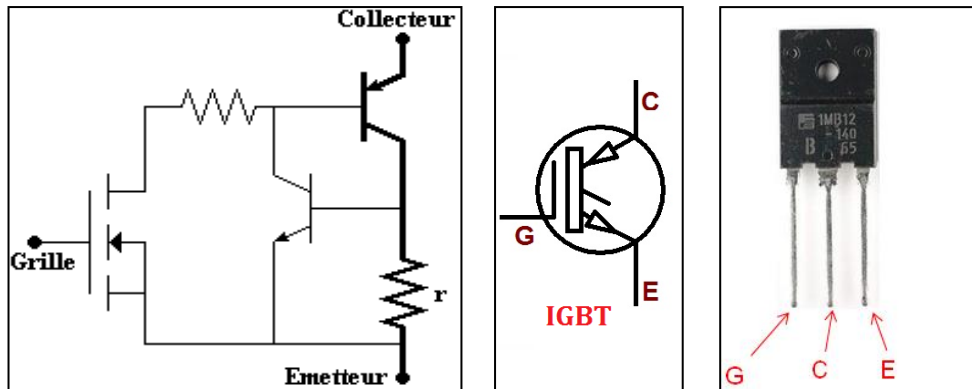
Si vous trouvez une chute de tension de 0,6V à deux endroits alors c'est probablement un transistor bipolaire.

Ensuite, connectez la sonde + à la grille et la sonde - à la source, puis mesurez la chute de tension entre la source et le drain (la sonde + est déplacée sur l'autre broche). La chute de tension doit être quasiment nulle pour un MOSFET canal N, au lieu d'une très forte résistance.

Pour vérifier si c'est un canal P, inverser les sondes + et - (- sur la grille, + à la source), puis - sur le drain, qui donne une tension nulle (résistance nulle).

10. Les transistors IGBT

Le transistor IGBT présente une structure équivalente à l'association d'un transistor MOSFET avec deux transistors bipolaires et deux résistances. Le transistor IGBT conserve les caractéristiques d'un MOSFET en étant commandé par une tension délivrée au niveau de sa grille G et sa structure lui permet de gérer une tension plus importante que le MOSFET.



Le transistor IGBT comprend trois bornes G, C et E.

10.1. Test d'un IGBT au multimètre en mode test de diode.

La procédure est similaire à celle appliquée pour tester le MOSFET.

1. Placez COM sur E.
2. Tenez l'IGBT par le boîtier, mais ne touchez pas les parties métalliques des sondes de test avec les autres bornes de l'IGBT jusqu'à ce que vous en ayez besoin.
3. Tout d'abord, reliez la borne + du multimètre avec la « Grille » de l'IGBT. Ce dernier s'amorce par la pile du multimètre.
4. Déplacez maintenant la sonde + vers le 'Collecteur'. Vous devriez obtenir une lecture "résistance faible". La capacité interne de l'IGBT sur la grille a maintenant été chargée par le multimètre et l'IGBT est "passant".
5. Avec la sonde + du multimètre toujours connecté au Collecteur, touchez un doigt entre l'émetteur et la grille. La Grille sera déchargée par votre doigt, l'IGBT se bloque et la lecture du multimètre devrait augmenter, indiquant le blocage de l'IGBT.

Si l'ensemble de ces tests est concluant le transistor IGBT fonctionne.

10.2. Test d'un IGBT au multimètre en mode ohmmètre.

10.2.1 TEST 1:

Connectez les cordons de test aux bornes C et E de l'IGBT. Gardez les fils de test connectés pendant quelques secondes comme ci-dessous.

Si le buzzer du multimètre est activé (résistance faible), l'IGBT est défectueux.



Si le buzzer du multimètre n'est pas activé (grande résistance), l'IGBT est en bonnes conditions.



10.2.2 TEST 2:

Pour le tester rapidement en circuit, on vérifie au multimètre hors tension qu'il n'est pas passant (une résistance nulle) dans les deux sens entre E, G, entre G, C et entre E, C.

10.3. Test d'un IGBT sur plaque à essai.

On peut tester l'IGBT en simulant son fonctionnement dans un montage typique comme ci-dessous.

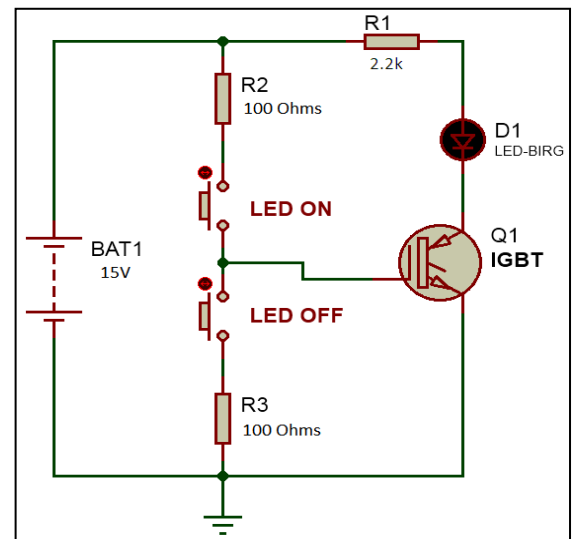
10.3.1 IGBT canal N :

Lorsque vous appuyez sur l'interrupteur (LED ON Switch)

- Si la LED est allumée, l'IGBT est bon.
- Sinon, la LED est éteinte, l'IGBT est mauvais.

Lorsque vous appuyez sur l'interrupteur (interrupteur LED OFF)

- Si la LED est éteinte, l'IGBT est bon.
- Sinon, l'IGBT est mauvais.



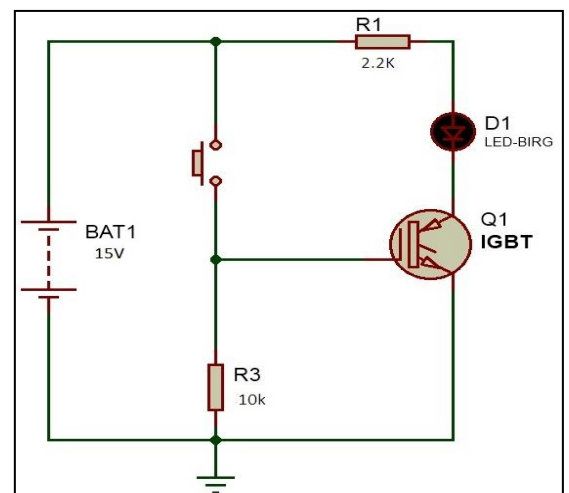
10.3.2 IGBT canal P :

Lorsque vous appuyez sur l'interrupteur (LED ON Switch)

- Si la LED est éteinte, l'IGBT est bon.
- Sinon, la LED est allumée, l'IGBT est mauvais.

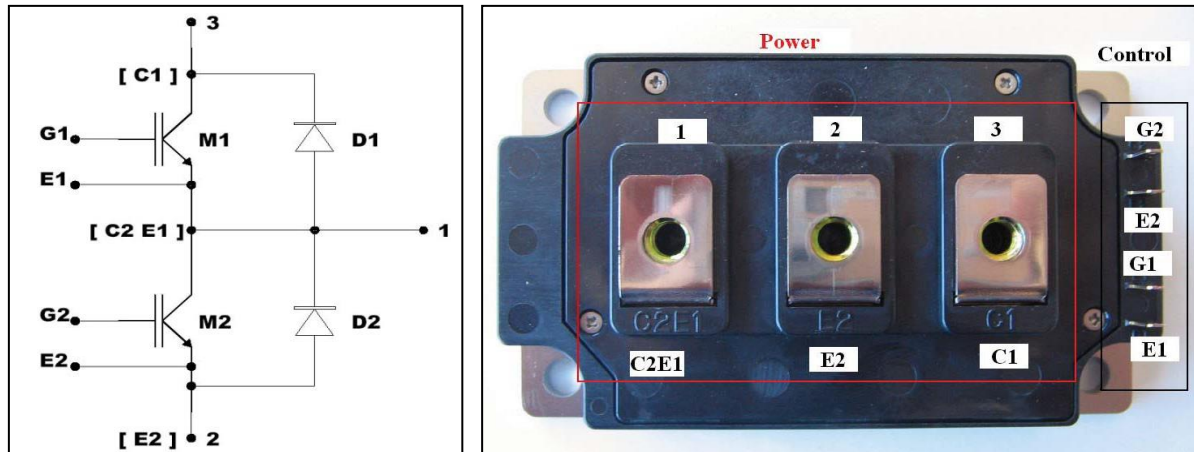
Lorsque vous appuyez sur l'interrupteur (interrupteur LED OFF)

- Si la LED est allumée, l'IGBT est bon
- Sinon, l'IGBT est mauvais.



10.4. Test des modules doubles IGBT.

Un module double IGBT est composé de deux transistors bipolaires à grille isolée (IGBT) avec deux diodes en antiparallèle. Ce module est très répandu surtout comme bras dans les onduleurs.



Le module double IGBT est largement utilisé dans les convertisseurs de puissance. Les applications typiques incluent : les onduleurs, les alimentations à découpage, les variateurs de vitesse et de fréquence... etc.

Les modules IGBT peuvent être testés rapidement, en utilisant un multimètre standard, et le test consiste à vérifier trois choses :

- La Grille est isolée des émetteurs relatifs ;
- Les Diodes sont en bon état ;
- Les IGBT sont en bon état.

Ce type de procédure de test IGBT n'est pas complet, car pour vérifier l'efficacité complète de ces modules, il est nécessaire de les tester dans des conditions de fonctionnement réelles comme dans les montages typiques ci-dessus.

Cependant, cette procédure est utile pour un test rapide de bon fonctionnement ou non.

AVERTISSEMENTS :

- Les modules IGBT sont très sensibles aux décharges électrostatiques (DES). Il est recommandé de les manipuler avec soin, de ne jamais toucher les bornes de la Grille et de porter des vêtements antistatiques.

- Utilisez toujours un multimètre alimenté par batterie pour effectuer ce type de tests, avec une tension de batterie maximale de 9 VDC. Si une tension supérieure à 20VDC est appliquée entre les bornes de grille (G1-E1 G2-E2) le module sera endommagé.

10.4.1 Procédure de test

1) TEST DES GRILLES.

Réglez le multimètre en mesure OHM.

1. Vérifiez que les broches de contrôle G1 et E1 sont ISOLÉS ;
2. Vérifiez que les broches de contrôle G2 et E2 sont ISOLÉS.

2) TEST DE L'ÉTAGE DE PUISSANCE

Test au multimètre en mode test de diode.

Réglez le multimètre en mode de test DIODE.

1. Connectez G1 à E1 et G2 à E2.
2. Connectez la SONDE + du multimètre à la borne 1 du module et la SONDE - à la broche 3. L'affichage du multimètre doit indiquer la tension directe de la diode (généralement 0,6 - 0,8 V). Si l'écran affiche un circuit ouvert ou un court-circuit, la DIODE D1 est défectueuse.
3. Connectez la SONDE + du multimètre à la borne 3 du module et la SONDE - à la broche 1. L'affichage du multimètre doit indiquer un circuit ouvert. Si l'écran n'affiche pas de circuit ouvert, l'IGBT M1 est défectueux.
4. Connectez la SONDE + du multimètre à la borne 2 du module et la SONDE - à la broche 1. L'affichage du multimètre doit indiquer la tension directe de la diode (généralement 0,6 - 0,8 V). Si l'écran affiche un circuit ouvert ou un court-circuit, la DIODE D2 est défectueuse.

5. Connectez la SONDE + du multimètre à la borne 1 du module et la SONDE – à la broche 2. L'affichage du multimètre doit indiquer un circuit ouvert. Si l'écran n'affiche pas de circuit ouvert, l'IGBT M2 est défectueux.

Test au multimètre en mode ohmmètre.

1. Vérifier si l'IGBT est en court-circuit

- a) Mesurer la résistance entre C2/E1 et E2.
- b) Mesurer la résistance entre C2/E1 et C1.

Si vous mesurez un court-circuit (0 ohms) à l'étape a. ou b. l'IGBT est défectueux.

2. Amorcer M1, M2

À l'aide d'un ohmmètre numérique :

1. Touchez le fil + (rouge) du multimètre à G1 et le - (noir) à E1.
2. Touchez le fil + (rouge) du multimètre à G2 et le - (noir) à E2.
3. Mesurer la résistance entre C1 et C2/E1. Vous devez lire une faible résistance (environ une chute de diode). Inversez les fils du multimètre, la lecture doit être la même.
4. Mesurer la résistance entre E2 et C2/E1. Vous devez lire une faible résistance (environ une chute de diode). Inversez les fils du multimètre, la lecture doit être la même.

3. Bloquez M1, M2

À l'aide d'un ohmmètre numérique :

1. Touchez le fil + (rouge) du multimètre à E1 et le - (noir) à G1.
2. Touchez le fil + (rouge) du multimètre à E2 et le - (noir) à G2.
3. Mesurer la résistance entre C2/E1 (+) et C1 (-). Vous devez lire une faible résistance (environ une chute de diode.). Inverser les fils du multimètre. Vous devez lire une résistance infinie.
4. Mesurer la résistance entre C2/E1 (-) et E2 (+). Vous devez lire une faible résistance (environ une chute de diode.). Inverser les fils du multimètre. Vous devez lire une résistance infinie.

Remarque : Certains ohmmètres numériques n'ont pas assez de puissance pour amorcer un IGBT. Une pile de 9 volts peut être utilisée à la place.

Bibliographie

- Fondements d'électronique, Thomas. L. Floyd, EYROLLES Edition
- Electronique : Composants et systèmes d'application Thomas. L. Floyd, EYROLLES Edition
- Electronic Devices And Circuits Lab (2014-15), Aurora's Engineering College, Ece/Eee- Edc Lab
- Laboratory Manual : Power Electronics, Prof. Keshav B Negalur, Hirasugar Institute Of Technology, Nidasoshi
- OSCILLOSCOPE_H M 3 0 3 – 6, Hameg Instruments GmbH
- Apprendre L'électronique En Partant De Zéro _ Niveau 1, Pont De Mesure Rlc De Table_ Manuel D'utilisation, Bk Precision
- Maintenance Electronique, Mr. Mazoughou Goepogui
- Réparez Vous-Même Vos Appareils Électroniques, Jean Boyer, Éditions Eyrolles
- Tester Des Diodes Et Des Transistors Avec Un Simple Multimètre Digital, Thierry, Novembre 2010.
- Bases Des Semi-Conducteurs, Melanie Wäschle, Festo Didactic, Allemagne, 2014
- Electronic Troubleshooting, Daniel R. Tomal, Ph.D., Aram S. Agajanian, Ph.D., Fourth Edition
- Electronic Devices And Circuit Theory, Robert L. Boylestad, Louis Nashelsky, Eleventh Edition
- How To Diagnose And Fix Everything Electronic, Michael Jay Geier, Mc Graw Hill Education
- Electrician's Troubleshooting And Testing Pocket Guide, H. Brooke Stauffer & John E. Traister, Mc Graw Hill

Sites internet

- Troubleshooting Diodes , BJTs , TRIACs, SCRs
- Stratégie de test et contrôle des cartes électroniques
- Recherche des pannes sur le matériel électronique
- Infographic_ 8 Steps to Troubleshoot Your Electronic Circuit
- Dépannage des circuits électroniques
- Cours défaillances des composants
- Vérification du compteur d'un transistor (BJT) _ Transistors à jonction bipolaire _ Manuel d'électronique
- Vérification du compteur d'un transistor (JFET) _ Transistors à effet de champ à jonction _ Manuel d'électronique
- Vérification du compteur d'une diode _ Diodes et Redresseurs _ Manuel d'électronique
- 4 manières d'utiliser un multimètre numérique – wikiHow
- Analyse V_I pour le contrôle des cartes électroniques

Chapitre IV

TRAVAUX DIRIGES / AUTOEVALUATION

