

## MODULATEUR PWM NUMERIQUE PROGRAMMABLE: Application à la Conversion d'énergie Maximale du panneau solaire à la batterie

Oleh : Y. Haroen\*, J. Jalade\*\*, J. C. Marpinard\*\*

### ABSTRACT

PWM modulator with feedback analog is often used in a voltage/current control system, but sometimes problems arise in which the modulator could not be used with this method. To overcome this problem a programmed numeric PWM modulator is used.

This paper discusses the working procedure and realization from the software and hardware point of view by using 8085 microprocessor.

One of its application is to control the firing time of power switching transistor in a DC converter (BUCK) where the input BUCK is connected to the solar cell panel and the output side is connected to the battery.

With time firing control of the power transistor, the power of the solar cell panel can be transferred to the battery at its maximum.

### SARI

Modulator PWM dengan umpan balik analog sering digunakan dalam sistem pengaturan tegangan/arus, tetapi kadang-kadang hal ini menimbulkan masalah, sehingga modulator dengan cara ini tidak dapat dipergunakan lagi. Salah satu cara untuk mengatasinya adalah dengan menggunakan modulator PWM numerik terprogram.

Di sini diuraikan cara kerja dan realisasinya ditinjau dari piranti lunak dan piranti keras dengan menggunakan mikroprosesor 8085.

Salah satu aplikasinya adalah pengaturan waktu penyalaan transistor daya *switching* pada suatu konverter arus searah (BUCK). Sisi masukan BUCK dihubungkan ke suatu panel sel surya dan sisi keluaran dihubungkan ke baterai. Dengan pengaturan waktu penyalaan transistor daya, maka daya dari panel sel surya dapat ditransfer semaksimal mungkin ke dalam baterai.

### RESUME

Le modulateur PWM avec retroaction l'analogique est souvent utilisé dans la régulation de courant et tension. Mais souvent on ne peut pas l'utiliser. Pour surmonter cette difficulté on utilise un modulateur de type PWM programmable.

\* Laboratory Electrical Energy Conversion, Dept. of Electrical Engineering, ITB, Jl. Ganesa 10 Bandung-Indonesia

\*\* Laboratoire D'Automatique et D'Analyse Des Systèmes LAAS-CNRS; equipe Conditionnement de Puissance, Avenue du Col Roche 31400 Toulouse-France

Dans ce papier est exposé la méthodologie concernant le matériel et le logiciel en utilisant le microprocesseur 8085.

Un exemple d'application de ce type de modulateur est la régulation de temps de conduction d'un Transistor de puissance utilisé dans un convertisseur courant continu (BUCK), dont l'entrée de BUCK est connecté au panneau solaire et la sortie à une batterie d'accumulateur. Avec ce type de régulation de temps de conduction dans un Transistor de puissance, la puissance transmise par le panneau solaire à la batterie est maximale.

**RAPPEL**

Les tensions continues sorties des différents type de convertisseurs continu – continu abaisseur ou éleveur de tension dépendent de temps respectifs de fermeture ( $T_{on}$ ) et d'ouverture ( $T_{off}$ ) transistor interrupteur. L'action de commande ou de régulation devra donc se faire sur ce temps à partir d'un signal de commande ( $V_c$ ) généralement issue d'une boucle de contre réaction analogique que nous avons présenté sur la figure 1.

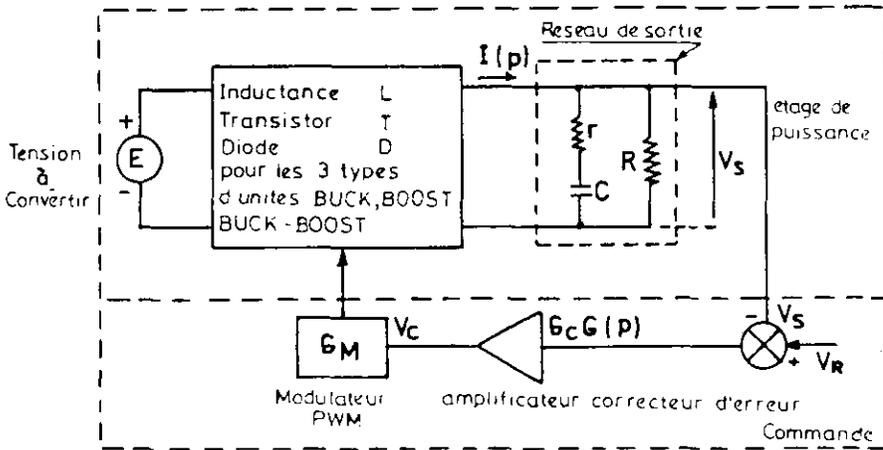


Figure 1 Schéma bloc d'un convertisseur PWM

A partir de ce schéma électrique de l'étage de puissance du convertisseur abaisseur de tension sur la figure 2 nous présentons les formes d'ondes pour la conduction continu et discontinu (figure 3).

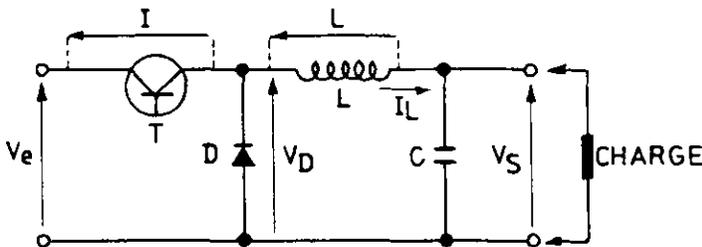


Figure 2 Etage de puissance du convertisseur abaisseur

Le problème que l'on pose á present est de régler  $T_{on}$  et  $T_{off}$  sans boucle de contre réaction analogique. La solution est d'utiliser un micro-calculateur qui constitue 'Modulateur PWM Numerique'.

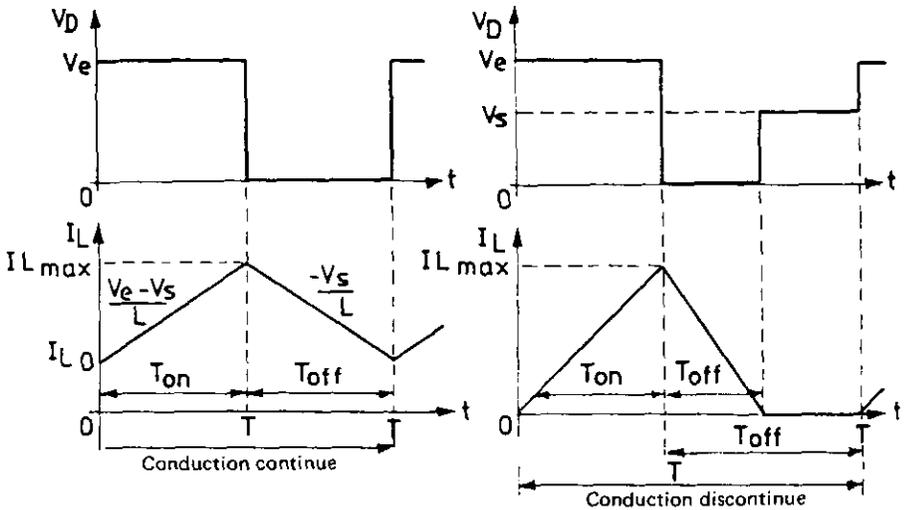


Figure 3 Forme d'onde dans un convertisseur abaisseur

Alors le schéma de la figure 1 devient ce lui de la figure 4.

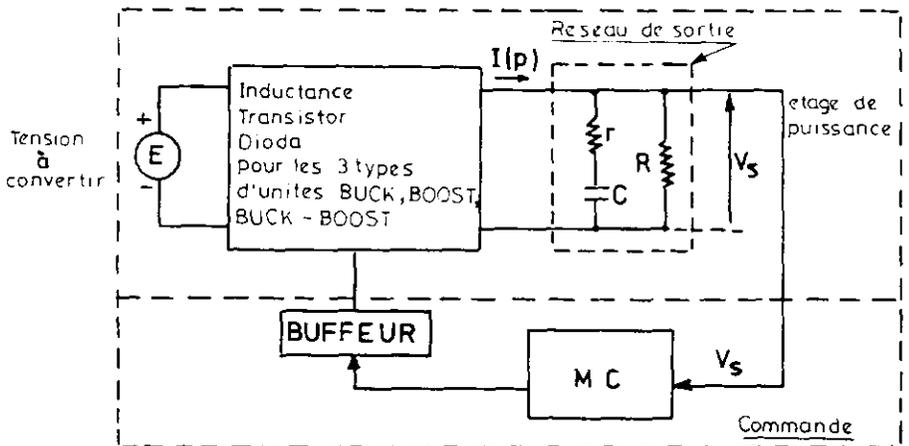


Figure 4 Schéma bloc d'un convertisseur PWM sans boucle contre réaction analogique.

### PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

Le fonctionnement de modulateur numérique est le suivant : Si nous voulions avoir  $V_s$  constante quelque soit la charge, on fait l'acquisition de la tension  $V_s$  de façon régulière et puis la compare avec une valeur de référence. Suivant la valeur de tension de sortie nous commandons  $T_{on}$  afin de maintenir  $V_s$  à sa valeur de consigne, dans le cas ou l'on calcule une valeur moyenne de  $V_s$  sur plusieurs échantillons, on a un système moins rapide qu'une boucle de contre réaction analogique à cause du temps de calcul microcalculateur, mais ce

système de commande reste la seule solution dans certain cas que nous allons voir dans le paragraphe d'application.

Ce modulateur est plus particulièrement destiné à commander un interrupteur à Transistor Bipolaire ou à FET. Dans notre cas l'unité centrale et un microprocesseur INTEL 8085, l'interface software et hardware est assurée par un timer 8253-5 et une bascule J-K 74LS112. Le schéma de principe est donné à la figure 5.

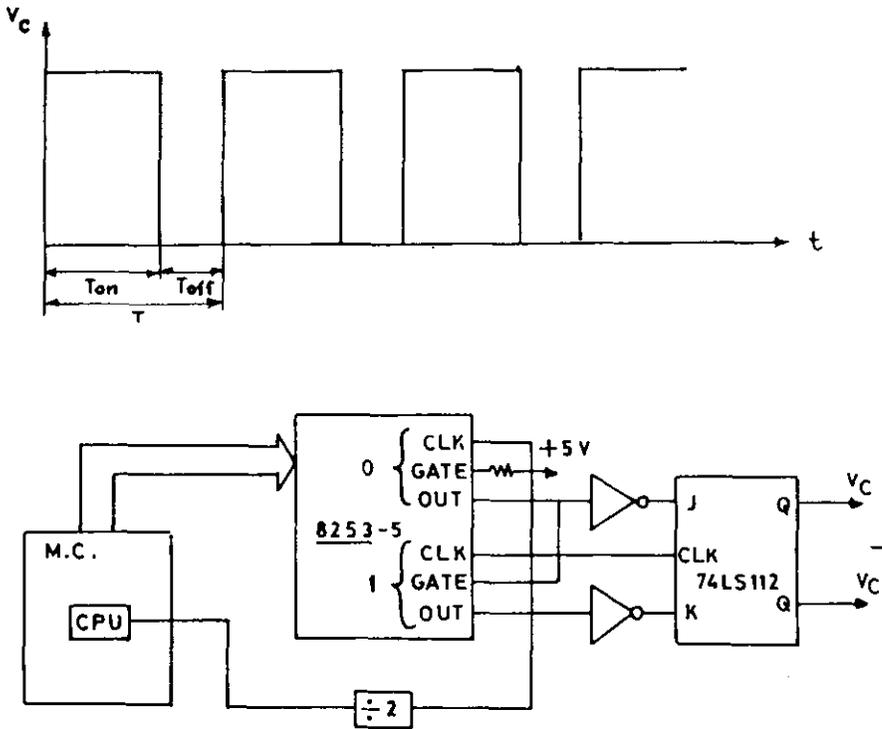


Figure 5 Modulateur PWM Numérique

### GENERATION DE $T_{on}$

Le compteur 0 du 8253 est programmé en mode 2, le compteur 1 est programmé en mode 5. Tandis que le compteur 2 est libre. La sortie du compteur 0 est connectée à l'entrée du 'Gate' du compteur 1.

Le principe de fonctionnement de ces ensembles sont le suivant:

Le compteur 0 génère la fréquence de découpage du convertisseur à partir de l'horloge du M.C. Au début de chaque période de découpage, il enclenche la bascule JK et le compteur 1, dont la fin de comptage reinitialise la bascule JK. Remarquons que suivant le mode du compteur 0 ou 1 on peut avoir le modulateur numérique à fréquence fixe ou variable. Dans notre cas le compteur 0

fixe la fréquence de découpage du convertisseur. Le changement du contenu du registre de compteur 1 provoque le changement de  $T_{on}$ .

Les formes d'ondes de sorties de ce dispositif sont données sur la figure 6.

Notons que l'arrêt du convertisseur se fait aussi facilement par programmation en mettant le contenu au registre compteur 1 a zero.

Nous avons travaillé en utilisant le langage assembleur alors l'adressage du Timer 8253 se fait par l'instruction IN/OUT du 8085.

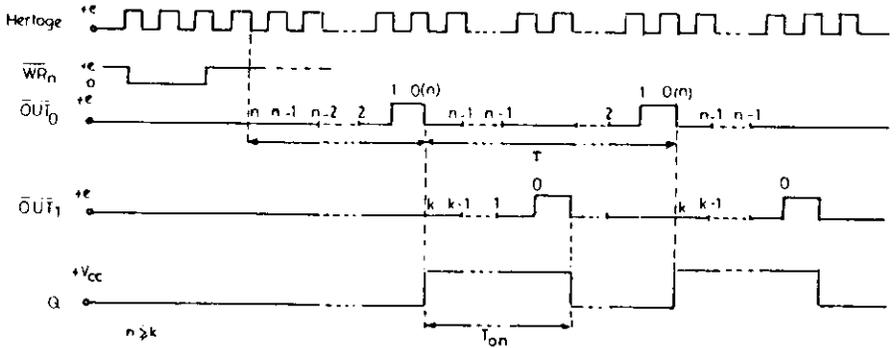


Figure 6 Chronogramme du modulateur numérique

## APPLICATION

Dans l'exemple qu'on donne par la suite, on voulait charger une batterie au moyen d'un convertisseur abaisseur. La source est un panneau solaire (générateur photovoltaïque) ayant une caractéristique puissance ( $P_p$ ) et tension ( $V_p$ ) comme le montre la figure 7.

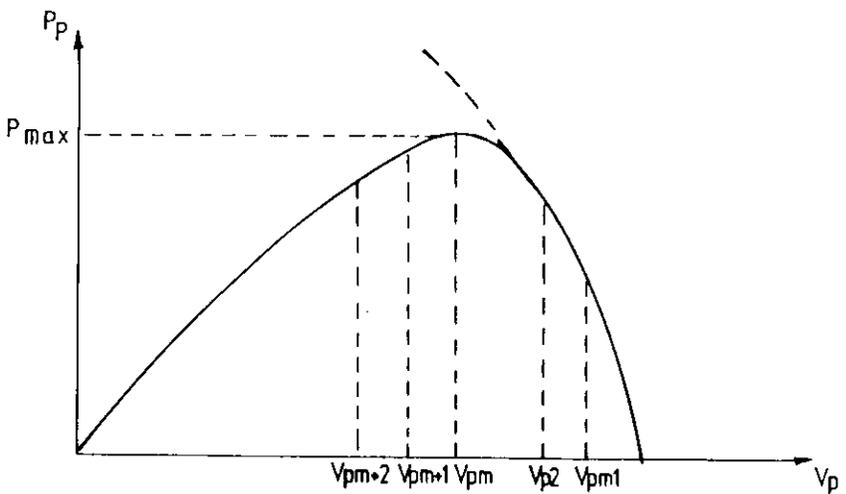


Figure 7 Caractéristique  $P_p(V_p)$  du Générateur photovoltaïque

Etant donne la tension de batterie est constante, on ne peut commander le courant de charge par une boucle en courant. D'autre part si l'ensoleillement est suffisant la batterie doit être chargée à la puissance maximale disponible. Dont le convertisseur joue le rôle d'un 'adaptateur d'impédance'. Pour extraire la puissance maximum du panneau il faut commander la consigne en courant. Dans le paragraphe qui suit nous allons analyser le mode de fonctionnement local et globale qui joue un rôle important dans le transfert d'énergie de Panneau Solaire à la batterie.

**L'analyse de Fonctionnement en Boucle locale.**

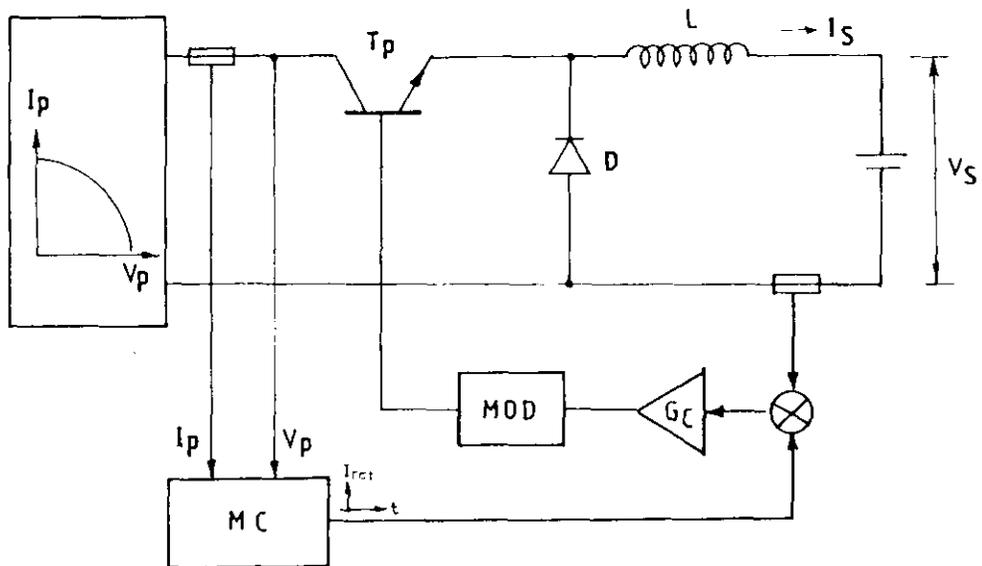


Figure 8 Fonctionnement en Boucle locale

Le premier pas d'incrémentation du courant panneau dans la méthode de recherche du point de puissance maximum (MPPT) est fixé par  $I_{ref1}$ . Il correspond à :

$$V_s \cdot I_{s1} = P_{s1} \tag{1}$$

et, en négligeant les pertes,

$$P_{p1} = P_{s1} \tag{2}$$

le MPPT incrémente ensuite ce courant  $I_{ref}$  qui croît régulièrement et par bonds de telle sorte que

$$I_{ref}(n+1) > I_{ref}(n) \dots > I_{ref1} \tag{3}$$

bien entendu il s'ensuit que

$$I_{s(n+1)} > I_{s(n)} \cdots > I_{s1} \quad (4)$$

ainsi

$$P_{s(n+1)} > P_{s(n)} \cdots > P_{s1} \quad (5)$$

si le point  $P_p$  maximum correspond au  $n^{ieme}$  incrément on a

$$P_{pm} > P_{p(m-1)} \cdots > P_{p1} \quad (6)$$

et

$$P_{pm} > P_{p(m+1)} \cdots P_{p(m+k)} \quad (7)$$

alors l'équation (4.5) n'est que vrai pour

$$P_{s(n+1)} = P_{p(n+1)} > P_{pmaxi} \quad (8)$$

à la puissance maximale on peut écrire

$$P_{sm} = P_{pm} \quad (9)$$

$$I_{sm} = \frac{P_{pm}}{V_s} \quad (10)$$

Le courant de sortie e donc sa valeur maximale lorsque la puissance disponible sur le panneau solaire est maximale.

Si  $I_{ref}$  continu de croître de telle sorte que

$$I_{s(m+1)} > I_{sm} \quad (11)$$

On demande au panneau de fournir

$$P_{p(m+1)} > P_{maxi} \quad (12)$$

Ceci n'est pas possible car d'après l'expression (7) nous sommes dans la situation où la puissance demandée est plus grande que la puissance disponible, qui entraînera l'augmentation de courant panneau ( $I_p$ ) afin de satisfaire l'expression (12). Bien entendu il ne se trouve aucun couple de valeur  $I_p$  et  $V_p$  satisfasse cette condition et il apparaît un effet cumulatif sur le courant  $I_p$  qui *produit une instabilité* structurelle de la boucle par glissement des points de fonctionnement vers le points de court circuit du panneau. Pour éviter cela on peut proposer la solution suivante : il suffit de fixer un seuil minimum de tension  $V_p$ . Ainsi quelque soit l'ensoleillement, la recherche du MPPT se termine sur cette valeur de la tension panne<sup>(2)</sup>. Ceci nous impose d'avoir un test de tension panneau à chaque période d'échantillonnage de  $V_p$ ,  $I_p$  et à chaque appel de

programme MPPT Cette période ne peut pas être très grande sinon le microcalculateur n'a pas le temps de sauvegarder la stabilité de fonctionnement.

Il faut donc effectuer, à chaque instant d'horloge temps réel acquisition de  $V_p$ ,  $I_p$  et la recherche du MPPT ainsi que le test de tension panneau minimum. <sup>(4)</sup> $P$ .

Naturellement cette procédure limite un peu les performances du MPPPT.

**L'analyse de fonctionnement en boucle globale**

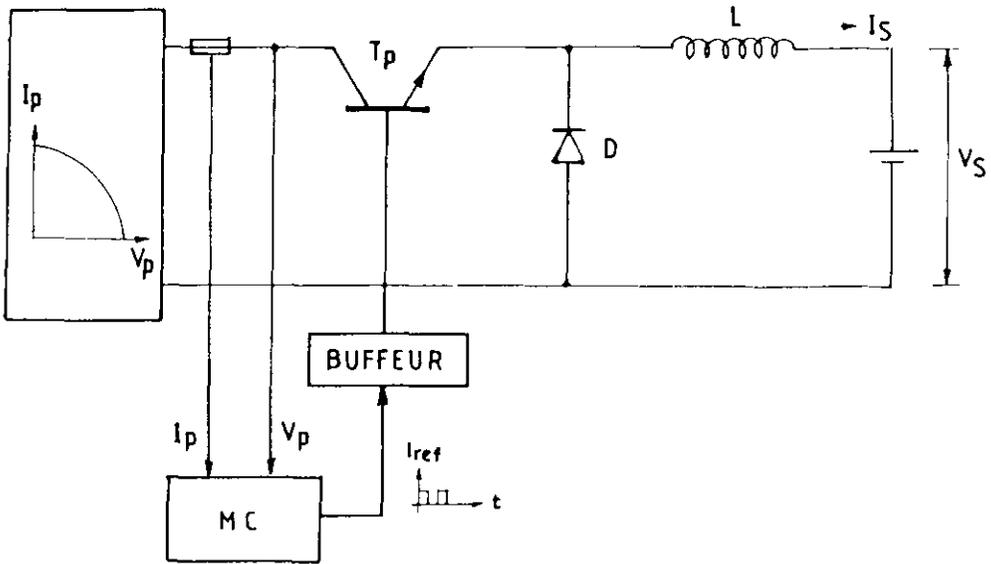


Figure 9 Fonctionnement en boucle globale

En boucle locale le microcalculateur fournit pour consigne une tension continu qui est l'image de  $I_{ref}$ . En boucle globale ce n'est plus le cas, puisque le microcalculateur fixe directement le signal de commande du composant interrupteur. Comme dans le cas précédent on suppose la tension de  $V_s$  constante.

En négligeant la perte comme précédent on peut aussi écrire :

$$V_s \cdot I_{s1} = V_{p1} \cdot I_{p1} \tag{13}$$

donc

$$P_{s1} = P_{p1} \quad \text{et} \quad T_{on1} = \frac{V_s}{V_{p1}} \cdot T \tag{14}$$

Initialement on a :  $0 < T_{on1} \ll T$

Comme  $V_s$  et  $T$  sont constants, quand  $T_{on}$  croit,  $V_p$  ne peut que de croître. En

conséquence si  $V_p$  diminue, sur la caractéristique  $P_p(V_p)$  on va se rapprocher à la puissance maximale.

Supposons que  $T_{on2} > T_{on1}$

alors  $V_{p2} > V_{p1}$

et  $T_{on(n)} > T_{on(n-1)} \dots > T_{on2} > T_{on1}$  (15)

tant qu'on n'atteint pas la valeur maximale de puissance panneau

$$P_{sm} > P_{s(m-1)} \dots > P_{sn} > P_{s(n-1)} \dots > P_{s2} > P_{s1} \quad (16)$$

d'où  $P_{sm}$  = puissance maximale fournie à la charge.

Par ailleurs, sur la caractéristique  $P_p(V_p)$  on s'aperçoit qu'il existe deux  $T_{on}$  différents pour la même puissance et que  $T_{on}$  est unique au point de puissance maximum, autrement dit :

Pour  $T_{onx} \neq T_{ony}$  si  $V_{px} > V_{py}$   
 $I_{px} < I_{py}$

Il existe  $V_{px} \cdot I_{px} = V_{py} \cdot I_{py}$  et  $T_{onx} < T_{ony}$

quand  $T$  atteint la valeur de la puissance maximale

$$T_{onm} = \frac{V_s}{V_{pm}} \cdot T \quad (17)$$

alors  $V_s \cdot I_{sm} = V_{pm} \cdot I_{pm} = P_{pmax}$

$$I_{sm} = \frac{P_{pmax}}{V_s} \quad (18)$$

l'équation (18) est identique à (10) donc  $I_{sm}$  est le courant maximum de sortie. Dans la méthode de recherche de MPPT utilisée,  $T_{on}$  va croître de nouveau (il sera plus grand que  $T_{onm}$ ), d'après l'expression 4.17  $V_p$  doit décroître et dépasse le point de la puissance maximale.

donc  $V_{p(m+1)} < V_{pm}$

$$T_{on(m+1)} = \frac{V_s}{V_{p(m+1)}} \cdot T \quad (19)$$

$$P_{p(m+1)} < P_{pm} \quad (20)$$

les équation (18) et (20) montrent que, après avoir dépassé la puissance maximale,  $I_s$  diminue. On peut dire que la commande par  $T_{on}$  n'entraîne pas de *destabilisation*. Dans l'algorithme de MPPT utilisé, lorsque le MPPT est atteint,  $T_{on}$  varie autour de  $T_{onm}$ .<sup>(4)</sup>, nous avons donc un fonctionnement stable.

**Resultat experimentals**

Nous avons constaté qu'avec une boucle analogique d'où le courant de référence est commandé en croissant de façon à atteindre le point de puissance maximum, il se produit une instabilité, lorsque la valeur de courant de référence qui correspond de façon linéaire avec la puissance de charge ( $P_{ch} = V_B I$ ) dépasse la puissance maximum disponible sur le panneau (c.f. figure 8). Par contre le bouclage indirect (boucle globale) par le courant panneau comme la montre sur la figure 10 (circuit détaillé) ne produit pas d'instabilité, car c'est le  $T_{on}$  fixe et à chaque  $T_{on}$  correspond un point stable de  $(V_p, I_p)$  sur la caractéristique du panneau.

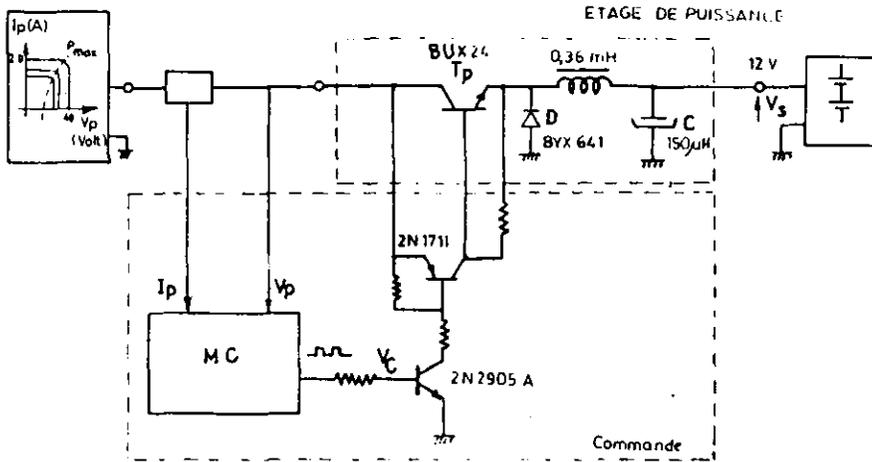


Figure 10 Circuit détaillé en boucle globale

Les Figures 11a et 11b montrent la tension aux bornes de la diode et la tension de commande  $V_c$  en conduction continue et discontinue: Figures 12a et 12b montrent l'évolution de courant panneaux suivant le temps et l'ensoleillement, on voit que  $I_p$  (ou  $V_p$ ) varie autour de puissance maximum.

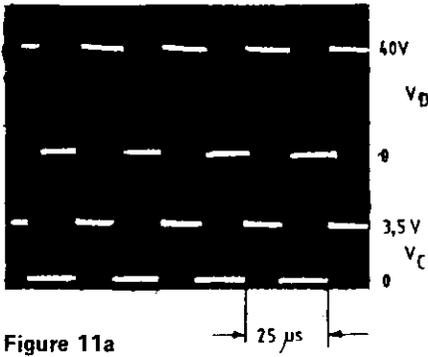


Figure 11a

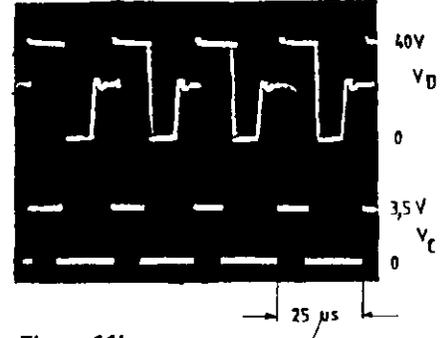


Figure 11b

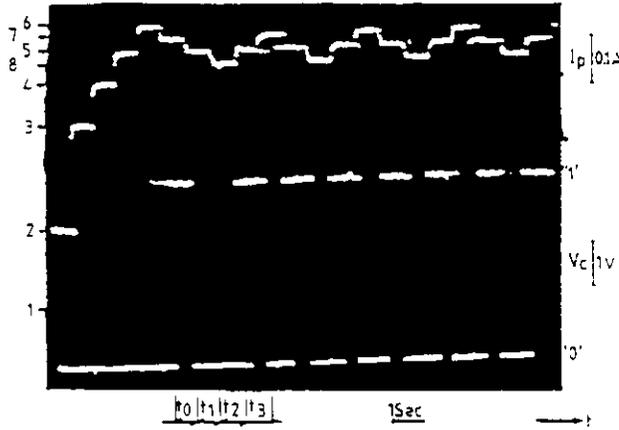


Figure 12a Evolution du courant panneau et de la tension de commande

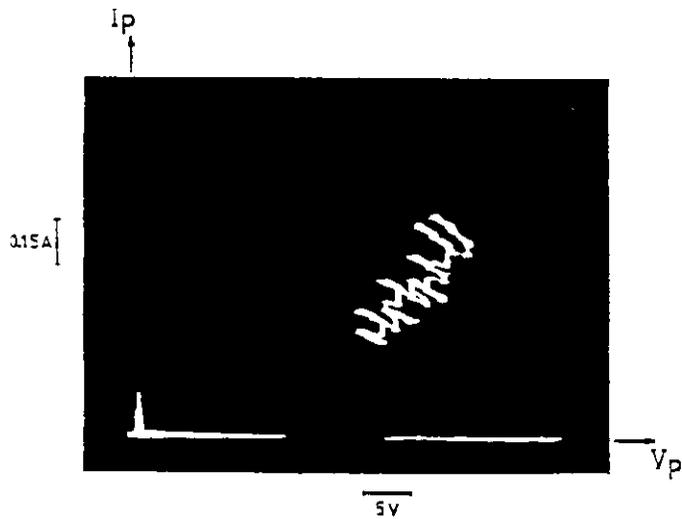


Figure 12b Recherche de puissance maximum

## CONCLUSION

La réponse temporelle de ce système est limitée par le temps de calcul du microcalculateur : on peut dire que si la fréquence de découpage est de l'ordre de 20 kHz la régulation est assez fine, on peut atteindre un maximum une fréquence de découpage de 40 kHz. C'est en fait la limite, car l'horloge de base du microcalculateur a une période de 0,33  $\mu$ s (3 MHz).

L'emploi de ce modulateur est très souple car suivant que l'on joue sur le contenu du compteur 0 ou compteur 1 on peut obtenir un modulateur PWM Numérique à fréquence fixe ou variable.

## BIBLIOGRAPHIE :

1. J. C. Marpinard, Contribution à l'étude des systèmes non linéaires à structure linéaires par morceaux, 1976, Application à l'étude par un modèle de type continu-continu, Thèse de Doctorat d'Etat Toulouse 7 Mai 1976
2. Contract CEE No. 468 78.4. ESF, 1979, Conditionnement de puissance dans une centrale photovoltaïque à concentration de 1 kW, Publication LAAS No. 79.I.04 Toulouse, Janvier 1979.
3. Intel 85, 1980, Users manuels.
4. Haroen, Y., 1983, Conditionnement de puissance d'un système autonome géré par microprocesseur. Recherche du point de puissance maximum d'un générateur photovoltaïque, Thèse de Docteur Ingénieur INPT Toulouse 17 Juin 1983
5. Robin-Jouan, Y., 1974, Conversion optimale d'énergie. Etude d'un système MPPPT, Space craft power conditioning electronic seminaire, Fracasti, ITALIE, 20 Mai 1974.
6. Prajoux, R. & J. Mazankine, 1976, Simulation mathématique des systèmes des conditionnements de puissance, Contrat ESTEC n° 2299/74 AK, Rapport final Tome 4. Publication LAAS n° 1453, Toulouse 20 juillet 1976
7. Landsman, E. E., 1978, Maximum power trackers for photovoltaic arrays IEEE, Power Electronics Specialist Conference 1978.