

LE THYRISTOR

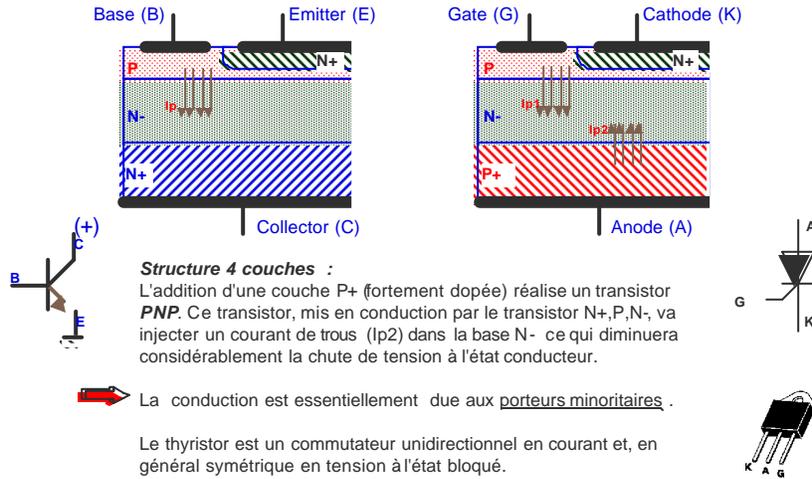
LE THYRISTOR - GENERALITES *S.C.R : Silicon Controlled Rectifier*

- **Structure 4 couches** - Rappel -
- **Caractéristiques statiques :**
 - **Etat bloqué**
Tenue en tension
 - **Etat Conducteur.**
Limites en courant / Pertes en conduction / Surcharge
- **Caractéristiques dynamiques :**
 - **Fermeture .**
Courant de gâchette
Courant d'accrochage.
Limite en d/dt .
 - **Ouverture**
Courant de maintien
Temps d'ouverture (t_q)
Tenue en dv/dt
- **Applications**

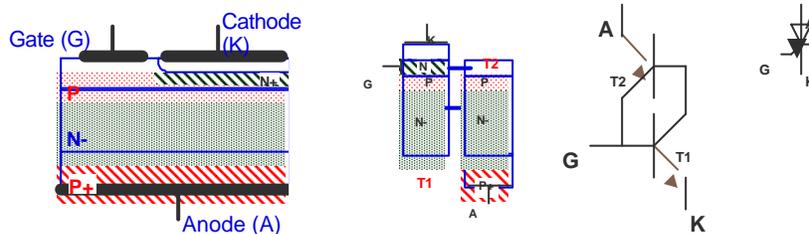
STRUCTURE THYRISTOR Structure 4 couches

TRANSISTOR

SCR



STRUCTURE THYRISTOR Mise en conduction et blocage / schéma équivalent



Mise en conduction: $I_{B2} = I_G > 0 \Rightarrow I_{C2} = \beta_2 \cdot I_{B2} = I_{B1} \Rightarrow I_{C1} = \beta_1 \cdot I_{B1}$
 $I_{B2} = I_G + I_{C1}$

La courant de gâchette peut être supprimé. La structure reste dans cet état auto-saturé

La condition de stabilité est:

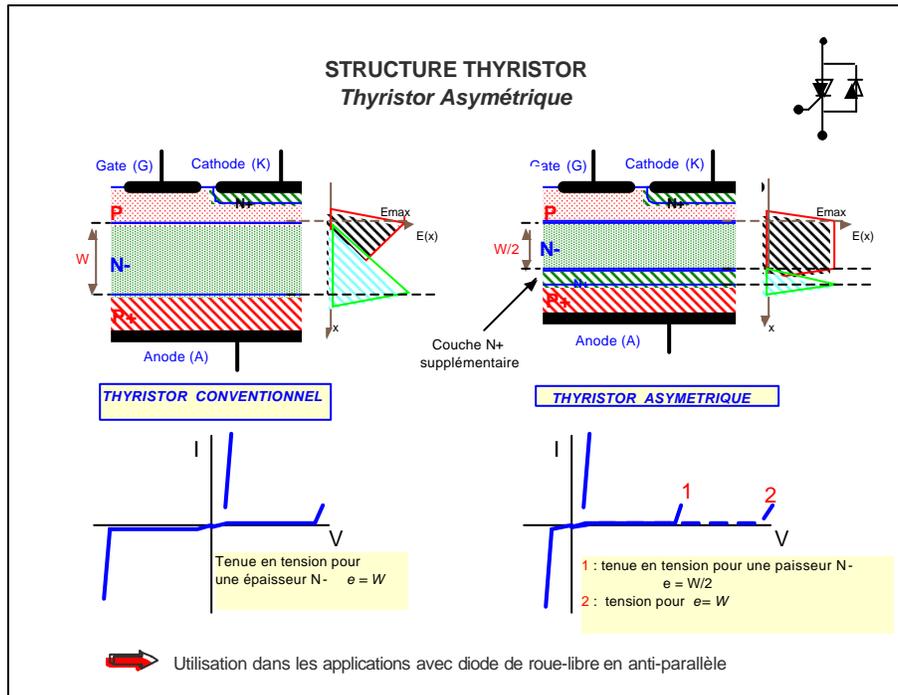
$$I_{C2} = \beta_1 \cdot \beta_2 \cdot I_{C2} \Rightarrow \beta_1 \cdot \beta_2 = 1$$

On utilise pour cela des transistors hyper-saturés où le gain vaut 1 ($I_{C1} \rightarrow I_B$)

Retour à l'état bloqué:

Un Thyristor est non ouvrable par la gâchette (a priori).

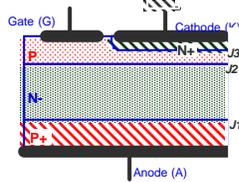
L'ouverture ne peut se faire que par l'interruption extérieure du courant d'anode.



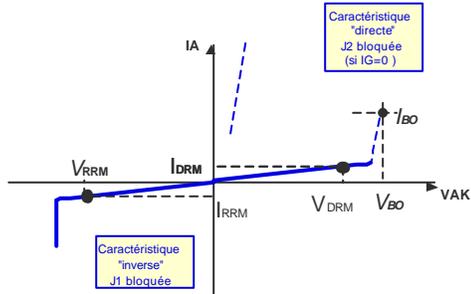
CARACTERISTIQUE STATIQUE

- Etat Bloqué
- Etat conducteur

CARACTERISTIQUE STATIQUE Etat Bloqué



A > 0 : Direct ("forward")
A < 0 : Inverse ("reverse")

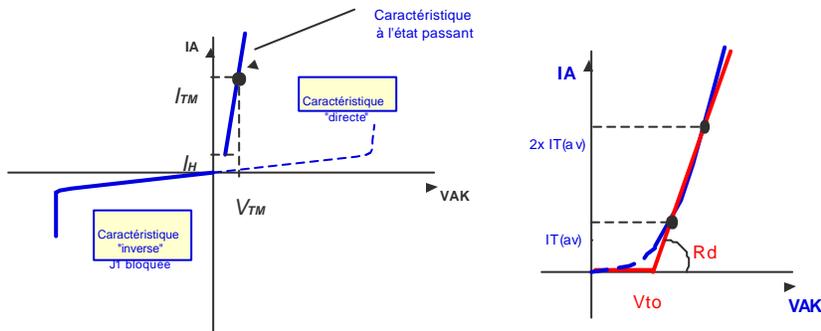


Paramètres :

- VDRM** : Tension max en direct à l'état bloqué (**Forward**)
 - IDRM** : Courant de fuite à $V_D = V_{DRM}$ (à $T_J=25^\circ\text{C}$ et $T_J=T_{JMax}$)
 - VRRM** : Tension max en inverse (**Reverse**)
 - IRRM** : Courant de fuite à $V_R = V_{RRM}$ (à $T_J=25^\circ\text{C}$ et $T_J=T_{JMax}$)
 - VBO** : Tension de retournement (*Breakover voltage*)
 - IBO** : Courant de retournement
- } **Limites spécifiées**
} **Fonctionnement interdit**

Les thyristors actuellement fabriqués vont de 100V à 1000V pour les "petits" thyristors (<50 Amp) et jusqu'à 5kV pour les thyristors de forte puissance (2kA)

CARACTERISTIQUE STATIQUE Etat Conducteur

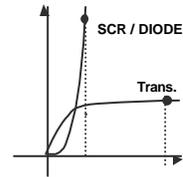


La caractéristique à l'état passant d'un thyristor est semblable à celle d'une diode. On spécifie la chute de tension **VTM** pour le courant crête **ITM**.

Comme pour les redresseurs on utilise le modèle simplifié V_{to} et R_d :

$$P_{cond} = V_{to} \cdot I_T(av) + R_d \cdot I_T^2(rms)$$

CARACTERISTIQUE STATIQUE Limites en courant



Le paramètre physique qui limite le courant est la température de jonction (T_j Max) spécifiée par le constructeur.

COURANT MOYEN (I_{Tav}) [Average Current]

Le courant maximum donné dans les feuilles de spécification est le courant moyen spécifié à une certaine température de boîtier T_c [Case temperature].
(la forme d'onde et le rapport cyclique sont pratiquement toujours un sinus 180°)

$$T_j \leq T_j \text{ Max avec } T_j = T_{case} + P(I_{av}) \cdot R_{th}(j-c)$$

Paramètre clé : $R_{th}(j-c)$ [Junction to case thermal resistance]

COURANT EFFICACE: $I_T(\text{rms})$

Valeur >> aux valeurs des applications typiques (dépend de T_c).
Le courant efficace max spécifié correspond souvent à $I_T(\alpha) \cdot \pi / 2$ (cas d'une onde sinusoïdale).

COURANT DE SURCHARGE: I_{TSM}

[Surge non repetitive Current]
Limite fixée par les éléments résistifs du montage : contacts, câblage interne [bonding].
Un thyristor est un composant très robuste en courant: Surcharge impulsionnelle = 10 à 100 fois le courant nominal.

CARACTERISTIQUE STATIQUE Surcharge en courant

I_{TSM} : courant crête, sinusoïdal, de surcharge non répétitif spécifié généralement pour $t_p = 10\text{ms}$

Pour d'autres durées:

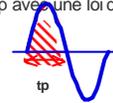
L' I_{TSM} est une limite thermique. On peut retrouver le courant max pour une durée t_p avec une loi de type $I^2 \cdot t$

$$\Rightarrow I^2 \cdot t = \int i^2(t) dt \Rightarrow I^2 \cdot t = \frac{I_{TSM}^2 \cdot t_p}{2}$$

\Rightarrow loi utile pour dimensionner le fusible de protection du SCR

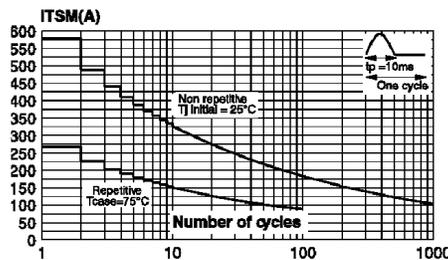
\Rightarrow loi valable uniquement pour des durées de pulse > 1 ms

(pour des temps inférieurs: problème de dI/dt : voir caractéristique dynamique & amorçage)



Pour des impulsions répétitives:

Utilisation de l'abaque de courant de surcharge répétitif
(ou s'assurer par calcul que T_j reste inférieure à T_j max).

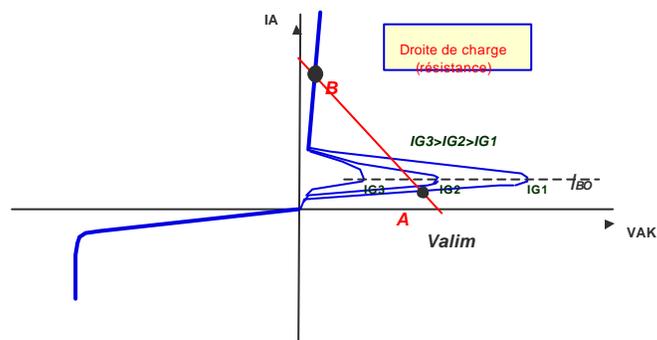


Exemple de courbe de courant de surcharge
(BTW67 - thyristor 50Amp 1200V)

CARACTERISTIQUE DYNAMIQUE - FERMETURE -

- Courant de gâchette
- Caractéristique V/I de gâchette
- Courant d'accrochage
- Temps de fermeture
- di/dt à la fermeture

CARACTERISTIQUE DYNAMIQUE *Amorçage*



Le passage de l'état bloqué (point A) à l'état conducteur (point B) se fait en injectant un courant dans la gâchette.
Dès que le courant IG est suffisant, la caractéristique tension-courant du thyristor devient tangente à la droite de charge et présente une résistance négative, le thyristor bascule sur la caractéristique "état passant" et le nouveau point de fonctionnement stable est alors le point B.

CARACTERISTIQUE DYNAMIQUE

Courant de gâchette - Tension de gâchette

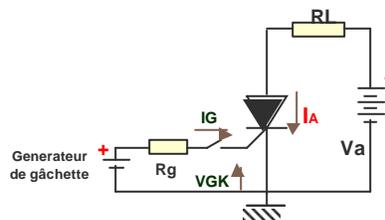
IGT : [Gate trigger current]
 Valeur **maximum** du courant de gâchette nécessaire au déclenchement du thyristor



C'est la valeur **minimale** qu'il faut envoyer dans la gâchette pour être sûr d'amorcer le SCR à tous les coups.

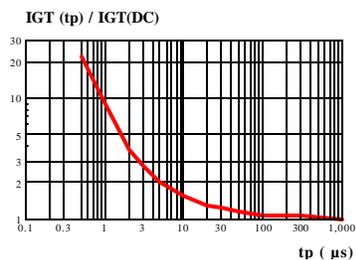
VGT = [Gate trigger voltage]
 Tension maximum de gâchette (entre gâchette et cathode) lorsque le courant IGT est appliqué.
VGD = [Gate non-trigger voltage]
 Valeur minimale de la tension de gâchette assurant le non déclenchement du thyristor (immunité).

Conditions de mesures typiques :
 $V_a = 16 \text{ V DC}$
 $R_L = 12 \text{ Ohms}$
 $T_j = 25 \text{ }^\circ\text{C}$
 Courant de gâchette continu (ou $t_p > 300 \mu\text{s}$)

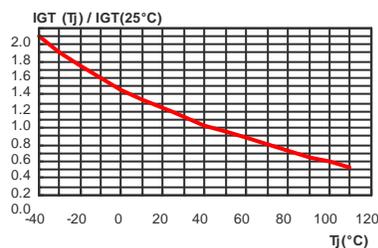


CARACTERISTIQUE DYNAMIQUE

I_{GT} fonction de t_p et de T_j



En fait, il faut injecter une quantité de charge minimale pour amorcer le thyristor pour $t_p < 20 \mu\text{s}$: $Q = i \cdot t = Cte$

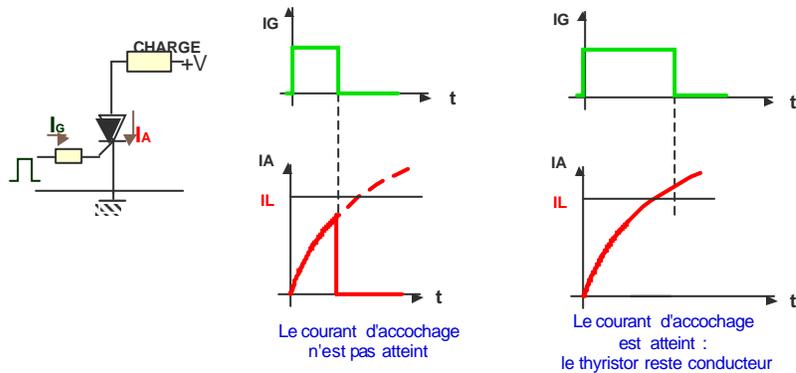


Le courant IGT augmente rapidement lorsque la température diminue.
 Pour dimensionner le circuit de gâchette il faut prendre en compte la température ambiante minimum de fonctionnement.

Pour déclencher correctement un thyristor il faut :
 $IG \gg IGT$
(2 à 5 fois la valeur max spécifiée est recommandé)

CARACTERISTIQUE DYNAMIQUE Courant d'accrochage

Pour avoir un transistor saturé, c.a.d pour avoir $\beta_1 + \beta_2 = 1$ il faut amener le courant I_A à un **niveau suffisant**

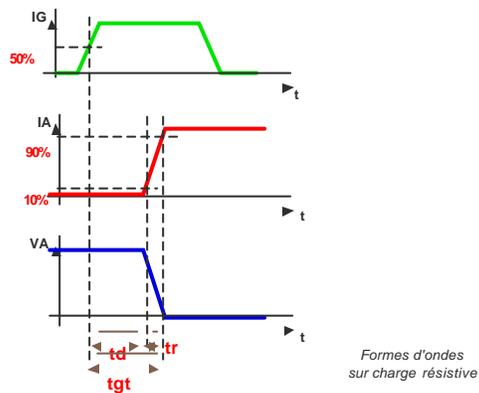


Le courant d'accrochage (I_L : **Latching current**) est spécifié pour un courant de gâchette et à une température de jonction (en général 25°C) donnés .

CARACTERISTIQUE DYNAMIQUE Temps de fermeture

$$t_{gt} = t_d + t_r$$

t_d = delay time
 t_r = rise time



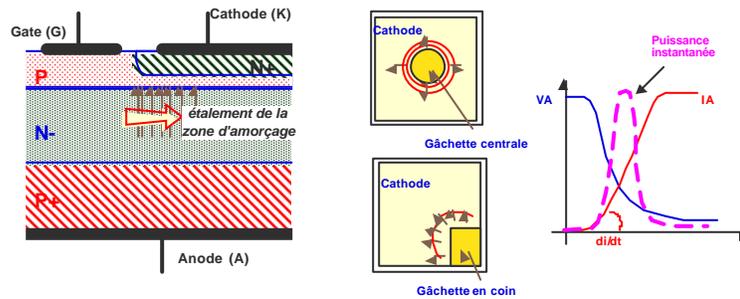
Le **temps de retard (t_d)** diminue quand le courant de gâchette augmente.

t_d est voisin de **0.5 μ s** pour un courant de gâchette $> 5.I_{GT}$

Le **temps de montée du courant (t_r)** est en général fixé par le circuit (inductance de la charge et /ou inductances parasites).

Pour une charge purement résistive (ou capacitive), ce temps est limité uniquement par le composant $t_r \sim 100$ ns (risque de destruction du composant).

CARACTERISTIQUE DYNAMIQUE Limite en di/dt à l'amorçage



Toute la surface du thyristor ne s'amorce pas instantanément
 La zone de conduction s'étend progressivement à partir de la jonction gâchette - cathode à toute la surface sous l'émetteur (la cathode)
 Vitesse : # $50\mu\text{m}/\mu\text{s}$

Il est important de limiter le courant au début de la conduction compte tenu de la faible surface conductrice
 Une densité de courant trop importante peut détruire le composant ("points chauds" fusion du Silicium)
Le di/dt doit être limité en dessous de la valeur Max spécifiée ($50-200\text{ A}/\mu\text{s}$ qq soit le calibre)

CARACTERISTIQUE DYNAMIQUE Pertes à la fermeture

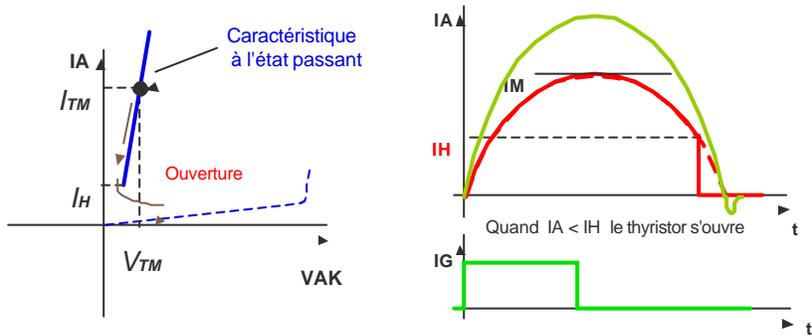
Les pertes à la fermeture sont négligeables lorsque le thyristor fonctionne à des fréquences $< 500\text{Hz}$ (cas des applications en contrôle de phase)

Les thyristors dits "rapides", utilisés dans les convertisseurs à découpage, sont optimisés pour augmenter la vitesse d'amorçage et sont spécifiés en pertes à la fermeture.

CARACTERISTIQUE DYNAMIQUE - BLOCAGE -

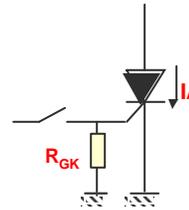
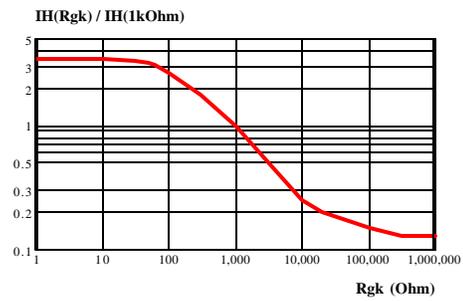
- Courant de maintien
- Temps d'ouverture
- Tenue en dv/dt

CARACTERISTIQUE DYNAMIQUE Courant de Maintien



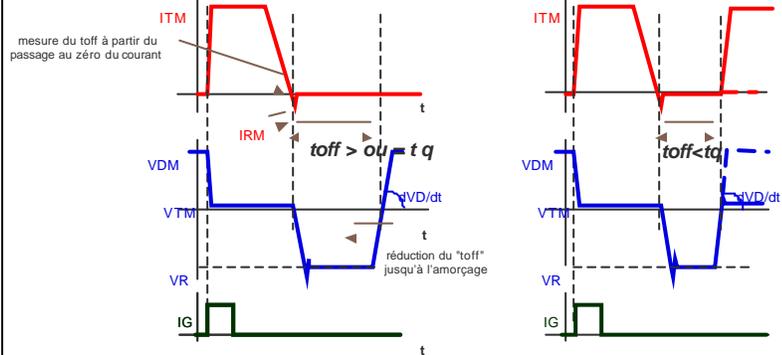
- Le courant de maintien [Holding Current] est fonction :
- du courant I_M qui circulait dans le thyristor avant l'ouverture
 - de la vitesse de décroissance de ce courant
 - de la température jonction ($I_H \nearrow$ si $T_J \searrow$)
 - de la sensibilité ($I_H \sim I_{GT}$)

CARACTERISTIQUE DYNAMIQUE I_H fonction de R_{GK}



Exemple de variation de I_H avec l'impédance de gâchette
(cas d'un thyristor "sensible" : $i_{GT} > 100\mu A$)

CARACTERISTIQUE DYNAMIQUE Temps d'ouverture (t_q)

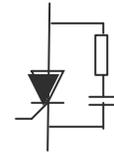
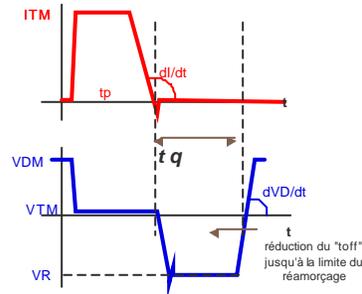


La tension directe est réappliquée
après un temps **toff > tq** :
Le thyristor reste bloqué.

La tension directe est réappliquée
après un temps **toff < tq** :
Le thyristor se réamorçait spontanément.

Les thyristors "standard" ont des t_q de l'ordre de 100 μs et seront limités aux fréquences inférieures à 500 Hz (contrôle de phase).
Les thyristors dits "rapides" mettent en oeuvre des technologies et des structures spécifiques pour réduire le t_q et autoriser des fréquences de commutation jusqu'à 20 kHz ou davantage, dans des onduleurs à résonance.

CARACTERISTIQUE DYNAMIQUE Paramètres influençant le temps d'ouverture



Le t_q est fonction de :

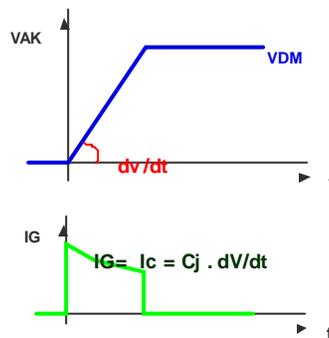
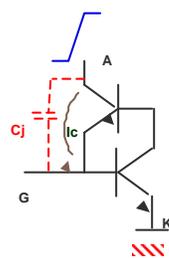
- la température jonction (TJ)
- le courant d'anode initial (ITM) et de la durée de la conduction (t_p)
- la pente de décroissance du courant d'anode (dI/dt)
- la tension inverse de blocage (VR)
- le dV/dt réappliquée ainsi que l'amplitude de la tension directe (VDM)
- Polarisation de la gâchette au moment de l'ouverture.

Paramètres	t_q
Tj	↘
ITM	↘
dI/dt	↘
VR	↗
dV/dt	↘
Vgk < 0	↗

Solutions pour des SCR rapides :

- Bombardement Electrons ou Dopage Or => diminution durée de vie (inc.: $V_{ON} \nearrow$; $V_{DRM} \searrow$; $I_{GT} \nearrow$)
- Les SCR asymétriques ont un t_q + faible que les symétriques (V_{ON} & V_{DRM} identiques)
- Circuit de Snubber

CARACTERISTIQUE DYNAMIQUE Tenue en dV/dt

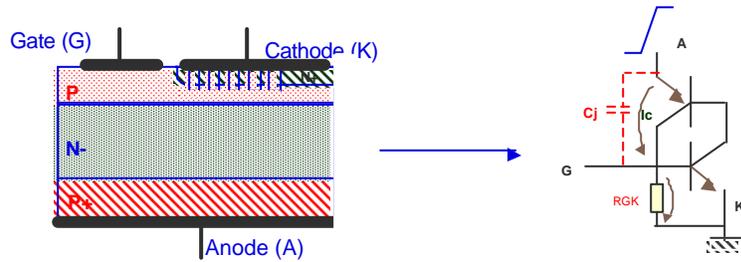


Thyristor à l'état bloqué :

Si la rampe de tension directe (dV/dt) appliquée entre Anode et Cathode est supérieure au dV/dt critique, le courant capacitif traversant la structure met le thyristor en conduction.

NB: ce type d'amorçage intempestif n'est pas destructif.

CARACTERISTIQUE DYNAMIQUE
Amélioration de la tenue en dV/dt



Les trous de court-circuit dans l'émetteur dérivent une partie du courant base ils agissent comme une résistance entre gâchette et cathode (RGK).

Les thyristors de forte puissance et de moyenne puissance ont des tenues en dV/dt supérieures à $1000 \text{ V}/\mu\text{s}$.

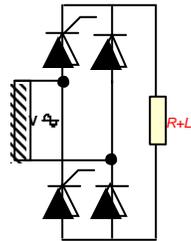
Les petits thyristors (lav <10 Amp) dits "SENSIBLES" n'ont pas ou peu de trous de c/c :
 $\text{IGT} < 100 \mu\text{A}$ & dV/dt de l'ordre de $10 \text{ V}/\mu\text{s}$

APPLICATIONS

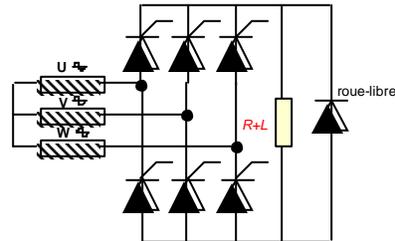
APPLICATIONS
Thyristors de Puissance (50A - 2kA)

Le thyristor est le composant idéal pour la conversion Alternatif - continu :
 - Il tient la tension AC sans ajout d'une diode en série.
 - L'ouverture se faisant **naturellement** par l'annulation du courant.

La variation de puissance se fait par variation du retard à l'amorçage.



Pont mixte:
✓ chargeurs de batteries



Cycloconvertisseur:
✓ variation de vitesse (Moteur C.C)

APPLICATIONS
Thyristors faible-courant (0.5 - 50A)

Motifs d'utilisation:

- tenue en tension AC & ouverture ZCS
- facilité de commande
- faible coût
- robustesse (surtout en surcharge de courant)

Variateur vitesse petits moteurs:

- Electroménager
- Outillage électrique

Applications industrielles et domestiques :

- Allume gaz
- Disjoncteurs différentiels
- Détecteur de proximité de fumée...etc.
- Chargeur de batterie
- Commande de triac

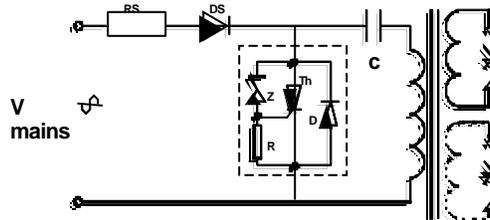
Allumage moteurs

- décharge capacitive

Alimentations (fonctions auxiliaires)

- Limiteur courant d'appel
- Protection sorties secondaires (crowbar)

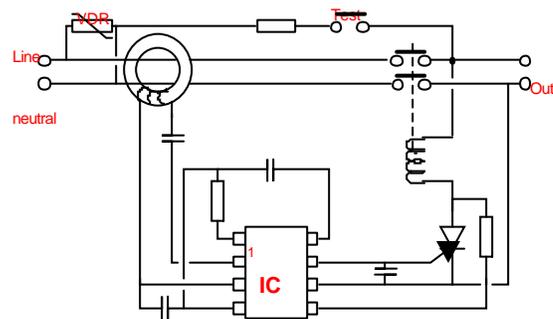
APPLICATIONS Allume-Gaz



La capacité C est chargée par le secteur 230V redressé
 Quand la tension atteint la valeur de la tension d'avalanche de la diode zéner Z le thyristor Th s'amorce et décharge la capacité à travers le primaire du transformateur.
 Un arc apparaît au(x) secondaire(s) THT.
 Le condensateur se recharge à travers la résistance RS.
 La constante de temps "RS.C" définit la fréquence de relaxation.

Rq: Thyristor asymétrique

APPLICATIONS Disjoncteur Différentiel



APPLICATIONS *Thyristors Rapides*

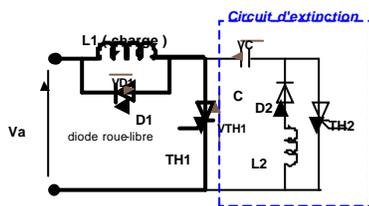
Les thyristors rapides de forte puissance occupent encore une place importante dans des marchés tels que:

- La conversion continu - alternatif très haute tension
- La traction électrique.
- La soudure
- Le chauffage à induction...

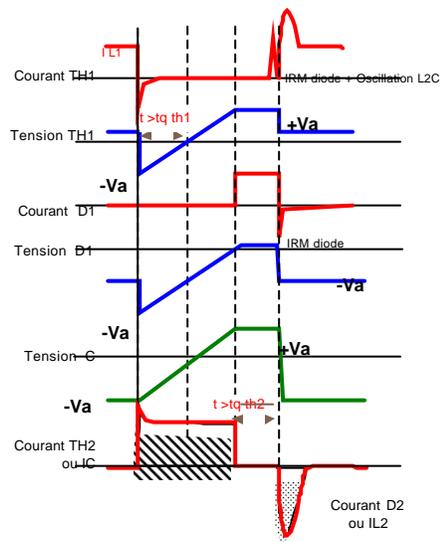
Les topologies mises en oeuvre sont principalement :

- des circuits du type "hacheur" (Convertisseurs DC-DC) (ils nécessitent des circuits auxiliaires d'extinction - ou de "soufflage")
- des onduleurs à résonance bien adaptés aux thyristors (extinction "naturelle" ZCS)

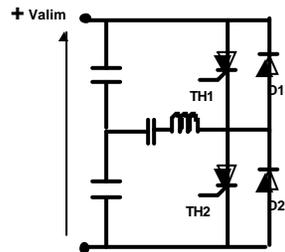
APPLICATIONS *Hacheur + Circuit d'extinction*



Application:
contrôle moteur DC fort courant
ex: traction électrique sur chariot élévateur

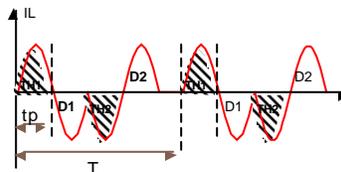


APPLICATIONS
Onduleurs Série



Application:
chauffage à induction; soudure
100 Hz - 20 kHz

Onduleur à 2 thyristors



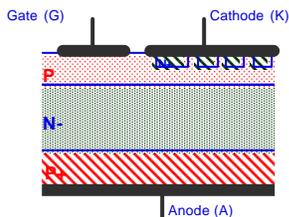
Formes d'ondes

LE G.T.O

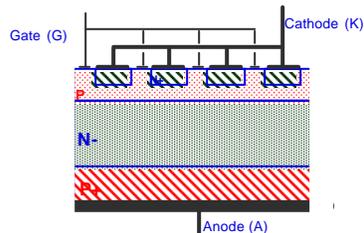
" Gate Turn-Off Thyristor "

(THYRISTOR OUVRABLE PAR LA GACHETTE)

STRUCTURE DU GTO

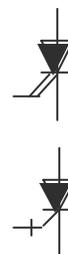


Structure SCR

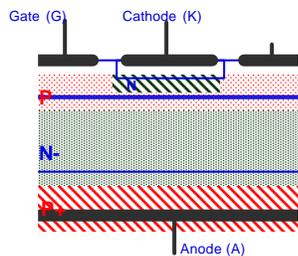


Structure GTO

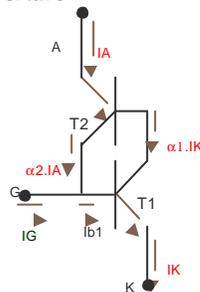
La cathode d'un thyristor GTO est morcelée en un grand nombre d'îlots. La structure d'une cellule élémentaire est semblable à celle d'un thyristor classique.
 Les émetteurs sont entourés par l'électrode de gâchette. Cette interdigitation poussée est nécessaire pour limiter les effets de focalisation sous l'émetteur au moment de l'ouverture (phénomène identique aux transistors bipolaires).



STRUCTURE DU GTO Condition d'ouverture



Cellule de GTO



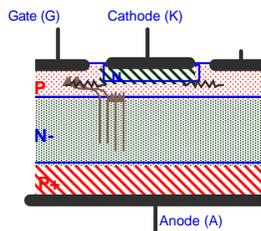
Condition d'ouverture:

Le courant de base (I_{b1}) nécessaire pour maintenir T1 saturé est: $I_K \cdot (1 - \alpha_1)$.
 Le courant de base total est: $I_{b1} = I_G + \alpha_2 \cdot I_A$.
 Le courant I_G qui ouvrira le GTO est tel que: $I_G + \alpha_2 \cdot I_A < I_K \cdot (1 - \alpha_1)$.
 Or on a : $I_K = I_A + I_G$
 Soit $I_G + \alpha_2 \cdot I_A < (1 - \alpha_1) \cdot (I_A + I_G)$
 D'où:

$$-I_G > I_A \cdot [(a_1 + a_2) - 1] / a_1 \quad (\text{courant extrait})$$

Le **Gain à l'ouverture**: G_{CO} ou G est défini par: $G = I_A / I_G = a_1 / [(a_1 + a_2) - 1]$

STRUCTURE DU GTO Amélioration du pouvoir d'ouverture



Le courant extrait par la gâchette crée une différence de potentiel aux bornes de la résistance latérale de la couche P. Cette tension peut atteindre la valeur de la tension d'avalanche de la jonction Gâchette-Cathode (**VBGK**): Le courant de gâchette n'a alors plus aucune efficacité pour le blocage du GTO.

La limite Max du courant ouvrable est de la forme :

$$I_{A \text{ max}} = V_{BGK} / R_b \cdot \alpha^2$$

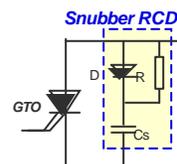
Solutions :

- Tension d'avalanche gâchette-Cathode élevée (Résistivité élevée de couche P).
- Diminuer R_b (intéressant aussi pour l'amorçage) en réalisant des doigts d'émetteur le plus long possible. (la longueur total de l'émetteur peut atteindre 6 à 7 m)

Le courant max ouvrable par GTO est le: **ITCM [Repetitive peak controllable on-state current]**

Ce courant est spécifié à :

- $T_j = T_j \text{ Max}$
- $V_D = V_{DRM}$
- dI/dt donné (souvent associé à une tension inverse de gâchette)
- dV_D/dt réappliqué (ou C_s : Capacité du snubber donnée)



AMORCAGE DU GTO Différences avec le Thyristor

1) LIMITE EN dI/dt

On peut considérer le GTO comme équivalent à un grand nombre de petits thyristors en parallèle (plusieurs centaines). Le temps de mise en conduction de chaque cellule est très court (≈ 1 à $2 \mu s$) aussi le GTO pourra supporter des dI/dt élevés de l'ordre de 300 à 500A/ μs .

2) Courant de gâchette permanent (I_{GON})

En conduction il est fortement conseillé de maintenir le courant de gâchette ($I_{Gon} = 1$ à $4 \text{ fois } I_{GT}$) pour éviter le désamorçage de certaines cellules en cas de variations trop importantes du courant d'anode:

En cas d'une diminution importante du courant dans le circuit, les cellules les moins sensibles vont se désamorcer (pb de IH) et lors du rétablissement du courant, seules les cellules conductrices devront supporter ce courant supplémentaire (**DANGER** de surcharge).

Dans ces cas de figure :

- Les pertes en conduction seront plus élevées.
- Le courant ouvrable est réduit.

CONCLUSION

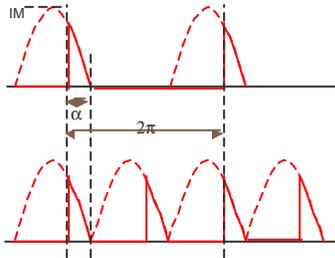
A retenir...

- **Domaine privilégié : basse fréquence , haute tension (> 600 V)**
 - Faible chute de tension
 - Faible coût
- **Intérêt d'utilisation**
 - Forte capacité en courant
 - Amorçage par une impulsion de courant (structure verrouillée)
 - Tenue en tension alternative
- **Des Thyristors en voie d'extinction :**
 - Les SCRs rapides (induction, contrôle moteur => IGBT)
 - Le GTO (forte puissance => IGBT)

BACK-UP

FORMES D'ONDES Cas du contrôle de phase

1) Régime sinusoïdal (charges résistives)

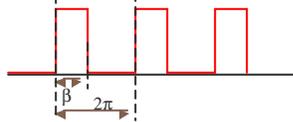


Puissance dissipée en fonction du courant moyen

$$P = V_{to} I T(\alpha) + R_d I T^2(\alpha) = \frac{\pi (2\alpha - \sin 2\alpha)}{2 (1 - \cos \alpha)^2}$$

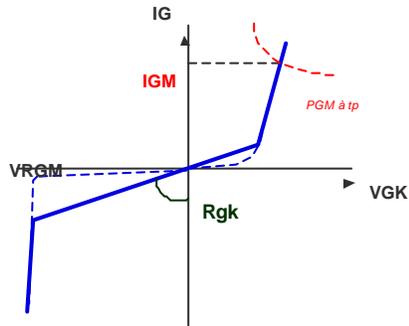
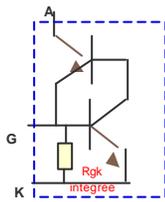
$$P = V_{to} I T(\alpha) + R_d I T^2(\alpha) = \frac{\pi (2\alpha - \sin 2\alpha)}{4 (1 - \cos \alpha)^2}$$

2) Régime rectangulaire (charges inductives)



$$P = V_{to} I T(\alpha) + R_d I T^2(\alpha) = \frac{2\pi}{\beta}$$

CARACTERISTIQUES DE GACHETTE



Valeurs Max :

IGM=4A (20µs)
PGM= 10 W (20µs)
PG(av) = 1 W
VRGM= 5V

(Exemple TYN1225)
25A - 1200v

En direct :

IGM : Courant crête max (en impulsion)
PGM : puissance crête (impulsion)
PG(av) : puissance moyenne maximum
VGK : tension direct de gâchettement (10 à 20V)

En inverse :

VRGM : Tension inverse max (< tension d'avalanche typiquement de 10V)