

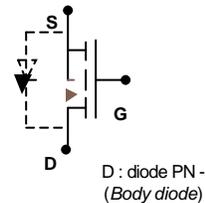
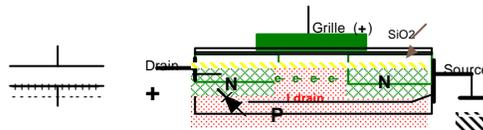
TRANSISTOR MOS

ou **MOSFET** [*Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*]

- **Structure d'un transistor MOS** - Rappel -
- **Caractéristiques statiques:**
 - Etat bloqué :
 - Limites en tension
 - Conduction :
 - Limites en courant.
 - Aire de sécurité
- **Caractéristiques dynamiques :**
 - Les capacités du MOSFET
 - La capacité d'entrée
 - Temps de commutation
 - Pertes en commutation
- **Applications:**
 - Commande de grille
 - Domaines d'applications

STRUCTURE TRANSISTOR MOS

Cellule MOS élémentaire



Cellule MOS élémentaire - Canal N - Principe

1/ Canal & Courant de conduction

La polarisation **positive** de la grille crée un "effet de champ" qui provoque une accumulation de charges **negatives** (électrons) sous cette électrode. Cela va former un canal "inversé" de type **N** dans la zone **P**.

Les électrons concentrés sous la grille vont assurer la conduction entre la source et le drain. (La source doit être connectée à la zone P pour en fixer le potentiel.)

2/ Comportement dynamique

Il n'y a que des porteurs majoritaires => pas de recombinaison !

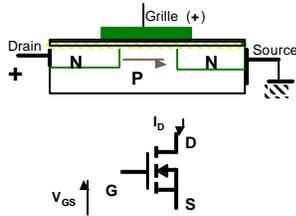
- Temps de commutation rapides.
- Fonctionnement en haute fréquence
- Facile à commander.
- Grande disponibilité sur le marché.

3/ Conduction inverse (Diode body)

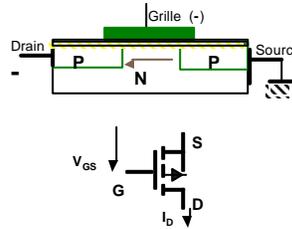
STRUCTURE TRANSISTOR MOS

Canal P ou N ?

MOS canal N à enrichissement:



MOS canal P à enrichissement:



On peut réaliser de la même façon un transistor **MOS à canal P**.

La mise en conduction se fera en appliquant une tension **négative** sur la grille.

Intérêt :

La possibilité de commande par tension **négative** Grille-Source ainsi que l'association avec des MOS canal N, simplifie considérablement les circuits dans certains cas (voir "applications").

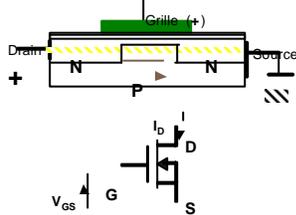
Inconvénients :

COÛT : Il faut environ 3fois plus de silicium pour obtenir la même RDS(on) qu'un MOS canal N.
Tension de seuil (VGSth) plus élevée.

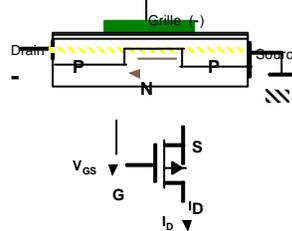
STRUCTURE TRANSISTOR MOS

Déplétion ou enrichissement ?

MOS canal N à déplétion:



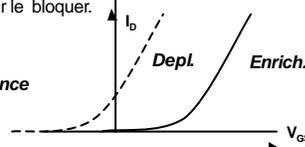
MOS canal P à déplétion:



MOS à déplétion :

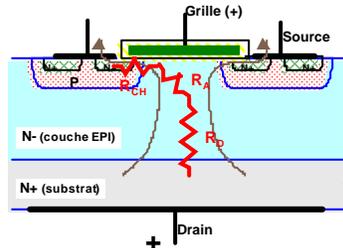
Contrairement au MOS à enrichissement, le MOS à déplétion est toujours passant. Il faut lui appliquer une tension de grille négative (canal N) pour le bloquer.

Transconductance canal N:



STRUCTURE TRANSISTOR MOS

VDMOS: Vertical Diffused Mos



Le **MOS Haute-Tension** est une structure verticale (et non horizontale comme pour les **LDMOS**, MOS basse-tension, présentés aux pages précédentes).

Le canal de chaque cellule est horizontal. Le courant total circule verticalement.

Réalisation :

On part d'une plaquette de silicium monocristallin N+ fortement dopée (substrat) sur laquelle on fait croître, par épitaxie, une couche très faiblement dopée N- (d'épaisseur et de résistivité fixées par la tenue en tension souhaitée).

Ensuite on procède aux différentes opérations pour réaliser les puits P+ et la source (**double diffusion**), la grille (métal ou Si polycristallin) et son isolation et enfin les métallisations d'interconnexions.

Les performances de R_{CH} sont liées à la densité de cellules élémentaires que l'on pourra intégrer par unité de surface (vrai en basse tension):

MOS basse-tension : 200.000 cellules /cm²

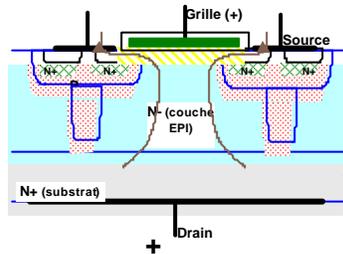
MOS haute tension : 50.000 cellules /cm² (prédominance R_A et R_D) (variante: **MESHFET**)



Compromis "chute de tension" / "tenue en tension"

STRUCTURE TRANSISTOR MOS

COOLMOS ou TRENCHMOS



La tenue en tension se fait à la fois en horizontal et en vertical .

Le compromis Tenue en tension / $R_{DS(ON)}$ peut être optimisé

$$\text{-VDMOS: } R_{DS(ON)} = k \cdot V_{(BR)DS}^{2,5}$$

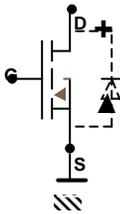
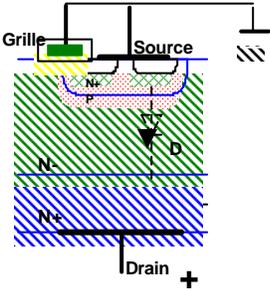
$$\text{-COOLMOS: } R_{DS(ON)} = k \cdot V_{(BR)DS}$$

Pour un MOS 600 V, la résistance à l'état passant peut être divisée d'un facteur 2 à 3.

Inconvénient: $V_{GS(th)}$ plus élevée (capacité en courant + faible).

CARACTERISTIQUE STATIQUE MOSFET A L'ETAT BLOQUE

CARACTERISTIQUE STATIQUE Tension maximale à l'état bloqué



Tension Drain-Source Max spécifiée : V_{DSS} (avec $V_{GS}=0$)

C'est en fait la tenue de la jonction PN (diode D).
 La tension est supportée par la couche épi N- (la moins dopée)
 La tension max admissible est essentiellement fonction de la résistivité et de l'épaisseur de cette zone N- (air connu !)
 L'impact de la tension de blocage sur la résistance à l'état passant (R_{DSon}) est important.

R_{DSon} (mW)	V_{DSS} (V)
250	100
250	500
1500	1000

ex: MOS 8Amp.

Les produits actuels : $V_{DSS}=30V$ à $1000V$

CARACTERISTIQUE STATIQUE

Limites absolues et caractéristiques d'utilisation

Limites absolues:

V_{DSS} : Tension Drain-Source maximale @ $V_{GS}=0$ et $T_j = 25^\circ\text{C}$

V_{DSS} : idem avec $R_{GS} = 20 \text{ KOhm}$

- la tension d'avalanche diminue si la température diminue
(-10% entre 25°C et -60°C)

V_{GSM} : Limite de tenue à tension de l'oxyde de grille (en général 30V)

Valeurs caractéristiques:

I_{DSS} : courant de fuite Drain-Source @ $V_{DS}=0.8 \times V_{DSS}$, $V_{GS}=0$ et $T_j = 125-150^\circ\text{C}$
(de l'ordre de 10 à 100 μA)

I_{GSS} : courant de fuite Grille-Source @ $V_{DS}=0$ et $T_j = 125-150^\circ\text{C}$
(de l'ordre de 1 à 10 nA, souvent spécifié à 100 nA par commodité de mesure)

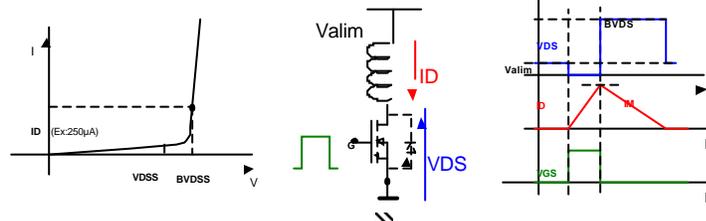
CARACTERISTIQUE STATIQUE

Tenue dans l'avalanche

Tension d'avalanche Min : BV_{DSS} ou $V_{(BR)DSS}$ [Breakdown Voltage]

La jonction P-N a un claquage uniforme et peut donc supporter une certaine énergie dans l'avalanche.

La plupart des produits sont maintenant spécifiés dans ce mode de fonctionnement (accidentel), par une valeur de tenue en énergie impulsionnelle (E_{AS})



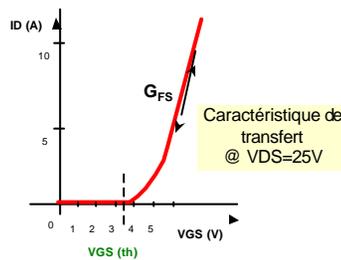
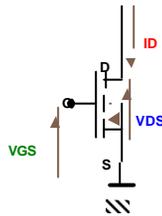
Valeur de l'énergie dissipée par le MOS:

$$Ws = 1/2 \cdot I_{DM}^2 \cdot BV_{DSS} / (BV_{DSS} - Valim)$$

CARACTERISTIQUE STATIQUE MOSFET EN CONDUCTION

CARACTERISTIQUE STATIQUE *Caractéristique de Transfert*

Tension de seuil



Il faut que la tension V_{GS} soit supérieure à un certain seuil ($V_{GS(th)}$) pour faire conduire le transistor MOS.

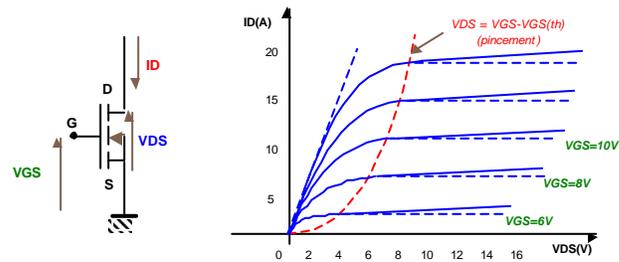
Ce seuil de tension est mesuré à faible niveau de courant I_D (0.25 ou 1 mA)

Pour les MOS "standard" cette tension est de l'ordre de **3 à 4 V**
Pour les MOS "logic level" le $V_{GS(th)}$ est typiquement de **1 à 2V**
($V_{GS(th)}$ à un coefficient de température négatif.)

Transconductance: $G_{FS} = \Delta I_D / \Delta V_{GS}$

CARACTERISTIQUE STATIQUE

Régime linéaire ou saturé



$V_{GS} > V_{GS(th)}$

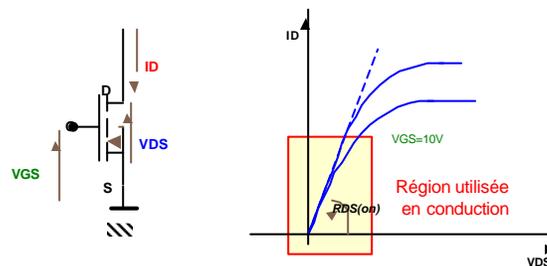
2 modes de conduction:

- 1) - Régime "linéaire" ou "ohmique" : $V_{DS} = R_{DS} \times I_{D}$
pour $V_{DS} < V_{GS} - V_{GS(th)}$ (= tension de pincement)
- 2) - Régime de "saturation" : $I_{D} = C_{te}(V_{GS}) = C_{FS} (V_{GS} - V_{GS(th)})^2$
pour $V_{DS} > V_{GS} - V_{GS(th)}$

 **Attention !** : Cette terminologie est opposée à celle utilisée pour les transistors bipolaires.

CARACTERISTIQUE STATIQUE

RDS(on)



C'est un paramètre clé :

RDS(on) Max est spécifié à :

VGS=10V pour les MOS standard.

VGS=5V pour les MOS "logic level"

(en général à 50% du courant drain max admissible et à 25°)

Rq R_{DS(on)} ne varie presque plus avec le V_{GS} à partir d'un certain niveau.

 RDS(on) augmente avec la température : **double entre 25°C et 150°C**

Avantage : Cela facilite la mise en parallèle des MOS

Pertes en conduction:

$$P_{cond} = R_{DS(on)} \cdot I_{D_{RMS}}^2$$

CARACTERISTIQUE STATIQUE

LIMTES EN COURANT

Courant Drain :

1) **ID** courant max en continu à $T_c=25^\circ\text{C}$ et/ou à $T_c=100^\circ\text{C}$

Ces valeurs correspondent, pour un boîtier donné, à la puissance dissipée ($P=R_{DS(on)} \cdot I_D^2$) pour laquelle la température de jonction atteint la T_{JMAX} spécifiée. La puissance max à $T_c=25^\circ\text{C}$ (!) est également donnée.

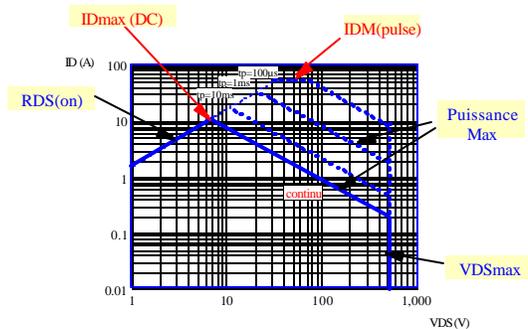
2) **IDM**: Courant max en impulsion :

Cette valeur est limitée, soit par les caractéristiques du MOSFET, soit par des considérations thermiques (Aire de sécurité)

CARACTERISTIQUE STATIQUE

AIRE DE SECURITE

(Exemple : MOS 12A/500V)



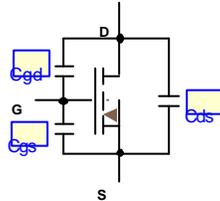
L'aire de sécurité d'un MOS est limitée par

- la tension Drain-Source Max
- le courant drain (I_D et I_{DM})
- la résistance $R_{DS(on)}$
- la puissance max admissible ($T_J < T_{JMAX}$)

CARACTERISTIQUES DYNAMIQUES

CARACTERISTIQUES DYNAMIQUES

LES CAPACITES "PARASITES"



Les **caractéristiques dynamiques** d'un transistor MOS sont essentiellement déterminées par les différentes capacités inhérentes à sa structure.

Les temps de commutation à la fermeture et à l'ouverture dépendent de l'aptitude du circuit de commande à charger et décharger rapidement ces capacités.

Les temps de commutation sont indépendants de la température.

On définit :

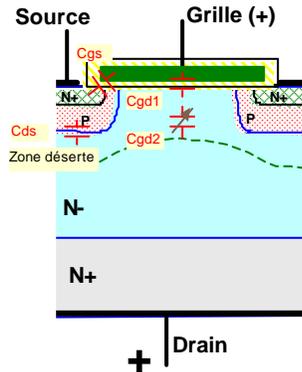
Capacité d'entrée source commune [Input capacitance] :	Ciss (=Cgd+Cgs)	D-S en c/c
Capacité de transfert ou de MILLER [Reverse transfert capacitance] :	Crss (=Cgd)	G-S en c/c
Capacité de sortie en source commune [Output capacitance] :	Coss (=Cgd+Cds)	G-S en c/c



Ces capacités sont spécifiées pour une tension D-S de 30 V = **peu d'utilité !**

CARACTERISTIQUES DYNAMIQUES

Variation des capacités en fonction de la tension Drain-Source



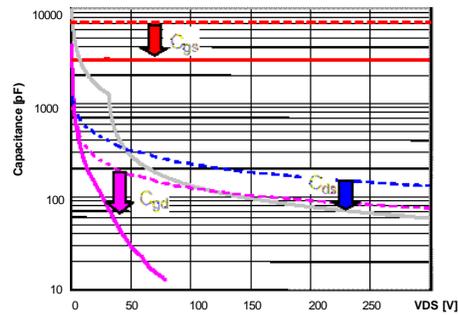
C_{GD} : mise en série de C_{gd1} et C_{gd2}

- C_{gd1} = Capacité entre grille et surface zone épi N- (ou capacité de l'oxyde)
- C_{gd2} = Capacité de la zone déserte dans N- (qui dépend fortement de la tension VDG)

C_{GS} : capacité entre les surfaces en regard des métallisations de Grille et de source

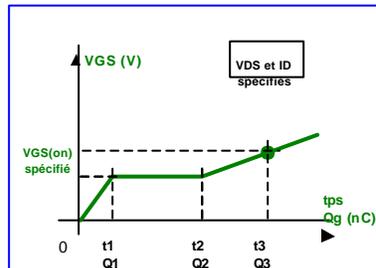
- ne varie pas avec la tension

C_{DS} : capacité de la jonction PN-



CARACTERISTIQUES DYNAMIQUES

UTILISATION DE LA CHARGE DE GRILLE



Pour prendre en compte les variations des capacités, il suffit de s'intéresser simplement à la charge totale de la grille.

Méthode de caractérisation:

- courant de grille I_g constant
- courant de drain nominal (I_D)
- tension Drain-Source = 80 % de V_{DSS} .

Intérêt de I_g constant: le relevé $V_{GS}(t_{ps})$ correspond à une courbe $V_{GS}(Q)$:

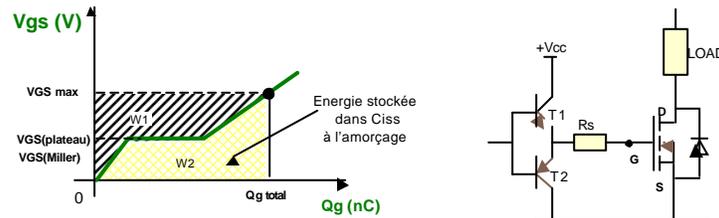
$$t_1 = Q_1 / I_g \quad t_2 = Q_2 / I_g \quad t_3 = Q_3 / I_g$$

On peut remonter facilement à la valeur de la capacité équivalente

$$I = C \times \Delta V_{GS} / \Delta t \Rightarrow C = \Delta Q_g / \Delta V_{GS}$$

CARACTERISTIQUES DYNAMIQUES

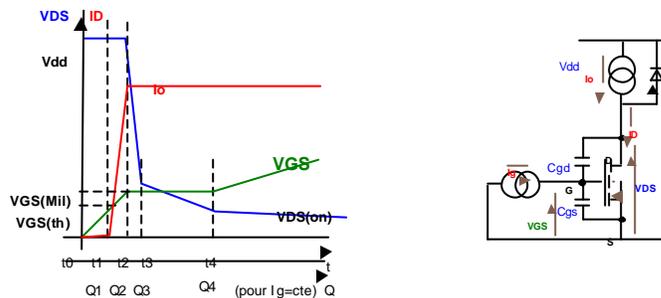
UTILISATION DIRECTE DE LA CHARGE DE LA GRILLE: PUISSANCE DISSIPEE DANS LE CIRCUIT DE COMMANDE



- La zone **W2** représente l'énergie stockée dans la capacité de grille (Ciss)
Cette énergie sera dissipée **au blocage** dans la résistance de source (Rs) et le transistor T2
- La zone **W1** représente l'énergie dissipée **à la fermeture** dans Rs et le transistor T1.
- L'énergie totale fournie par le circuit de commande est : $W_{dr} = Q_{g\text{totale}} \cdot V_{GS\text{max}}$
($V_{GS\text{max}} = V_{cc}$)
- A la fréquence de commutation F, la puissance dissipée dans ce circuit est:
 $P = W_{dr} \cdot F$

CARACTERISTIQUES DYNAMIQUES

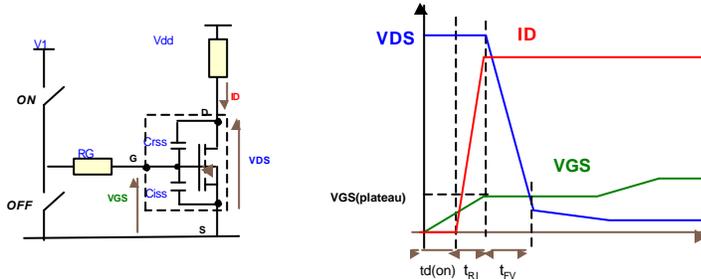
EXPLICATION DE L'ALLURE DE LA CHARGE DE LA GRILLE



- t0 à t1:** le courant de grille charge les capa Cgs et Cgd (**Ciss**). La tension V_{GS} monte linéairement jusqu'au seuil $V_{GS(th)}$.
- t1 à t2:** le courant de drain I_D commence à circuler (régime de "saturation"): $I_D = G_{FS}(V_{GS} - V_{GS(th)})$
- t2 à t3:** la tension V_{DS} commence à décroître (la diode roue-libre ne conduit plus)
pente $dV_{DS}/dt = dV_{GS}/dt = I_D / C_{gd} (= I_D / C_{gd2})$
- t3 à t4:** la tension V_{DS} est voisine de zéro et la capacité C_{DS} croît brusquement ($\#C_{gd1}$). La tension V_{DS} diminue plus lentement (tension de queue). On est en régime "ohmique".
- t > t4:** la tension V_{DS} a atteint $V_{DS(on)} = R_{DS(on)} \cdot I_D$; la tension V_{GS} continue d'augmenter (charge des capacités Cgd et Cgs).

Plateau Vgs (t2 à t4): le circuit de grille doit fournir la charge de **Crss**: $Q = Crss \cdot (V_{dd} - V_{ds(on)})$.
Pendant cette période la capacité d'entrée apparaît comme infinie. La tension aux bornes n'augmente pratiquement pas. C'est l'**effet MILLER**.

CARACTERISTIQUES DYNAMIQUES TEMPS DE COMMUTATION - AMORÇAGE



td(on) = temps de retard à l'amorçage

C'est le temps nécessaire à la tension VGS pour atteindre la tension de seuil [V_{GS(th)}]

$$V_{GS} = V1 (1 - \exp[-t/(R_G \cdot C_{iss})])$$

$$V_{GS} = V_{GS(th)} \text{ au temps } t = td(on): \mathbf{td(on) = R_G \cdot C_{iss} \cdot \ln [V1/(V1 - V_{GS(plateau)})]}$$

trI = temps de montée du courant

C'est le temps nécessaire pour charger Ciss du ΔV_{GS} pour atteindre le courant de charge I_D.

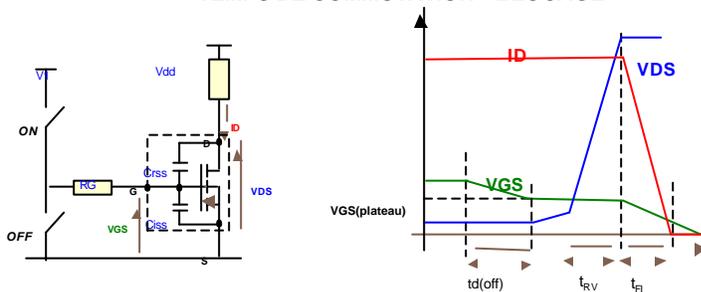
$$\text{Pour une source de courant } I_G: \mathbf{dI_D / dt = I_G \times G_{FS} / C_{iss}}$$

tFV = temps de descente de la tension D-S

C'est le temps nécessaire pour décharger la capacité Miller (Crss) de V_{dd} à -V₁.

$$\text{Pour une source de courant ou une } R_G: \mathbf{tr = D \cdot C_g / I_g} \text{ avec } I_g = V1 - V_{GS(plateau)} / R_G$$

CARACTERISTIQUES DYNAMIQUES TEMPS DE COMMUTATION - BLOPAGE



td(off) = temps de retard au blocage

C'est le temps nécessaire à la tension VGS pour redescendre à la tension de plateau.

$$V_{GS} = V1 \exp[-t/(R_G \cdot C_{iss})]$$

$$V_{GS} = V_{GS(plateau)} \text{ au temps } t = td(off): \mathbf{td(off) = R_G \cdot C_{iss} \cdot \ln [V1/V_{GS(th)}]}$$

trV = temps de montée de la tension (en g^{al} de 10% à 90% de V_{dd}):

C'est le temps nécessaire pour charger la capacité Miller (Crss) de -V₁ à V_{dd}.

$$\text{Pour une source de courant ou une } R_G: \mathbf{tr = D \cdot C_g / I_g} \text{ avec } I_g = V_{GS(plateau)} / R_G \text{ (tps + long qu'à l'amorçage)}$$

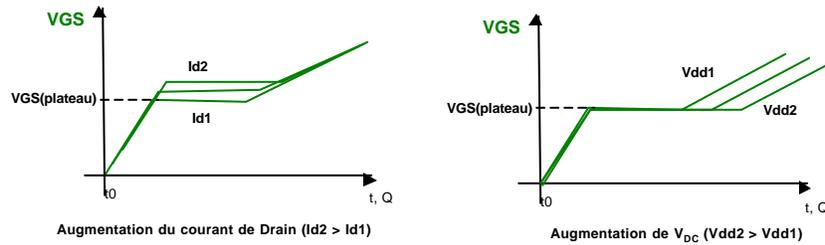
tFI = temps de descente du courant

C'est le temps nécessaire pour décharger Ciss du ΔV_{GS} pour atteindre le V_{GS(th)}

$$\text{Pour une source de courant } I_G: \mathbf{dI_D / dt = -I_G \times G_{FS} / C_{iss}}$$

CARACTERISTIQUES DYNAMIQUES

TEMPS DE COMMUTATION & PERTES



Influence R_G (ON & OFF):

La rapidité de commutation est liée aux temps de charge et décharge de C_{iss} et C_{rss}. Avec une R_G faible, les temps de commutation seront plus courts. Les pertes seront donc réduites.

Inconvénient R_G faible: courant et pertes de recouvrement + perturbations Electromagnétiques .

Influence V_{DS} et I_D:

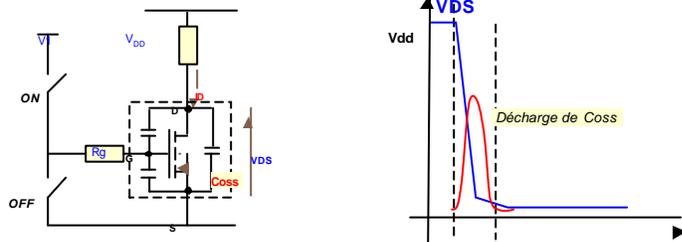
Plus la tension et le courant à commuter sont importants, plus les temps de commutation sont longs. Les pertes maximales apparaissent donc bien à V_{DS} et I_D maximaux.

Choix du MOS:

La charge de C_{rss} est prépondérante dans les pertes => Intérêt des structures MESH ou TRENCH.

CARACTERISTIQUES DYNAMIQUES

PERTES CAPACITIVES A L'AMORCAGE



La capacité équivalente de sortie participe de façon importante aux pertes de puissance:
A l'amorçage, la capacité C_{oss} se décharge dans le transistor et l'énergie dissipée est alors:

$$(W_{on})_C = 1/2 C_{oss} \cdot V_{DD}^2$$

Remarque:

Les pertes augmentent avec la tension et la fréquence

Compromis dans les applications haute fréquence et haute tension: la taille de la puce à utiliser.

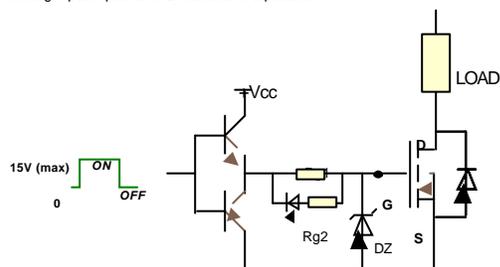
$$S \leftarrow C_{oss} \text{ et } P_{on}$$

$$S \leftarrow R_{on} \text{ et } P_{cond}$$

APPLICATIONS

APPLICATIONS CIRCUITS DE COMMANDE DE GRILLE

Exemple 1:
montage push-pull avec 2 transistors bipolaires



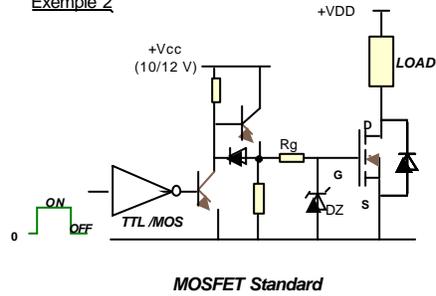
Les résistances R_{G1} et R_{G2} permettent de contrôler, indépendamment, le dI/dt à la fermeture et à l'ouverture (Réduction du bruit et des surtensions Drain-Source).

Attention:
Une impédance du circuit de commande trop élevée (R_{G2}) augmente les risques de mise en conduction par dV/dt (variations rapides de la tension de drain transmise par la capacité C_{rss}).
Une valeur minimum est par ailleurs recommandée pour éviter des risques d'oscillations ($R > 5\Omega$).
La diode zéner DZ protège la grille contre d'éventuelles surtensions (ESD).

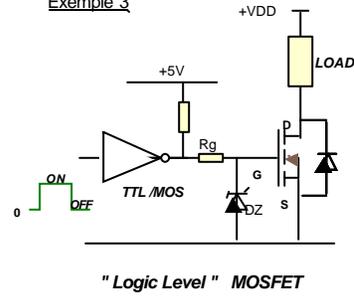
APPLICATIONS

CIRCUITS DE COMMANDE DE GRILLE

Exemple 2

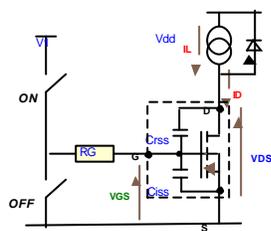


Exemple 3



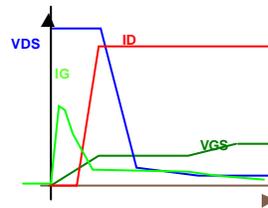
APPLICATIONS

CIRCUITS DE COMMANDE DE GRILLE SPECIFIQUES

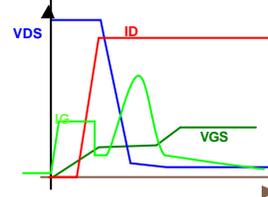


On peut accélérer la charge de C_{rss}
(pas d'influence sur le di/dt et donc
sur le **Recouvrement**)

=> Réductions pertes comme sur un
TRENCH.



Avec une résistance de Grille



APPLICATIONS

DOMAINES D'APPLICATION

- **Automobile** (MOS basse tension): remplacement relais
- **Alimentations à découpage** (SMPS): toutes topologies.
- **Eclairage** (ballast électronique haut de gamme, transformateurs "électroniques").
- **Commandes de moteurs** (ventilateurs 12 V pour PC).

APPLICATIONS

AUTOMOBILE - Critères de Choix des MOS

Basse tension : Domaine de "prédilection" pour les MOS (compromis V_{DSS} & $R_{DS(on)}$)

Utilisation du MOSFET en relais statique :

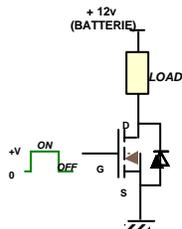
- Plus fiable que les relais mécaniques.
- Facile à commander.
- Faible énergie de commande.
- Possibilité de protection en courant (surcharges / courts-circuits)

APPLICATIONS :

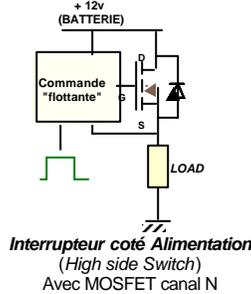
Commande de moteurs continus (tous types)
Commande de lampes
Commande "actuators" divers.

APPLICATIONS

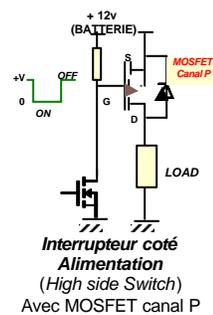
AUTOMOBILE



Interrupteur coté masse
(Low side Switch)



Interrupteur coté Alimentation
(High side Switch)
Avec MOSFET canal N



Interrupteur coté Alimentation
(High side Switch)
Avec MOSFET canal P

La configuration "High Side" est généralement obligatoire dans l'automobile. Le moins (-) de la batterie est relié au châssis, ainsi que toutes les charges. L'idéal serait d'utiliser des MOSFETs canal P (Coût !). Circuit de commande simple depuis la masse (?)

La mise en œuvre de MOSFET canal N nécessite un circuit de commande "flottant" et la génération d'une tension de grille > à la tension de batterie.

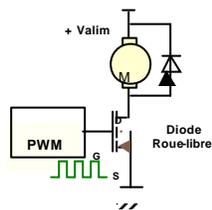
On utilisera par exemple :

- Circuit à "pompe de charge" (ou pompe à diodes).
- Circuit "bootstrap".

APPLICATIONS

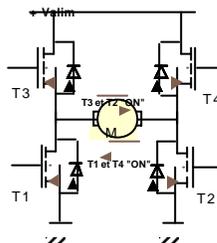
COMMANDE DE MOTEURS

Exemples de configurations:



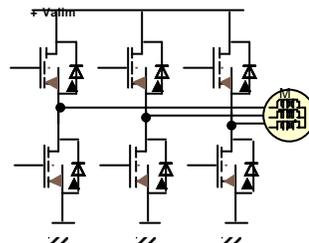
Variateur de vitesse
(HACHEUR)
Moteur continu

Ex: ventilateur



Inversion de sens de rotation
(Pont en H)
(avec ou sans contrôle de vitesse)
(Pont en H)
Moteur continu

Ex: lève-vitre

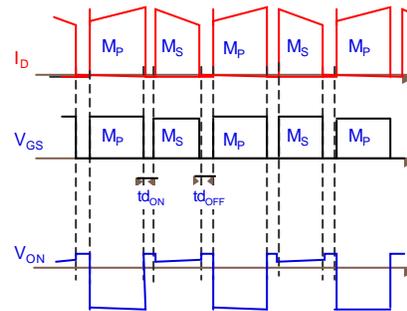
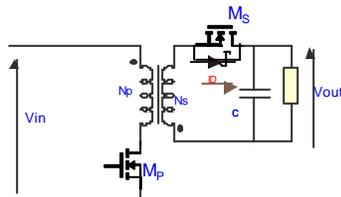


Autopilotage & Contrôle moteur
(onduleur triphasé)
Ex: Moteur continu à aimant permanent sans balai
(PM brushless DC motor)

Ex: ventilateur brushless (2-φ)

APPLICATIONS

REDRESSEMENT SYNCHRONES - Ex: FLYBACK



Utilisation d'un MOS au lieu d'une diode:

- utilisation de la conduction inverse du MOS
- pour réduire les pertes, il faut réduire au maximum t_{dON} et t_{dOFF}
- ne pas oublier les pertes de commande !

CONCLUSION

A retenir...

- **Domaine de prédilection: < 100 V**
 - Compromis Tenue en tension / $R_{DS(on)}$
- **Pas de porteurs minoritaires**
 - Composant adapté pour la Haute-Fréquence
 - Temps de commutations surtout limités par C_{rss} et le circuit de grille.
- **Commande en tension**
 - Courant de grille + ou -, juste à la charge ou décharge de C_{iss}
 - Pertes de commande négligeable (attention à la très haute fréquence: Tr. Bip)
- **Evolution constante des technologies**
 - MECHFET
 - TRENCHFET