

mise au point sur les — TRANSISTORS

PARAMÈTRES ET CARACTÉRISTIQUES ESSENTIELLES DES T.E.C. ET DES M.O.S.

AVANT de passer au détail des différents paramètres des F.E.T. et des M.O.S., il semble utile, dans un court résumé, d'en préciser les données fondamentales.

Les F.E.T., ou T.E.C., ont leur grille de commande accolée au canal, dont l'existence est obtenue, en fabrication, par le procédé technologique de la diffusion. Un dispositif M.O.S., en revanche, possède un canal induit, sous une couche d'oxyde, sur laquelle est fixée la connexion de porte.

Un M.O.S. est dit « à enrichissement » (notre type A) lorsqu'il reste bloqué (non-conducteur) en l'absence de potentiel sur la grille. Ici, donc, la commande de tension agit

pour libérer des porteurs de charge mobiles, donc pour abaisser la résistance du canal. Lorsque nous avons affaire à un M.O.S. à déplétion (type B), la tension de grille, augmentant, interdit peu à peu la libre circulation des charges. La résistance du canal s'accroît. Il s'ensuit que les M.O.S. complémentaires, C.M.O.S., jouent bilatéralement ce double rôle (un M.O.S. bloqué, un M.O.S. conducteur) et servent donc de portes logiques duales (fermeture - ouverture simultanées). Un M.O.S. à appauvrissement et à enrichissement (type C) s'apparente à ce fonctionnement mais ne peut agir en même temps. Il ne fait que suivre l'ordre de commutation que lui enjoint la tension de

grille (forte résistance - faible résistance, suivant le potentiel de polarisation).

Un M.O.S. s'assimile, de manière grossière, à un condensateur dont les armatures seraient le substrat et la grille. Lorsqu'une tension lui est appliquée, des charges de signes opposés se développent dans le substrat et dans la zone sous-jacente de la porte (canal). Les porteurs ainsi générés sont recueillis sur deux électrodes transversales, diffusées dans le substrat, nommées « source » et « drain ». Le drain est symétrique de la source, mais on est convenu d'appeler ainsi l'électrode qui est à un potentiel de même signe que le M.O.S. conducteur.

3-1 PARAMÈTRES FOURNIS PAR LES CONSTRUCTEURS

Nous les avons rassemblés sur trois tableaux que nos lecteurs pourront détacher et conserver hors de la revue dans leurs dossiers personnels. Le tableau I reprend les symboles usuels relatifs aux tensions (exprimées en volts [V]) et aux courants (mesurés en sous-multiples d'ampères, par exemple en [mA]). De plus, nous y avons porté les définitions

de la tension de blocage et du courant de fuite, suivies des caractéristiques de pente et de résistances.

Le tableau II introduit les notions essentielles utilisables en radio-fréquences et en commutation (capacités, résistances, fréquence, temps opératoires).

Enfin le tableau III rappelle quelques symboles généraux des transistors qu'il faut connaître pour exploiter les dispositifs dont nous nous occupons actuellement.

Ces paramètres étant passés en revue, nous allons les traduire par des courbes afin d'en déceler les comportements. Cependant, auparavant, il nous faut différencier le plus simplement possible, les modes de fonctionnement des T.E.C. Nous en distinguerons trois A, B, C, définis à partir du tracé de la variation du courant de drain $\pm I_D$ en fonction de la tension grille-source $\pm V_{GS}$.

Lorsque I_D se situe dans la partie positive des coordonnées (fig.

3-1, a), toute action sur la grille entraîne son augmentation. On a affaire à un T.E.C. à « enrichissement » « enhancement », selon les auteurs anglo-saxons). Si, I_D reste dans la zone négative des abscisses, le T.E.C. correspondant est dit à « appauvrissement » « enhancement », selon la terminologie française. La tension drain-source (V_{DS}) est suffisamment élevée, elle ne joue presque pas sur I_D (12) (fig. 3-1, b). Le blocage (cut-off) s'opère à une tension V_P , dite de pincement

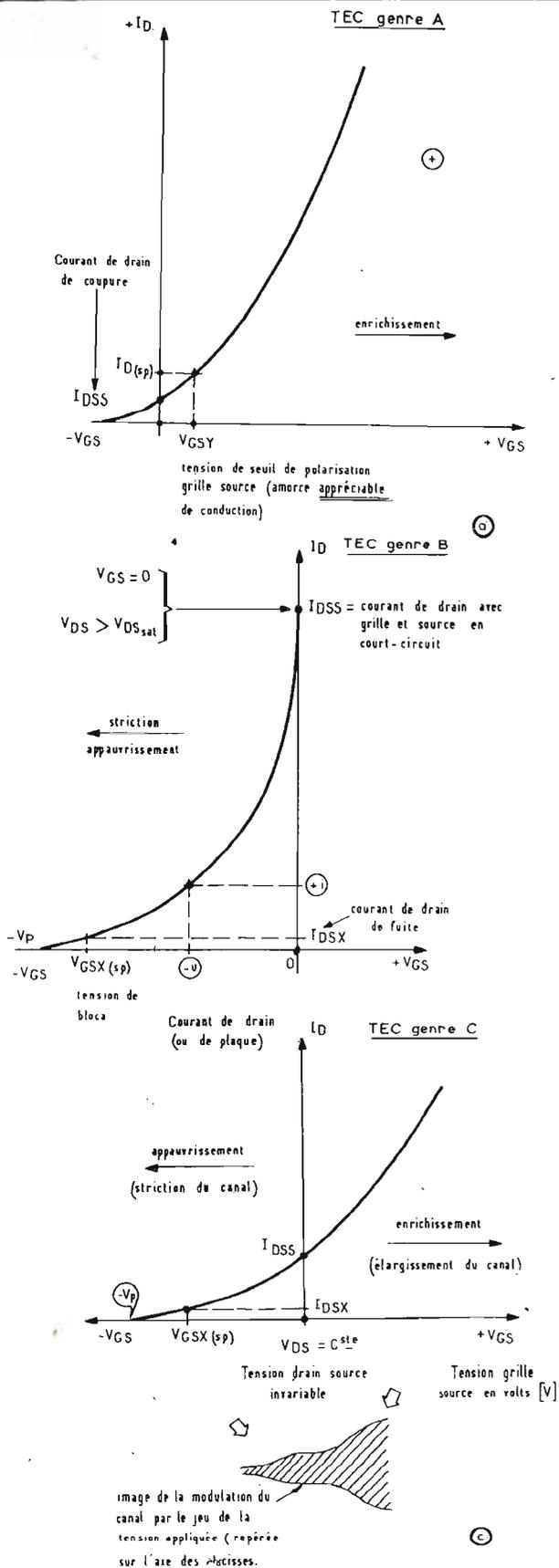


Fig. 3-1 - Mode A à enrichissement (dit mode C dans la littérature anglo-saxonne), noter la position de V_{GSY} (tableau I) et de $I_{D(sp)}$, où le suffixe (sp) indique que cette valeur est spécifiée (mesurée et imposée) par le constructeur (a); mode B (dit mode A, par les Anglais et... ceux qui se rattachent à leur école), voir la position de $V_{GSX(sp)}$ (consulter le tableau I) et de I_{DSX} (b); mode C (ou B, pour les références des auteurs d'inspiration américaine), observer le point I_{DSS} (en se reportant au tableau I pour sa définition), $-V_p$ est une tension de coupure, ou de seuil (c).

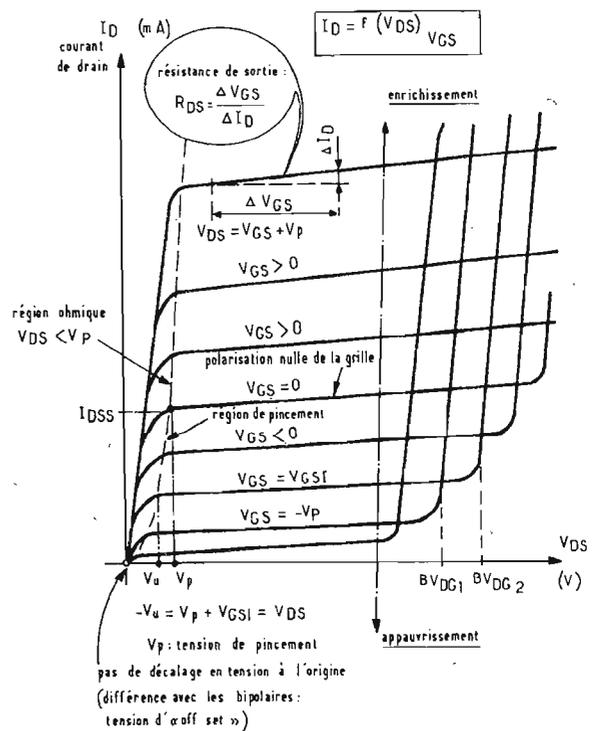


Fig. 3-2 - Les caractéristiques du T.E.C. se tracent en faisant varier la tension drain-source V_{DS} et en relevant la variation consécutive du courant drain I_D , cela pour une valeur donnée de la polarisation grille-source V_{GS} . Le courant drain correspondant à une polarisation nulle de grille s'appelle I_{DSS} .

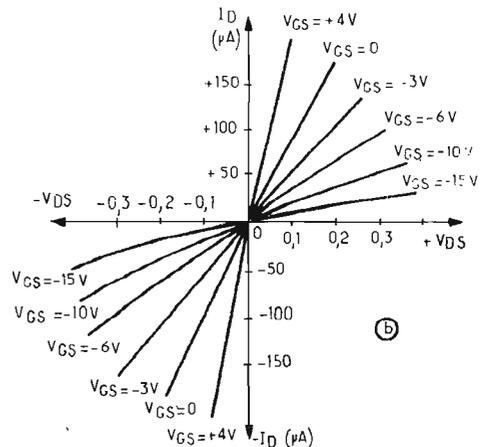
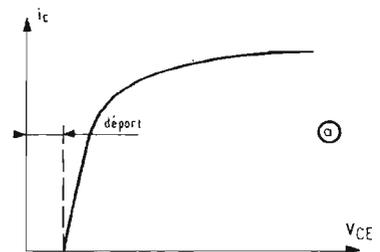


Fig. 3-3 - Dans un transistor bipolaire, la courbe donnant le courant collecteur en fonction de la tension collecteur émetteur ne passe pas exactement par zéro: c'est ce que l'on appelle le phénomène de « offset » (a). Caractéristiques d'un transistor à effet de champ en-dessous du pincement $V_{GS} < V_p$ (région ohmique), $t_{amb} = 25^\circ C$. (b).

absolu ; il se révèle dès que la valeur V_{GSX} spécifiée (sp) est atteinte. On écrit, parfois pour faire croire que l'on parle anglais « **pinch off** », au lieu de **pincement**. Enfin, il a été suggéré d'employer des T.E.C. à **grande plage de modulation**, donc à **striction et à enrichissement du canal** (fig. 3-1, c).

Considérons, maintenant, les caractéristiques de transfert $I_D = f(V_{DS})$, mesurées pour différentes grandeurs (chaque fois constantes sur la plage explorée) de V_{GS} (fig. 3-2). Ces **courbes** ressemblent à celles des **transistors bipolaires**, mais sont plus **horizontales** encore que celles-ci, rejoignant celles des « tubes pentodes » (mais qui ose encore évoquer les lampes radio-électriques !). Il convient de noter ici que les courbes passent **rigoureusement** par l'origine (il n'y a pas de tension résiduelle, dite d'« off-set » en français technique, ou « tension de départ » en français correct) ce qui procure aux T.E.C. de remarquables propriétés résistives (fig. 3-3, b), donc l'intégration de « résistances unipolaires » in situ, dans les substrats à large densité. La **résistance à l'origine** est augmentée des **résistances de source et de drain**. La figure 3-4, par ses diagrammes (a, b, c), montre les répartitions de $I_D = f(V_{DS})$ pour les trois types A (fig. 3-1, a), B (fig. 3-1, b), C (fig. 3-1, c) décrits ci-dessus. Les exemples cités sont extraits de l'excellent ouvrage de H. Arciszewski « Mesures sur les transistors » (Chiron), mentionné en bibliographie, mais cet auteur respecte la terminologie anglaise des modes (A : depletion ; B : bi-mode ; C : enhancement).

3-2 EXAMEN DES TENSIONS

3-2.1 - Tensions d'action.

La figure 3-5(a) représente, en coupe, de manière schématique, un transistor M.O.S. (ce n'est pas un F.E.T. puisque le canal est induit lors du fonctionnement). Les tensions qui permettent la mise en œuvre de ce composant sont repérées sur les électrodes correspondantes :

- V_S , tension de source ;
- V_D , tension de drain ;
- V_G , tension de grille ;
- V_B ou V_σ , tension de substrat.

Dans certains textes, les auteurs précisent les points

Tableau I : Symboles relatifs aux transistors à effet de champ.

	Définitions	Symboles
TENSIONS [V]	$\pm V_{DSS}$	Tension (entre) drain (plaque) et source, le drain étant en court-circuit.
	$\pm V_{GSO}$	Tension (entre) porte (grille) et source, le drain étant en circuit ouvert (ou, $I_D = 0$).
	$\pm V_{GS(p)} = V_{GS(off)}$	Tension porte (grille) source de coupure (cut-off). (voir tension de pincement V_p ci-dessous).
	$\pm V_{GBM} = \pm V_\sigma$	Tension (crête) entre la porte (grille) et le substrat (semi-conducteur de base) ; M = maximum.
	$-V_{GDM}$	Tension (crête) entre la porte (grille) et le drain.
	$-V_{GSM}$	Tension (crête) porte-source.
	$+V_{DBM}$	Tension (crête) drain-substrat.
	$+V_{SBM}$	Tension (crête, ou maximale) source-substrat.
	$\pm V_{DSM}$	Tension (crête) drain-source.
	BV_{DSB}	Tension de claquage drain-source.
	BV_{GSB}	Tension de claquage grille-source.
	BV_{SDB}	Tension de claquage source-drain.
	TENSIONS DE FONCTIONNEMENT	$V_{G(off)}$
$V_{G(on)}$		Tension de grille à la conduction (commutation ON, état logique débloqué).
V_{DD}		Tension d'alimentation par boîtier au niveau du drain.
V_{SS}		Tension d'alimentation de la source.
V_{GG}		Tension d'alimentation par boîtier au niveau de la grille.
V_{IH}		Tension d'entrée (input I) au niveau logique haut (high : H).
V_{IL}		idem pour un niveau logique bas (low : L).
V_{OH}		Tension de sortie (output O) au niveau logique haut (H).
V_{OL}		idem pour un niveau logique bas.
COURANTS [mA]	$I_D = f(V_D)_{V_G}$	Courant de drain, fonction de V_D , V_G .
	I_G	Courant de porte (grille), fonction de V_G .
	I_{DSS}	Courant de drain de coupure (cut-off).
	I_{GSS}	Courant de porte (grille) de coupure (cut-off).
	I_S	Courant de source, fonction de V_S .
	I_{DD}	Courant d'alimentation V_{DD} par boîtier (en provenance d'une source externe).
	I_{DDH}	Courant d'alimentation V_{DD} par boîtier sortie à l'état haut (en provenance d'une source externe).
	I_{DDL}	Courant de l'alimentation V_{DD} par boîtier sortie à l'état bas (en provenance d'une source externe).

COURANTS DE COMMUTATION	I_{GG}	Courant de l'alimentation V_{GG} par boîtier (en provenance d'une source externe).
	I_{GGH}	Courant de l'alimentation V_{GG} par boîtier sortie à l'état haut (en provenance d'une source externe).
	I_{GGL}	Courant de l'alimentation V_{GG} par boîtier sortie à l'état bas (en provenance d'une source externe).
	I_{GSB}	Courant de fuite grille/substrat : on trouve parfois $I_{GS\sigma}$.
	I_{IH}	Courant d'entrée à V_{IH} (ici, H = état haut).
	I_{IL}	Courant d'entrée à V_{IL} (L = état bas).
	I_{ISB}	Courant de fuite entrée/substrat. (ou $I_{IS\sigma}$).
	I_O	Courant de sortie.
	I_{OH}	Courant de sortie à V_{OH} .
	I_{OHZ}	Courant maximal de sortie à l'état haute impédance.
	I_{OL}	Courant de sortie à V_{OL} .
	I_{OS}	Courant de sortie en court-circuit.
	I_{OSB}	Courant de fuite sortie/substrat.
	$I_{\phi SB}$	Courant de fuite horloge/substrat.
	I_{SS}	Courant d'alimentation substrat.
INDICATIONS DIVERSES	V_P, V_{PM} (ancienne dénomination, de $V_{GS(P)}$, à ne pas confondre avec des ordres logiques. Voir texte plus bas).	Tension de pincement (pinch off) à partir de laquelle le pinceau électronique est condensé autour de son axe (comme sous l'effet d'une lentille électrostatique). Le M indique la valeur maximale de ce paramètre.
	$I_s \propto A.T^{-n} T \alpha(^{\circ} 273) [\sigma]^*$	Courant de fuite des grilles (g et G) sous une polarisation imposée V_s spécifique [nA].
	V_B (ancienne dénomination de $V_{G(om)}$: symbole supprimé à cause de B, déjà ambigu entre breakdown - panne - et base).	Tension de blocage (B) qui, appliquée sur g, ou entre les grilles g et G, procure une intensité minimale I_{Dm} du courant de drain ; au-delà de cette grandeur, l'augmentation de la polarisation accroît les fuites de grille (s) I_s et le courant global I_{Dm} cesse de décroître.
DONNÉES D'IMMITANCE**	dI_D/dV_g	Transconductance (inverse de la résistance de transfert) relative à la petite grille g [$\mu A.V^{-1}$].
	$dI_D/d(V_G + V_g)$	Transconductance relative aux deux grilles (dans les T.E.C. à grille large sous le substrat) reliées entre elles par un court-circuit [$\mu A.V^{-1}$].
	R_i	Résistance dynamique interne, à relever sur le réseau de caractéristiques $I_D = f(V_D)$ paramétré par V_G [M Ω].
* Dans certains manuels, on trouve le rapport $\Delta I_s/\Delta T$ en [$\mu A.^{\circ} K^{-1}$].		
** Immittance : impédance - admittance ; la transconductance, en alternatif HF devient la transadmittance ; la conductance est l'inverse de la résistance.		

d'application de ces tensions ; ainsi, apparaissent :

V_{DS} , tension ENTRE source et drain ;

V_{GS} , tension ENTRE source et grille ; etc.

Il vaudrait mieux employer dans cette hypothèse la terminologie correcte de « différence de potentiel » mais l'usage de « tension » (succédant à l'anglais « voltage », à proscrire dans notre langue) s'impose à cause de l'abondante littérature d'Outre-Atlantique.

Deux autres indications sont mentionnées figure 3-5 (a). Il s'agit de l'épaisseur de la couche d'oxyde, t_{OX} , (l'initiale t, à ne pas confondre avec un temps, provient du mot « thickness » qui signifie « épaisseur », évidemment) et de la largeur L du canal (écrite, parfois, w, à cause de l'origine anglaise des références qui portent le terme « width » pour « largeur »). Il convient de ne pas emmêler cette largeur w avec la pulsation ω égale à $2\pi f$.

Pour notre part, nous avons conservé, ici, t_{OX} et w, non par anglomanie, mais parce que les manuels des fabricants se sont complus à les maintenir telles quelles. Ajoutons l'épaisseur du canal sous la forme $e = 2a_0$.

Dans la plupart des propositions de montage des pièces, c'est la tension de substrat V_B , ou V_s qui sert de référence de potentiel. L'indice B provient alors de l'anglais « bulk » (marquant l'existence d'un « volume global », d'un matériau aux dimensions importantes, comparées à celles des pôles de drain D, de source S et du canal).

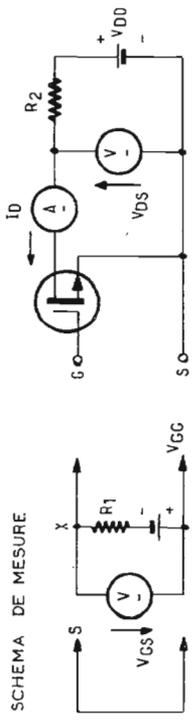
Les paragraphes 2 (antérieurement publié) et 3-1 ont bien précisé que les caractéristiques de transfert $I_D = f(V_D)$, paramétrées par V_G , d'un M.O.S. se révèlent très voisines d'un tube pentode à vide. Toutefois, dans la réalisation « état solide », source et drain, parfaitement symétriques, sont réversibles et il ne se produit aucune tension de départ (décalage de tension figurant sur l'axe des abscisses, étalonné en volts [V]). Reméorons une fois encore que cette « tension de départ » est, parfois, notée « tension d'« off-set », pour faire croire que l'on comprend l'argot technique anglo-saxon).

La figure 3-5 (b) illustre le repérage pratique de ces données. De même, la figure 3-5 (c). Bien sûr, les T-E-C- et les M.O.S.T. se branchent suivant les mêmes

Fig. 3-4 - Ces schémas sont extraits de l'ouvrage de H. Arciszewski cité en bibliographie. Ils portent sur la polarisation des T.E.C.
 Le principe de polarisation d'un amplificateur à transistor à effet de champ à canal N est applicable dans le cas d'un transistor à canal P à condition que les polarités des tensions et le sens des courants soient inversés.

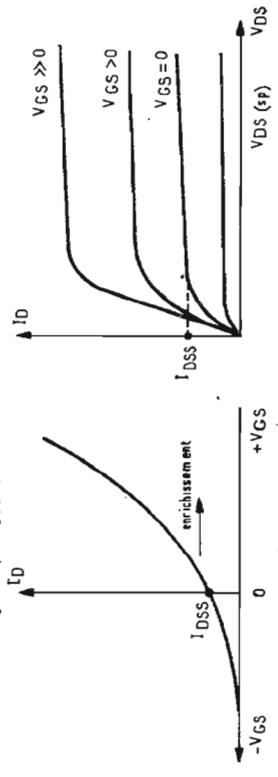
CONDITIONS A RESPECTER

- R1 et R2 sont des résistances de protection.
- Voltmètre VDS et ampèremètre ID
- Si le produit ID VDS n'est pas négligeable, remplacer la source en continu VDD par un générateur d'impulsions ayant un rapport cyclique faible ($\frac{\tau}{T} = \frac{\text{largeur de l'impulsion}}{\text{période de répétition}}$)



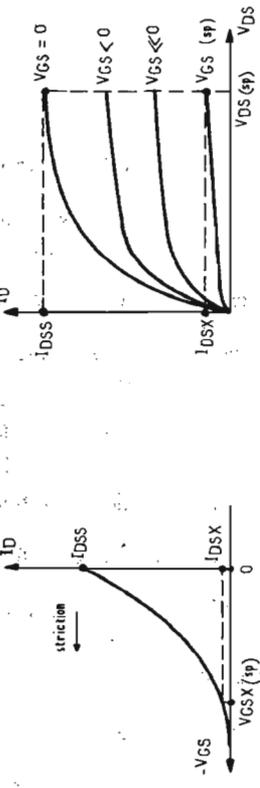
Transistor à grille isolée type A

Exemple : pour le type 2N4351 à : $V_{DS}(sp) = 10V$ et $V_{GS} = 0$
 le catalogue indique : $I_{DSS} < 10 nA$



Transistor à jonction type B

Exemple Pour le type 2N3822 à $V_{DS}(sp) = 15V$ et $V_{GS} = 0$
 le catalogue indique 2 mA $< I_{DSS} < 10mA$



Transistor à grille isolée type C.

Exemples : Pour le type SFT 602.
 - à $V_{DS}(sp) = 20V$ et $V_{GS} = 0$
 le catalogue indique : $0,2 mA < I_{DSS} < 1,5 mA$
 - à $V_{DS}(sp) = 20V$ et $V_{GSX}(sp) = -10V$
 le catalogue indique : $I_{DSSX} < 1 \mu A$

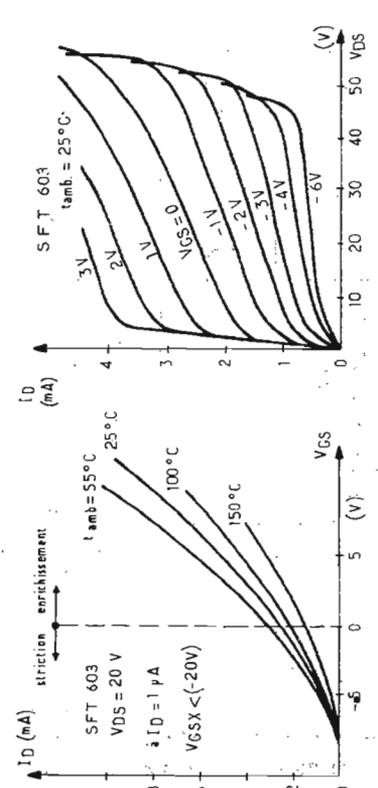
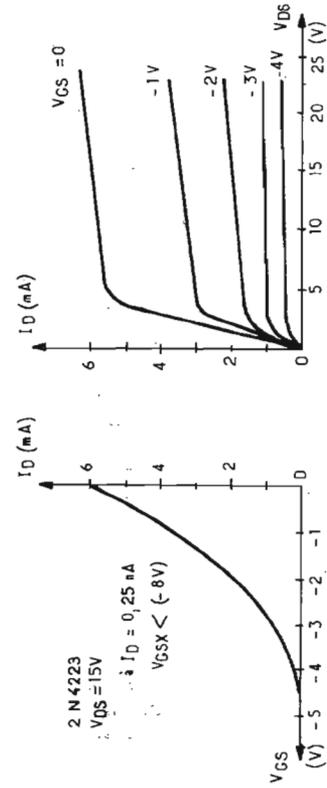
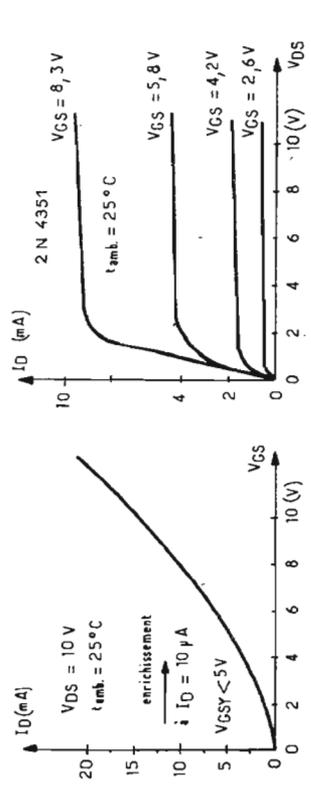
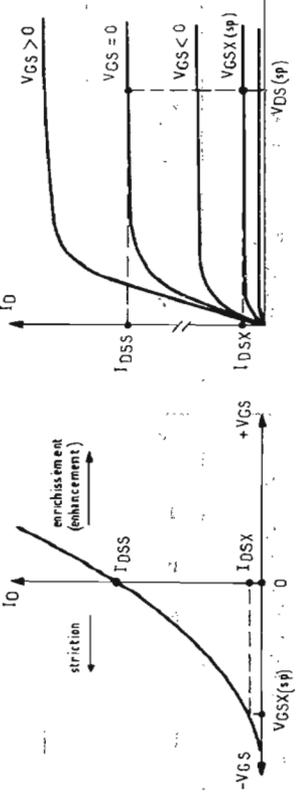


Tableau II : Symboles relatifs aux transistors à effet de champ		
Symboles		Définitions (SESCOSEM)
CAPACITÉS [pF]	C_{GB} C_{GO} C_{IB} C_L	Capacité d'entrée grille/substrat Capacité grille/sortie Capacité d'entrée/substrat Capacité de charge (L = load, load : charge ; ne pas confondre avec L = low de l'état bas logique).
	C_{OB} $C_{\phi B}$	Capacité de sortie/substrat Capacité de l'entrée d'horloge
RÉSISTANCES [Ω]	R_{IH} R_{IL} R_{on} R_{onH} R_{onL} R_{off}	Résistance dynamique d'entrée à V_{IH} (H : état logique haut). Résistance dynamique d'entrée à V_{IL} (L : état logique bas) Résistance de conduction Résistance de conduction à l'état logique haut. Résistance de conduction à l'état logique bas. Résistance de blocage.
FRÉQUENCE		Fréquence d'horloge
TEMPS [s]	t_A t_{CI} t_{CS} t_{ϕ} t_{hold} t_{PHL} t_{PLH}	Temps d'accès Temps de mise en inhibition Temps de levée de l'inhibition Temps de descente de l'horloge Temps de maintien Temps de propagation à la décroissance du signal de sortie Temps de propagation à la croissance du signal de sortie.

Tableau III : Symboles généraux.

Symboles		Définitions (SESCOSEM)
PUISSANCES UTILES	P_D	Puissance dissipée au drain
	P_S	Puissance prise sur la source
	P_{tot}	Puissance totale dissipée en moyenne par la T.E.C.
TEMPÉRATURES LIMITES	T_{amb}	Température ambiante, à l'entour du boîtier (proche environnement), en degrés centésimaux [°C]
	$T_{boîtier}$	ou T_b , ou T_{case} , température du boîtier en [°C]
	T_{fb}	Température de fond de boîtier (limite tolérée pour un rendement optimal)
	T_j	Température de la jonction (les T.E.C. sont des structures « unipolaires » mais non pas des « unijonctions » U.J.T.) [°K]
	T_{stg}	Températures de stockage , ou gamme de températures acceptée pendant la durée d'emmagasinement des pièces, sans avoir à redouter de détérioration des caractéristiques (dégradations) ni d'altérations de fiabilité (période de fonctionnement entre deux pannes successives).
RÉSISTANCES THERMIQUES	R_{th}	La résistance thermique correspond à une élévation de température [°C] par unité de puissance dissipée (entre deux points spécifiés par les constructeurs).
	R_{thj-b}	Résistance thermique entre la jonction et le boîtier
	R_{thj-fb}	Résistance thermique entre la jonction et le fond du boîtier
	R_{thfb-r}	Résistance thermique entre fond du boîtier et radiateur r (plans, à ailettes, en X, etc.)
	R_{tht}	Résistance thermique transitoire.
	R_{thb-r}	Résistance thermique entre boîtier et radiateur (r)
	$R_{thj-amb}$	Résistance thermique entre jonction et ambiance
	$R_{thr-amb}$	Résistance thermique entre radiateur et ambiance

considérations que les transistors bipolaires. Les configurations drain, à la masse, source, à la masse, ou grille à la masse, ont pour pendants équivalents collecteur à la masse, émetteur à la masse, ou base à la masse.

Un coup d'œil sur les générateurs auxiliaires de polarisation extérieurs n'a rien de superflu. Nous accepterons de nommer :

- V_{DD} : la tension d'alimentation externe du drain (prise entre cette électrode et la référence de potentiel, en général la masse) ;
- V_{SS} : la tension d'alimentation de la source dans les mêmes conditions de mesure ;
- V_{GG} : la tension d'alimentation de la grille, qui, à propos de la commutation (M.O.S. utilisé en découpeur, ou « chopper ») se subdivise selon deux importantes valeurs : $V_{G(off)}$, ou tension de blocage de la porte et $V_{G(on)}$, tension de conduction de la porte.

Dans certains catalogues, le lecteur rencontre une certaine tension d'écart V_e , dite résiduelle, dont nous aurons à parler plus bas aussi ne nous y attarderons-nous pas, maintenant, car nous devons nous occuper d'autres informations ressortant du tableau I (in § 3-1). C'est ainsi que vont être analysées, dans la suite :

- V_{DSS} , tension drain-source en court-circuit (S = « short circuit ») ;
- $V_{BRDS(X)}$ ou $BV_{DS(X)}$, tension de rupture (BR = B = breakdown, panne, cassure, rupture, etc.) du conduit drain-source (impraticable au-delà et détérioré à ce niveau tensiométrique) ; le suffixe X dénote une valeur spécifique (particulièrement déterminée) du courant I_D à partir de laquelle un claquage s'opère qui détruit le canal (irréparablement) ;
- $V_{BRDG(O)}$ ou $BV_{DG(O)}$, tension entre grille et drain, à intensité nulle, entraînant une détérioration du composant ;
- V_{BRGSS} ou BV_{GSS} , tension de destruction pour la grille en court-circuit ;
- $V_{GS(Y)}$ est une tension de seuil de polarisation que nous étudierons plus loin ;
- V_{BRSDb} , BV_{SDB} , V_{BRGSB} , BV_{GSB} sont des tensions d'altérations rapportées au substrat et à une électrode S, G ou D ;

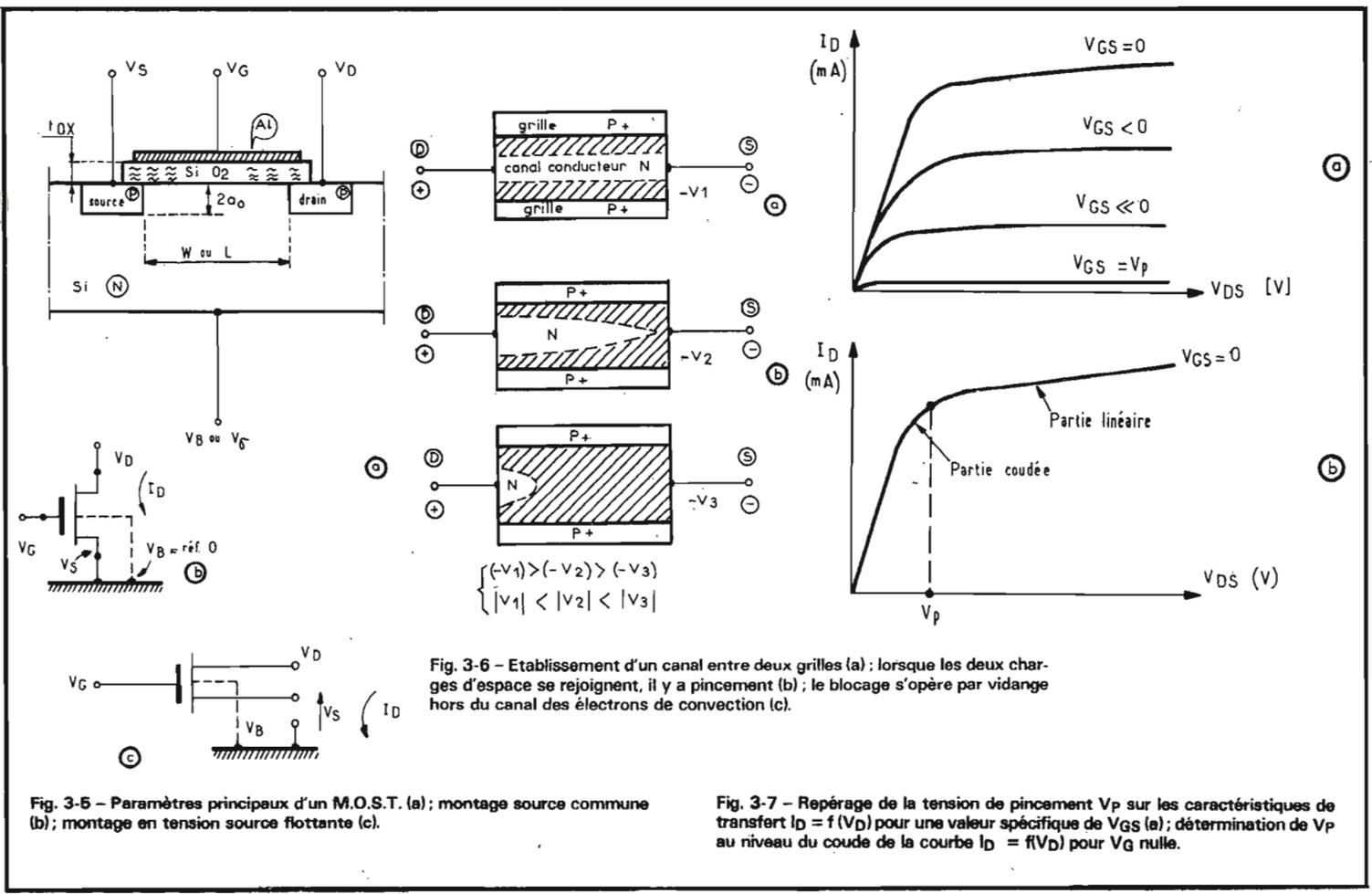


Fig. 3-5 - Paramètres principaux d'un M.O.S.T. (a); montage source commune (b); montage en tension source flottante (c).

Fig. 3-6 - Etablissement d'un canal entre deux grilles (a); lorsque les deux charges d'espace se rejoignent, il y a pincement (b); le blocage s'opère par vidange hors du canal des électrons de convection (c).

Fig. 3-7 - Repérage de la tension de pincement V_p sur les caractéristiques de transfert $I_D = f(V_{DS})$ pour une valeur spécifique de V_{GS} (a); détermination de V_p au niveau du coude de la courbe $I_D = f(V_{DS})$ pour V_G nulle.

— $V_{GS(P)}$, $V_{GS(O)}$, V_{GST} , V_p , V_T se ramènent à l'expression de la tension de pincement (P) qui constitue une grandeur fondamentale des T.E.C. et des M.O.S.T.

3-22. - La tension de pincement.

Commençons par elle, à cause de son importance. La littérature introduit la notion de pincement, ou « pinch off » pour expliquer l'obstruction du canal par la rétraction de la charge d'espace; ou, à l'opposé, la tension de seuil V_T (T = threshold, ou « seuil ») pour souligner le début de la conduction. Parfois, c'est le symbole $V_{GS(P)}$, tension grille-source de pincement, qui prévaut pour regrouper cette double idée (voir fig. 3-6 pour comprendre le mécanisme d'obstruction du canal dans le cas d'un T.E.C. à déplétion).

Lorsque les caractéristiques de transfert

$$I_D = f(V_{DS})_{V_{GS}}$$

sont tracées (fig. 3-7, a), il est facile de délimiter la valeur de la tension de pincement V_p en se situant sur la fin de la courbe ascensionnelle de la courbe $I_D(V_{DS})$ pour laquelle V_{GS} est nulle (fig. 3-7, b).

Revenons à la figure 3-6, pour expliciter la formation du pincement.

La figure 3-6 (a) montre la répartition de trois couches PNP dans le cas d'un T.E.C. à jonction (fonctionnant en déplétion) de canal N. La grille (porte) est du type P surdopé (P^+), donc surchargé en accepteurs A^- . Le canal N comporte un dopage normal de donneurs (ionisés à l'état D^+).

Si l'entrée (input I), ici la source S, est négative, la jonction P^+N se polarise en inverse, ce qui développe une forte résistance (en courant continu, ou impédance, en courant alternatif) puisque la couche de charge d'espace s'accroît (repoussant donc les particules libres en dehors d'elles). Peu de négatons circulent, alors, dans le canal (celui-ci est obstrué). Si la tension appliquée ($-V$) diminuait (puisque « négative », elle augmenterait en... valeur absolue [V]), les deux régions de charge d'espace (fig. 3-7, b et 3-7, c) s'épaissiraient et finiraient par se rejoindre pour bloquer à la longue le canal.

Dans ces conditions, on dépasse un seuil de non-conduction, qui se rattache, donc, à la tension de pincement ($-V_p$). La

grille, polarisée en sens inverse, est, néanmoins, traversée par un faible courant de fuite (I_{GSS}). Elle conserve, toutefois, une forte impédance Z_G comme c'est le cas pour un tube électronique, ce qui favorise le gain en puissance.

La tension de seuil, liée au pincement, est déterminée par la concentration en surface du substrat, par la qualité des oxydes, mais aussi par la nature métallique de l'électrode de grille.

Lorsque le pincement est obtenu, le canal est complètement vidé et le flux électronique tombe presque à zéro. Si le canal est N :

- Quand $V_p > 0$, le T.E.C. est à « enrichissement » ;
- Quand $V_p < 0$, le T.E.C. est « à striction ».

- Si le canal est P :
- Quand $V_p > 0$, le T.E.C. est « à appauvrissement » ;
- Quand $V_p < 0$, le T.E.C. est « à enrichissement ».

La tension de pincement est repérée sur les caractéristiques $I_D = f(V_{DS})$ quand $I_D = 0$ (fig. 3-7, a) mais aussi lorsque $V_{GS} = 0$ t que le courant I_D devient constant. Il y a donc autant de tensions V_p que de valeurs de $I_D = f(V_{DS})$ paramétrés par V_{GS} (fig. 3-7, b).

Le lieu géométrique des V_p est tracé en traits tiretés sur la figure 3-2.

La tension de seuil V_{T0} d'un élément M.O.S. s'exprime par :

$$V_{T0} \approx \left\{ - \frac{\delta}{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r} (Q_{SS} + Q_B) + \Phi_{MS} \right\} [V]$$

qui inclut :

- δ = épaisseur du diélectrique (silice) de grille ;
- ϵ_0 = permittivité du vide ;
- ϵ_r = permittivité relative du matériau semi-conducteur ;
- Q_{SS} = densité de charge (statique) par unité de surface à l'interface silicium/oxyde de silicium ;
- Q_B = charge par unité d'aire dans la zone de déplétion, due au substrat ;
- Φ_{MS} = potentiel de contact entre substrat silicium et métal de grille.

Si l'on introduit V_0 , la tension entre la source et le substrat ($V_0 = V_{BS}$), la tension de seuil évolue suivant la loi :

$$V_T = f(V_0) = V_{T0} + k_T \sqrt{V_0} \approx V_{T0} + 0,5 \sqrt{V_0}$$

Tableau IV : Tensions d'entrées et de sorties « logiques »

Avertissement Avant de consulter ce tableau, se reporter à la figure 3-16 du texte.
 Bien noter que la **valeur logique « 0 »** se rapporte au **niveau de référence** (qui peut être fixé par n'importe quelle tension positive, ou négative); le niveau logique 1 détermine alors la **tension de mise en action du composant** (ou du dispositif) auquel elle est appliquée; elle peut être positive (logique H) ou négative (logique L).
 Le niveau H (« high » : haut) est donné pour les grandeurs positives. Le niveau L (« low » : bas) est procuré pour les valeurs négatives. La capitale (M) indique un maximum (max), soit la **tension positive la plus élevée, soit la tension négative la moins basse**.
 La minuscule (m) s'applique à un minimum (min) soit la **tension négative la plus basse, soit la tension positive la moins élevée**.
 Le symbole I est relatif aux entrées (« Inputs »).
 Le symbole O (à ne pas confondre alors avec le zéro des chiffres ni le zéro logique) se rattache aux sorties (« Outputs »).

	Désignations des tensions	Définitions (Il en serait de même pour les courants; il faudrait alors substituer intensités à tensions).
ENTRÉES (INPUTS) I	$V_{IH} (M)$	Tension d'entrée (T.E.) logique (l) « 1 » maximale: tension positive la plus haute sur l'entrée.
	$V_{IH} (m)$	T.E. l « 1 » minimale: tension positive la moins élevée sur l'entrée.
	$V_{IL} (M)$	T.E. logique négative (l.n) « 1 » maximale. Tension négative la moins basse sur l'entrée.
	$V_{IL} (m)$	T.E. (l.n.) « 1 » minimale: tension négative la plus basse sur l'entrée.
SORTIES (OUTPUTS) O	$V_{OH} (M)$	Tension de sortie (T.S.) logique (l) « 1 » maximale: tension positive la plus haute sur la sortie.
	$V_{OH} (m)$	T.S. (l) « 1 » minimale: tension positive la plus basse sur la sortie.
	$V_{OL} (M)$	T.S. logique négative (l.n.) « 1 » maximale: tension négative la moins basse sur la sortie.
	$V_{OL} (m)$	T.S. (l.n.) « 1 » minimale: tension négative la plus basse sur la sortie.

car le facteur k_T passe de 0,4 à 1,2 selon les matériaux. Il s'agit d'un terme géométrique « de forme » tel que :

$$k_T = \gamma \cdot \frac{2a_0}{L}$$

$$\text{avec } 2,5 \leq \gamma \leq 3,5 \quad \left[\frac{\mu A}{V^2} \right]$$

dépendant donc de la résistivité globale du substrat :

$$k_T = \frac{\mu_p}{2t_{ox}} \cdot \epsilon_{ox}$$

avec: μ_p , mobilité des porteurs minoritaires (trous);
 ϵ_{ox} , permittivité de l'oxyde;
 t_{ox} , épaisseur (thickness) de l'oxyde de silicium.

3-2.3 - Les tensions de claquage.

Certains les nomment aussi **tensions de perçage** (13). Elles sont limitées par V_{GSMAX} , qu'il ne faut **jamais** dépasser, même sous impédances élevées car il s'agit bien d'une « **tension perforante** » comme dans les condensateurs et non d'une « **tension rattrapable** » comme dans les transistors. D'où les précautions, préconisées par H. Arcieszewski :

— Utiliser un fer à souder dont la panne est reliée à la masse du montage.

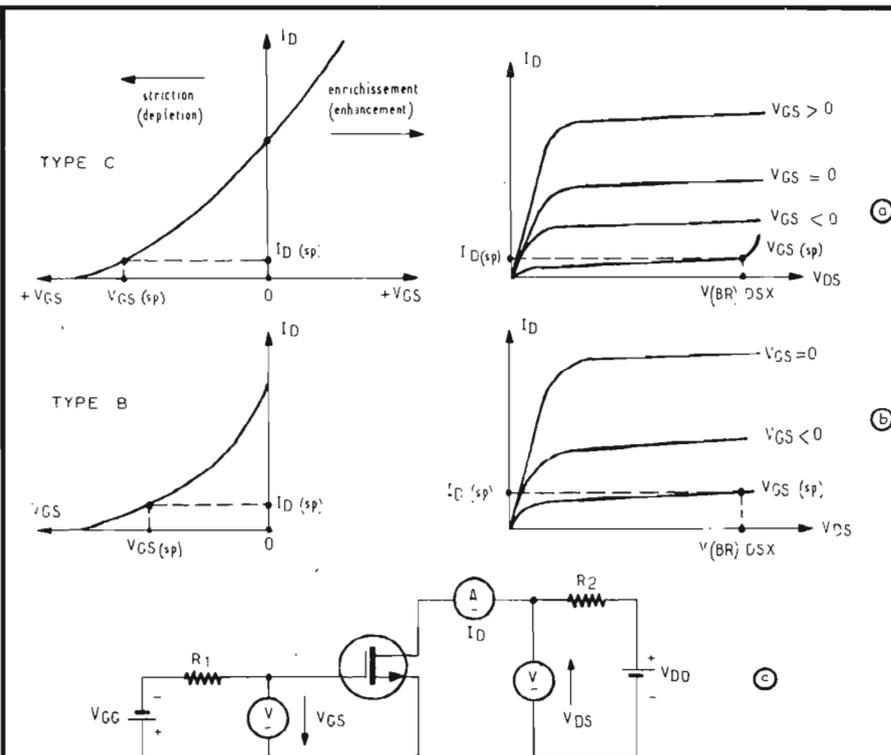


Fig. 3-8 - Distinction de V_p dans le cas d'un T.E.C. bi-mode (a), d'un T.E.C. à déplétion (b) et montage de mesure correspondant (c).

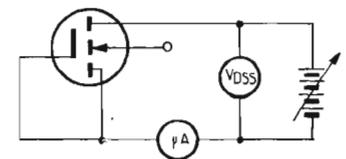


Fig. 3-9 - Montage de mesure pour évaluer V_{DSS} .

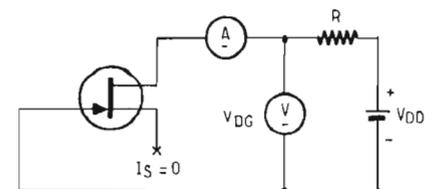


Fig. 3-10 - Détermination de V_{DG} .

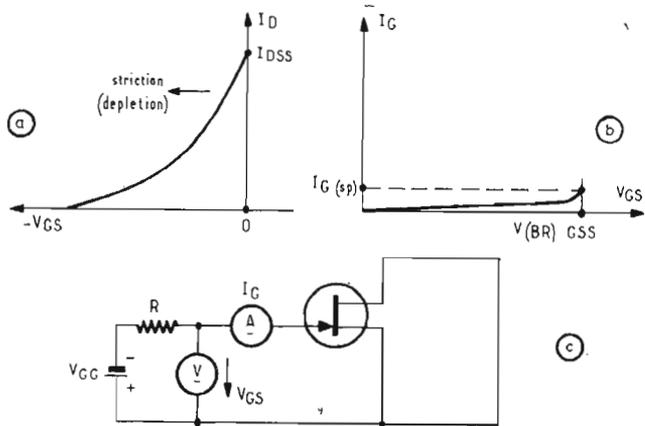


Fig. 3-11 - Mesure de la tension de rupture $V(BR)_{GSS}$ pour un T.E.C. à déplétion (a) et report sur la caractéristique $I_G = f(V_{GS})$ avec un courant de grille spécifié (b); montage de mesure nécessaire (c).

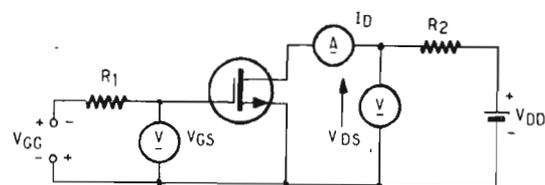


Fig. 3-12 - Détermination de la tension de saturation.

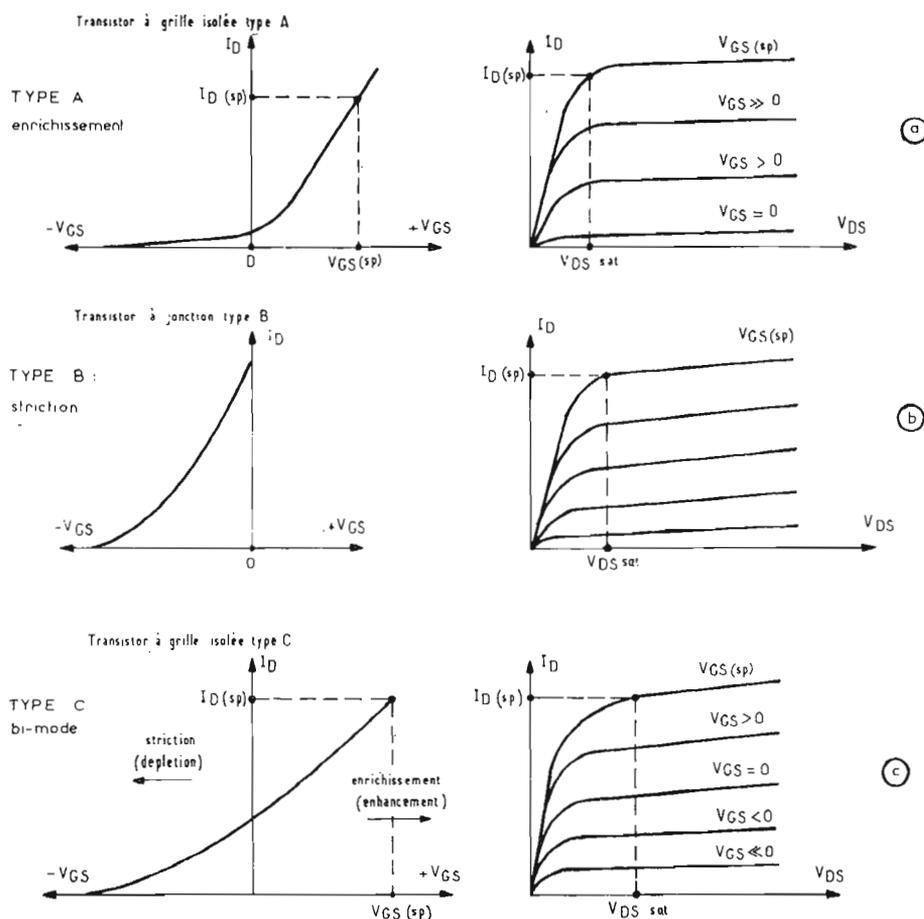


Fig. 3-13 - Détermination des tensions de saturations pour les T.E.C. à grille isolée de type A (a), de type B (b) et de type V (c).

— Débrancher la prise de courant (secteur) du fer pendant l'opération de soudure de la grille.
— Afin d'éviter les tensions parasites qui seraient de nature à détruire la grille, il est recommandé de mettre les quatre bornes (G, D, σ , S) en court-circuit ou hors circuit pendant toutes opérations précédant la mise en fonctionnement du dispositif (15).

Dans le cas où le substrat (corps) du transistor est connecté à une borne de sortie, il est nécessaire de préciser les conditions de polarisation de cette électrode.

La tension de claquage drain-source (BV_{DSB}), pour un courant de drain spécifié (lorsque la jonction « grille-source » se trouve bloquée par une polarisation inverse) s'écrit aussi $V(BR)_{DS(X)}$.

Les initiales (BR) sont prises au mot anglais « breakdown » (panne, rupture) et (X) souligne que I_D se trouve particulièrement déterminé. La tension $V(BR)_{DS(X)}$ est applicable aux T.E.C. à G.I. (grille isolée) pouvant travailler en déplétion et en élargissement (« double mode de fonctionnement »), ou en simple striction (fig. 3-8, a et b). Elle se mesure par un

montage d'essais dont le schéma de principe est repris figure 3-8 (c).

La tension $V(BR)_{DS(S)}$ pour laquelle le drain est en court-circuit [S = short-circuit] est repéré suivant la méthode de la figure 3-9.

La tension $V(BR)_{DGO}$ est la tension de claquage drain-grille (cas particulier de BV_{GSB}) pour un courant de drain spécifié, avec le

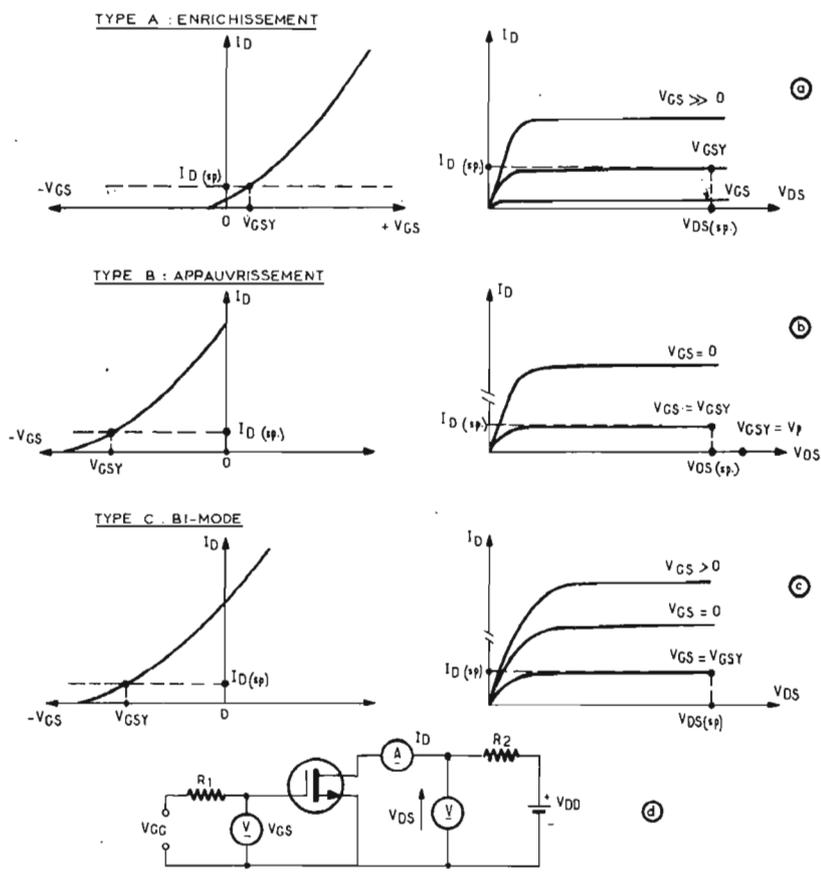


Fig. 3-14 - Tensions de seuil de polarisation V_{GSY} dans les trois modes de fonctionnement A (a), B (b), C (c), avec montage de mesure (d).

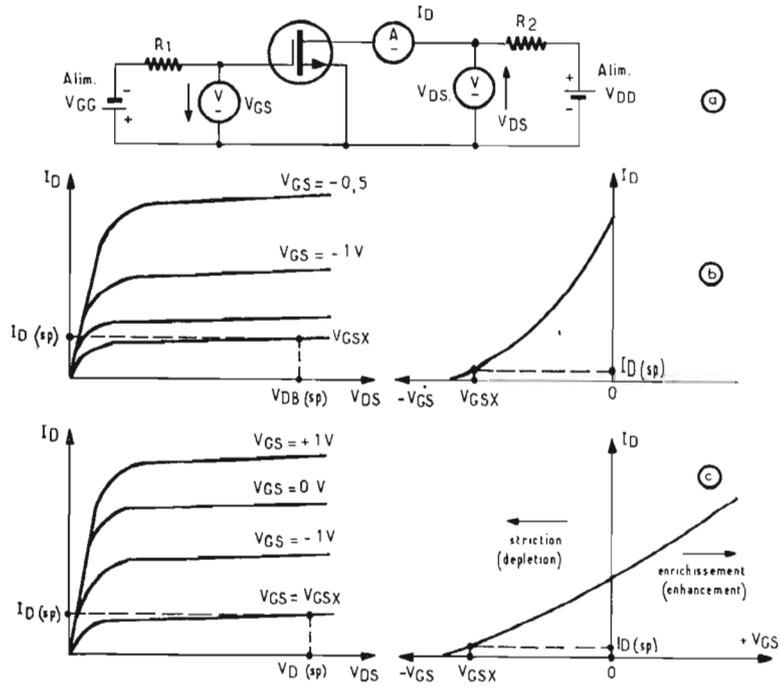


Fig. 3-15 - Tensions de blocages V_{GSX} : circuit de mesure (a), cas d'un T.E.C. à déplétion (b) et d'un T.E.C. bi-mode (c).

circuit de source ouvert $I_S = 0$, normalement formulé pour un T.E.C. à déplétion, à jonction (fig. 3-10). Quant à la tension $V_{(BR)GSS}$ (qui n'a rien à voir avec la précédente relative au drain D, alors que celle-ci relève de la porte G) est la tension de claquage, grille-source pour un courant de grille I_G spécifié, avec $V_{DS} = 0$ (drain-source reliés en court-circuit), appliquée aux T.E.C. à jonction à striction (fig. 3-11).

3-2.4 - Tension de saturation de V_{DS} .

Elle s'écrit $V_{DS\ sat}$. Elle se mesure avec I_D et V_{GS} , spécifiés, suivant le montage de la figure 3-12, où apparaissent clairement les significations de V_{DD} et de V_{GG} (voir tableau I). Avant d'effectuer le relevé métrique correspondant, il est nécessaire de respecter certaines conditions, notamment la présence de R_1 et de R_2 , résistances de protection. La polarité de V_{GG} est appliquée au T.E.C. selon son type afin d'obtenir le courant I_D à la conduction. Pour cela, on procède comme suit :

- Régler la tension des sources V_{GG} et V_{DD} au minimum.
- Placer le transistor dans le circuit de mesure.
- Régler V_{GG} pour obtenir la tension V_{GS} spécifiée.
- Ajuster V_{DD} pour obtenir le courant I_D spécifié.
- La lecture du voltmètre V_{DS} correspond à $V_{DS\ sat}$.

La figure 3-13 (a, b, c) schématise les trois façons de repérer $V_{DS\ sat}$ selon les modes de fonctionnement A.B.C.

3-2.5 - Tension de seuil de polarisation V_{GSY} .

V_{GSY} est la tension de seuil de polarisation grille-source au début de conduction appréciable, pour un courant I_D , et une tension V_{DS} spécifiés (généralement spécifié pour T.E.C. type A à enrichissement).

La figure 3-14 indique comment retrouver cette tension selon les types de T.E.C. et présente aussi le synoptique de mesure correspondant.

3-2.6 - Tension de blocage V_{GSX} .

Passons à la tension de blocage drain source, normalement déterminée pour les T.E.C. de type B à jonction et de type C à grille isolée. Le principe de mesure est donné figure 3-15(a) et les valeurs notées, reportées sur les caractéristiques de T.E.C. à striction (fig.

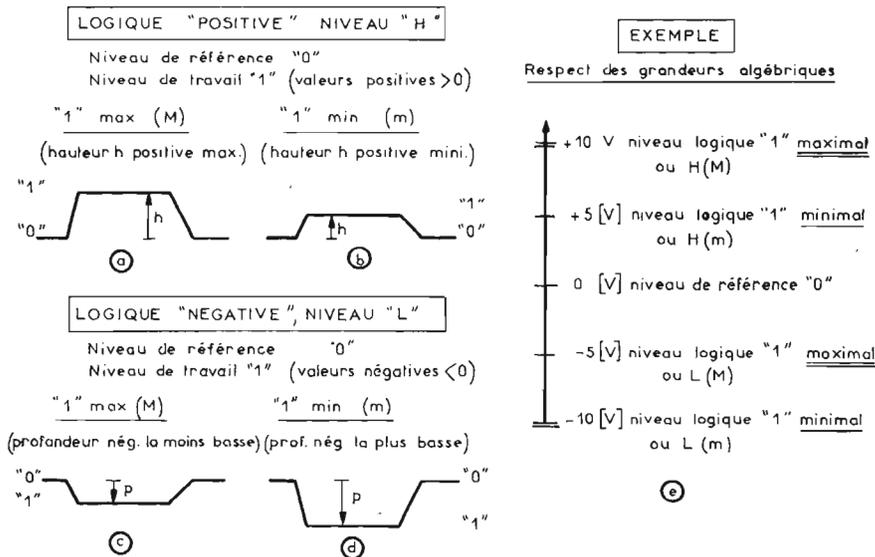


Fig. 3-16 - La question des notations logiques trouble les débutants, souvent faute d'une référence précise à l'algèbre ; le code présenté par cette illustration respecte cette clause ; si la hauteur h est maximale (maximum maximorum), on a un niveau logique haut (H) « 1 » maximal (a) ; si la hauteur h est minimale (minimum maximorum) on a toujours un niveau « 1 » (H) mais minimal (b) ; si la profondeur p est maximale (ou la plus élevée sur l'échelle des nombres négatifs, ou maximum minimorum) on a affaire à un niveau logique bas (L) « 1 » minimal (c) ; au contraire, lorsque la profondeur est minimale (la plus décalée vers les x négatifs les plus grands en valeurs absolues, ou minimum minimorum) on se trouve dans le cas d'une logique basse (L) « 1 » minimale (d) ; c'est bien ce qu'établit le report des valeurs H (« 1 ») et L (« 1 ») sur un axe algébrique (e) ; la littérature confond, dans la majeure partie de ces explications, le minimum avec le maximum (et vice-versa) quand elle se réfère aux grandeurs négatives, ce qui est, mathématiquement, inadmissible ; si les signaux étaient des intensités, rien ne changerait ; il convient toutefois de se souvenir qu'à un faible débit correspond une forte tension et vice-versa.

aurions rencontré maint déboires. Insistons encore, nul ne se perfectionne en électronique sans un minimum de connaissances théoriques, axées sur l'utilisation. Le « génie » ne vient qu'ensuite... aurait dit Edison...

B. MARIN

NOTES et LEGENDES de l'article « 3. Paramètres et caractéristiques essentielles des T.E.C. et des M.O.S.

(12) C'est la raison pour laquelle les constructeurs ne reproduisent qu'une caractéristique unique procurant le courant de drain I_D en fonction de la polarisation de grille V_{GS} .

N.B. - Les notations I (input) pour l'entrée, O (output) pour la sortie sont très utiles à propos de la commutation (nous y reviendrons, par conséquent).

(13) Le « perçage » se manifeste par l'apparition brusque d'une faible résistance (forte conductance) entre la source S et le drain D lorsque la tension de drain V_D dépasse une limite précisée par les constructeurs. La jonction unipolaire des T.E.C. est rompue à l'instant où cette « avalanche » se produit.

(14) En effet, un fer à souder (110 V, secteur) a souvent des fuites non négligeables par rapport à la résistance d'entrée ($10^{12} \Omega$).

(15) Avec les sols isolés et les vêtements en nylon, il arrive fréquemment que le corps humain soit porté à un potentiel élevé et accumule une charge nettement supérieure à 200 pico-coulombs (= VC). Il sera donc nécessaire de se mettre au potentiel de la masse avant de toucher le montage comportant des transistors à effet de champ à grille isolée.

3-115, b) ou à appauvrissement - enrichissement (fig. 3-15, c).

3-2.7 - Tensions de commutation.

Le nota bene du paragraphe 3-2.2 en laissait entrevoir l'importance. Avant de nous y attarder, nous pensons qu'une précision du vocabulaire s'impose en la matière, aussi en dresserons-nous la terminologie par l'intermédiaire du graphique de la figure 3-16. Ce résumé général convient bien sûr à d'autres cas que ceux des T.E.C. et des M.O.S. Le tableau IV rassemble des informations complémentaires, sans lesquelles l'utilisation de composants en basculeurs n'est guère intelligible. Nous convions nos lecteurs à les conserver par devers eux et à s'y reporter chaque fois qu'un « problème de logique électronique » leur rendra la tâche difficile.

3-2.7.1 La tension de blocage $V_{G(off)}$

Il s'agit de la tension de polarisation amenant une intensité

minimale I_D dans le canal. On l'appelle encore tension de coupure grille-source $V_{GS(off)}$. Au-delà de cette valeur de polarisation le courant cesse de décroître parce que les fuites de grille d'origine résistive ou capacitive prennent de l'importance.

3-2.7.2 La tension de blocage $V_{D(off)}$

Il s'agit de la tension de polarisation inhibant le courant de drain I_D . Elle s'écrit parfois $V_{DS(off)}$. Elle est moins employée en pratique, comparativement à la précédente.

3-2.7.3 La tension de conduction $V_{G(on)}$

Elle marque la naissance d'un fort courant dans le canal (conductance élevée).

3-2.7.4 Tension résiduelle d'écart V_e

Elle apparaît dans l'état de court-circuit (état « ON » des logiciens) et s'avère indépendante de la tension d'entrée V_G , en courant continu. Elle constitue, en

fait, une erreur de zéro, variable dans le temps et soumise aux fluctuations thermiques. Elle dépend aussi de la nature des potentiels de contact, existant entre les zones différemment dopées du M.O.S.T. Elle reste toujours inférieure (quasi-indiscernable) à la tension de départ des bipolaires.

3-2.8 - Note à propos des tensions.

Nous n'avons pas pu, dans le cadre imparti, développer les conditions métrologiques à respecter ni décrire en détails les processus de mesure. Nous invitons nos lecteurs à se procurer l'ouvrage de H. Arcieszewski, cité en bibliographie.

Notre vue, ici, était d'attirer l'attention des lecteurs sur ces questions simples mais délicates à manier ainsi que nous nous en rendons compte lorsque nous passerons aux applications (attention : mesurez vos pièces achetées !).

Si nous avons abordé, sous ce regard, les montages, nous