

N 82-20655

Note technique du CNES N°85

Octobre 1973

Titre (Title) : COMPORTEMENT ÉLECTRIQUE DYNAMIQUE DE CELLULES SOLAIRES

Auteur (Author) : Jean-Pierre CATANI
Auteur (Author) :

TM-76686

Edition dans périodique externe au CNES : non

**Mots clé (Key words) : SOLAR CELLS, SOLAR GENERATORS
MATHEMATICAL MODELS
DYNAMIC RESPONSE
MEASUREMENT AND INTEGRATION
SIMULATION
CENTRE NATIONAL D'ÉTUDES SPATIALES
FRANCE**

La compréhension du comportement dynamique d'un générateur solaire est de première importance, tant pour l'étude et la conception des équipements de conditionnement de puissance, que pour l'analyse de la compatibilité électromagnétique.

Un modèle mathématique de photopiles a été développé à partir de mesures d'impédances effectuées dans différentes conditions de températures, de charge et d'éclairement, avant et après irradiation.

On a comparé ce modèle à celui déduit de la théorie de la jonction PN et de mesures statiques.

Ces mesures dynamiques ont permis la mise au point d'une méthode d'intégration permettant d'obtenir, en ambiance normale de laboratoire, le comportement dynamique du générateur sous éclairement normal.

Understanding of the dynamic response of a solar generator is of prime importance for both the design of power conditioning equipment and for electromagnetic compatibility analysis.

A mathematical model of solar cells was developed from impedance measurements, performed under various conditions of temperature, loading factor or illumination, before and after electron irradiation.

This model was compared with that derived from the PN junction theory associated with static measurements.

An integration method was developed to simulate the dynamic response of a nominally illuminated solar generator under ambient ground conditions.

II. RESUME

La compréhension du comportement dynamique d'un générateur solaire est de première importance, tant pour l'étude et la conception des équipements de conditionnement de puissance, que pour l'analyse de la compatibilité électromagnétique.

Des mesures d'impédance, d'abord de cellules solaires puis d'un panneau solaire, ont été effectuées dans différentes conditions de température, de charge et d'éclairement, avant et après irradiation.

Ces mesures ont permis de développer un modèle de cellule solaire ou de générateur complet à utiliser dans une simulation par ordinateur du système d'alimentation.

On a comparé les grandeurs électriques du schéma équivalent ainsi obtenu par mesure directe en régime sinusoïdal à celles dérivées des caractéristiques statiques par la théorie de la jonction PN. Un bon accord des résultats permet de déterminer le comportement dynamique à partir des relevés habituels $i = 0$ (V) et d'éviter des mesures spéciales en HF.

En mesurant l'impédance des cellules solaires amenées au point de fonctionnement voulu, non plus par l'éclairement, mais par une polarisation dans le sens direct à l'aide d'une source de tension auxiliaire, on a développé une méthode d'intégration qui permet, en éclairage normal de laboratoire, d'obtenir du générateur solaire le comportement dynamique sous éclairage nominal. Un essai de compatibilité électromagnétique du satellite intégré ou une recette du sous-système d'alimentation complet peuvent alors être entreprises sans nécessité d'un essai en ambiance spatiale (vide - soleil).

III. APPROCHE QUALITATIVE

L'impédance d'une cellule solaire en courant alternatif est un paramètre qui intéresse peu les fabricants de semi-conducteurs ou les constructeurs de générateurs solaires. Aussi, l'utilisateur ne peut jamais s'appuyer sur des spécifications concernant les grandeurs définissant l'impédance et rarement sur des mesures. Pourtant, il existe deux domaines où la connaissance du comportement dynamique du générateur solaire est de première importance lors de la conception ou lors du développement.

Il s'agit d'une part, du contrôle de la compatibilité électromagnétique, d'autre part de la réalisation du système d'alimentation

En simplifiant à l'extrême pour fixer les idées, le générateur solaire a pour schéma équivalent en régime dynamique une capacité en parallèle sur une résistance, le tout en série avec une autre résistance et avec l'inductance du câblage (figure 1)

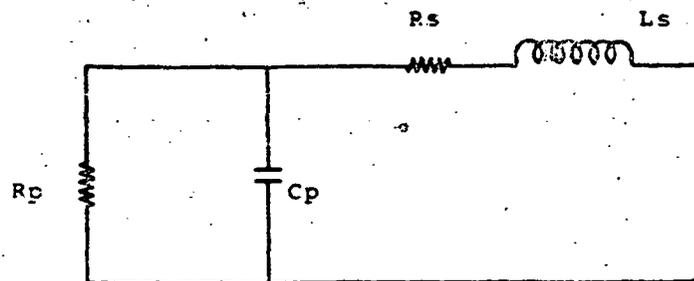


Figure 1 : SCHEMA EQUIVALENT DYNAMIQUE
TRES SIMPLIFIE D'UN GENERATEUR/SOLAIRE

L'ordre de grandeur des composants est tel que le module de l'impédance en fonction de la fréquence aura toujours l'allure présentée figure 2.

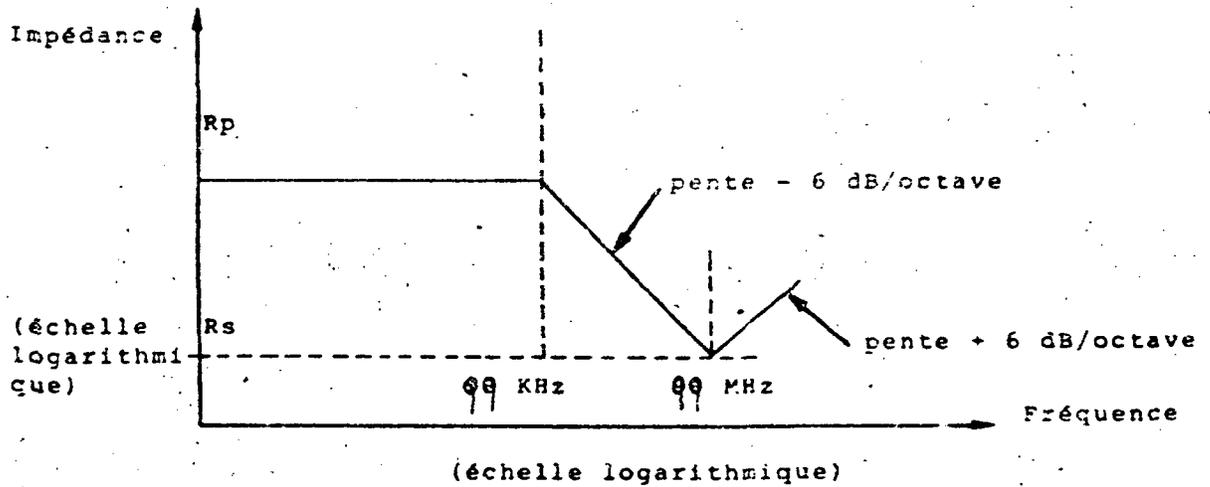


Figure 2 : IMPEDANCE D'UN GENERATEUR SOLAIRE

Dans une gamme de fréquences allant de quelques kilohertz, parfois moins, jusqu'à quelques mégahertz, le générateur solaire est essentiellement capacitif, la présence des 2 résistances, série et parallèle peut être négligée : la résistance R_p parce qu'elle est beaucoup plus grande que l'impédance présentée par la capacité, et la résistance R_s parce qu'elle est beaucoup plus faible. Le générateur solaire s'identifie alors à une pure capacité dont on peut deviner les effets :

- placée en charge sur la ligne primaire d'alimentation elle peut induire une instabilité de la boucle de régulation du système de conditionnement de puissance ;
- le câblage aboutissant au générateur solaire produira une résonance de courant par interaction entre sa composante inductive et la capacité des cellules solaires et donc un accroissement de perturbations électromagnétiques dont la fréquence est voisine de la résonance.

Ces deux phénomènes sont aisés à corriger dès lors qu'ils ont été correctement indentifiés : soit par la connaissance d'un schéma équivalent (avec les valeurs numériques) qui permettra d'effectuer une simulation informatique, soit par la possibilité d'effectuer sans difficulté des essais en conditions nominales du système intégré.

Les études théorique et expérimentale présentées dans cette note ont été menées avec l'objectif de résoudre ces deux problèmes d'une manière pratique.

IV. ETUDE THEORIQUE

- Cellule Solaire -

L'utilisation qui sera faite des résultats de cette étude, que ce soit pour la conception d'un équipement de conditionnement de puissance ou pour l'analyse de perturbations électromagnétiques se satisfera d'un circuit équivalent simplifié de la cellule solaire.

On se limitera au schéma à 1 diode représenté figure 3.

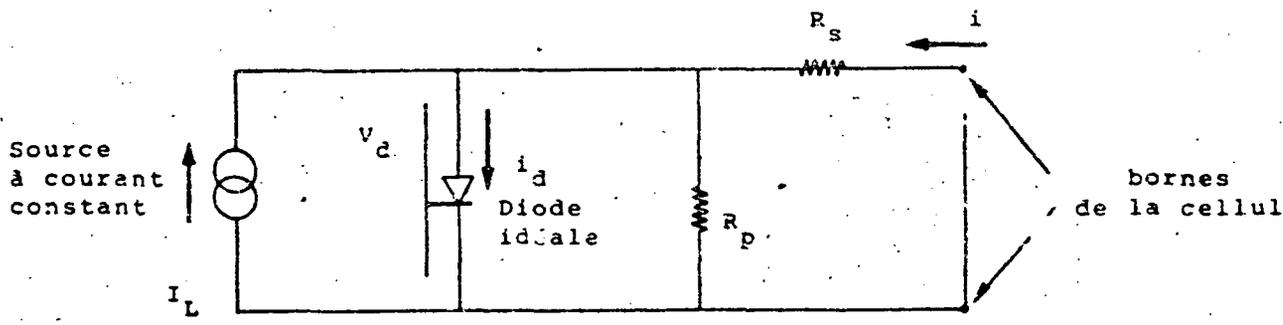


Figure 3 : SCHEMA EQUIVALENT E LA CELLULE SOLAIRE

Ce schéma est valable en courant continu ou en courant alternatif. Donnons une interprétation physique de chaque composant du circuit équivalent.

1 - Rs Résistance série

Elle est inférieure à 1Ω et inclut la résistance ohmique des contacts ainsi que la résistance ohmique des régions n et p de la cellule.

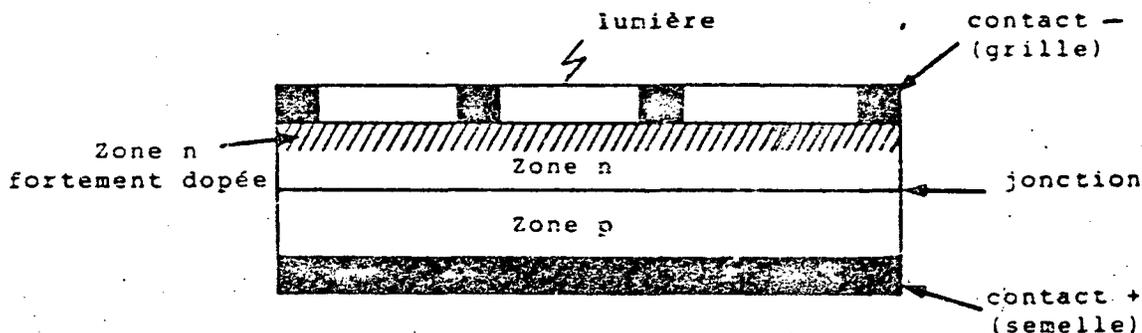


Figure 4 : VUE EN COUPE DE LA CELLULE

2 - Rp Résistance parallèle

Elle est très différente d'une cellule à l'autre, même lorsque ces cellules proviennent du même lot de fabrication. Sa valeur va de quelques centaines d'ohms à quelques dizaines de kilohms.

Cette résistance de fuite est créée au moment de la pose des contacts métalliques sur le semi-conducteur, des particules de métal transpercent la jonction de manière aléatoire en plus ou moins grand nombre, et permettent ainsi à un courant de fuite de s'établir.

3 - Diode idéale (courant continu)

En régime permanent la diode idéale se définit par une relation courant - tension dérivée de la théorie de la jonction pn

$$(1) \quad i_d = I_s \left[\exp\left(\frac{qV_d}{kT}\right) - 1 \right]$$

i_d = courant de diffusion traversant la diode

V_d = tension aux bornes de la diode

I_s = courant de "saturation" (= courant indépendant de la tension qui traverse la diode fortement polarisée en sens inverse)

T = température absolue

q = $1,6 \cdot 10^{-19}$ coulomb

k = $1,38 \cdot 10^{-23}$ J/°K

En réalité, le courant de saturation inverse mesuré est plus élevé que celui qui serait déduit de l'expression (1), aussi on introduit un coefficient A au dénominateur de l'exponentielle pour retrouver les valeurs expérimentales.

$$(2) \quad i_d = I_s \left[\exp \left(\frac{qV_d}{AkT} \right) - 1 \right]$$

A est un coefficient déterminé empiriquement généralement compris entre 1 et 2.

La diode idéale sera définie par les facteurs I_s et A.

Le courant de saturation I_s peut être calculé théoriquement par l'analyse du comportement des porteurs de charges dans le semi-conducteur. On ne donnera ici que le résultat :

$$(3) \quad I_s = Sq \left[\frac{D_n}{L_n} N_{op} + \frac{D_p}{L_p} P_{on} \right]$$

I_s = courant de saturation

S = surface de la jonction

q = $1,6 \cdot 10^{-19}$ coulomb

D_n = coefficient de diffusion des électrons

D_p = coefficient de diffusion des trous

L_n = longueur de diffusion des électrons

L_p = longueur de diffusion des trous

N_{op} = concentration de porteurs minoritaires (électrons) en zone P

P_{on} = concentration de porteurs minoritaires (trous) en zone N

Dans le cas des cellules solaires N/P que nous utiliserons, le courant est principalement dû aux électrons. On pourra simplifier l'expression (3).

$$(4) \quad I_g = \frac{S_0 D_n N_{cp}}{L_n}$$

En pratique, A et I_g seront tous deux déterminés par les mesures. On a écrit l'expression (4) pour préparer l'analyse en régime dynamique.

4 - Diode idéale (courant alternatif)

Le comportement de la diode idéale en régime sinusoïdal est lié à deux phénomènes distincts, l'un ou l'autre prédominant selon la tension de polarisation.

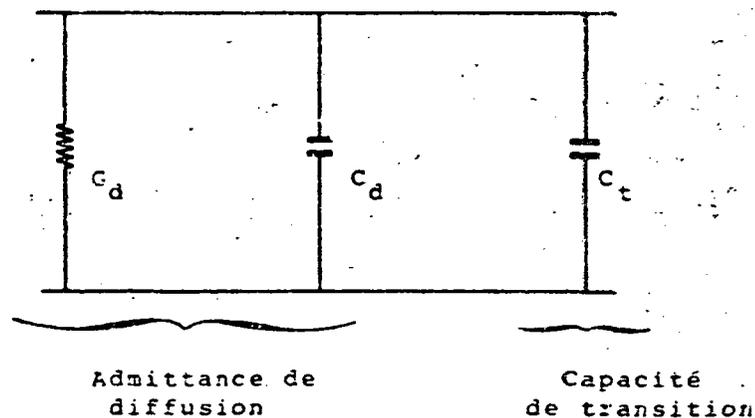


Figure 5 : CIRCUIT EQUIVALENT A LA DIODE IDEALE EN REGIME DYNAMIQUE

4.1 Admittance de diffusion

On a vu, dans ce qui précède, la relation entre le courant I_d et la tension V_d (expression (2)), de la diode idéale. Elle s'écrit, en tenant compte de (4) :

$$(5) \quad I_d = \frac{sqD_n N_{op}}{L_n} \left[\exp\left(\frac{qV_d}{AkT}\right) - 1 \right]$$

Si le semi-conducteur est excité par un signal alternatif, le point de fonctionnement se déplace autour d'un point moyen I_{do} , V_{do} . Les coordonnées de ce déplacement sont :

$$(6) \quad \begin{cases} I_d = I_{do} + R_e \mathcal{I}_d e^{j\omega t} \\ V_d = V_{do} + R_e \mathcal{V}_d e^{j\omega t} \end{cases} \quad [R_e = \text{partie réelle}]$$

L'admittance (complexe) de diffusion est :

$$(7) \quad Y_d = \frac{\mathcal{I}_d}{\mathcal{V}_d}$$

c'est-à-dire le rapport des amplitudes (complexes) du courant et de la tension.

On porte les valeurs de courant et de tension définies en (6) dans l'expression (5).

On remarquera que, si \mathcal{V}_d est petit devant V_{do} :

$$(8) \quad \exp\left(\frac{qV_d}{AkT}\right) = \left[1 + \frac{q}{AkT} R_e \mathcal{V}_d e^{j\omega t} \right] \exp\left(\frac{qV_{do}}{AkT}\right)$$

d'où l'on déduit, après reports dans (5)

$$(9) \quad I_d = \frac{sqD_n N_{op}}{L_n} \frac{q}{AkT} \exp\left(\frac{qV_{do}}{AkT}\right) \mathcal{V}_d$$

Mais comme le semi-conducteur est excité par un signal alternatif, il faut remplacer dans l'expression (5) la longueur de diffusion L_n par la longueur de diffusion complexe L_n^* définie par :

$$(10) \quad \frac{1}{L_n^{*2}} = \frac{1 + j\omega\tau_n}{L_n^2}$$

où τ_n est la durée de vie d'un électron (= temps moyen séparant la génération et la recombinaison d'un électron en zone p, temps pendant lequel il a effectué un trajet dont la longueur moyenne est L_n).

On peut alors expliciter complètement l'admittance de diffusion.

$$(11) \quad Y_d = \frac{SqD_n N_{op}}{L_n} \sqrt{1 + j\omega\tau_n} \cdot \frac{q}{AkT} \exp\left(\frac{qV_{do}}{AkT}\right)$$

ou, en reprenant l'expression du courant de saturation :

$$(12) \quad Y_d = \frac{qI_s}{AkT} \sqrt{1 + j\omega\tau_n} \exp\left(\frac{qV_{do}}{AkT}\right)$$

En régime statique la diode était entièrement définie par 2 paramètres (I_s et A), ici on notera qu'il apparaît un paramètre supplémentaire, la durée de vie τ_n de l'électron, dont la valeur mal connue en pratique est de l'ordre de $10\mu s$ pour le silicium.

L'admittance de diffusion présente une partie réelle (conductance) et une partie imaginaire (capacitive) que l'on va développer .

On va effectuer l'approximation suivante qui sera validée par les mesures

$$(13) \quad \sqrt{1 + j\omega\tau_n} = 1 + \frac{j\omega\tau_n}{2}$$

On déduit alors immédiatement de (12) .

Conductance de diffusion

$$(14) \quad G_d = \frac{qI_s}{AkT} \exp\left(\frac{qV_{d0}}{AkT}\right)$$

Capacité de diffusion

$$(15) \quad C_d = \frac{q r_n I_s}{2 AkT} \exp\left(\frac{qV_{d0}}{AkT}\right)$$

On remarque que la conductance de diffusion n'est autre que la pente de la caractéristique statique de la diode idéale au point de polarisation V_{d0} .

Aussi bien la conductance que la capacité sont proportionnelles au courant de diffusion I_{d0} dès que la tension de polarisation directe prend une valeur suffisante, c'est-à-dire, dès que l'on peut négliger 1 devant l'exponentielle

$$\frac{kT}{q} = 26 \text{ mV à la température ambiante.}$$

4.2 Capacité de transition

Tous les résultats qui précèdent sont issus d'une théorie simplifiée qui néglige l'existence de la charge d'espace, et en particulier la variation de sa largeur avec la tension appliquée. En fait, cette modulation de l'épaisseur de la charge d'espace introduit un effet capacitif qui devient prépondérant en polarisation inverse ou en polarisation directe faible lorsque l'admittance de diffusion tend vers 0.

Cette capacité traduit la variation de la charge électrique existant dans chaque région de la charge d'espace sous l'influence des variations de tension, elle vaut

$$(16) \quad C_t = S \sqrt{\frac{\epsilon}{2} \frac{1}{\frac{1}{qN_A} + \frac{1}{qN_D}}} \cdot \frac{1}{\sqrt{\phi - v_d}}$$

- S = surface de la jonction
- ε = permittivité diélectrique (ε = 8,84 10⁻¹²)
- q = 1,6 10⁻¹⁹ coulomb
- N_A = concentration d'accepteurs (en zone P)
- N_D = concentration de donneurs (en zone n)
- φ = hauteur de la barrière de potentiel (φ = 0,9 volts)

En général, ni N_A, ni N_D ne sont connus de l'utilisateur ; s'il n'est pas possible de faire une mesure de capacité, on pourra utiliser la relation :

$$(17) \quad C_t = \frac{16}{\sqrt{0,9 - v_d}} \quad (\text{nF/cm}^2)$$

5 - I_L Source à courant constant

Le dernier composant du circuit équivalent à la cellule solaire dont le schéma apparaît figure 3 est la source de courant constant qui résulte de la création de paires électron-trou et du transport de ces électrons excités dans la bande de conduction au travers de la barrière de potentiel. Il importe peu de connaître la source d'énergie sous réserve qu'elle ne dégrade pas la jonction, ce peut être une source de photons ou une source de particules à haute énergie.

Dans l'analyse du comportement dynamique de la cellule solaire on pourrait ne pas représenter cette source à courant constant sur un schéma équivalent. Elle intervient toutefois de manière indirecte en participant à la détermination du point de fonctionnement et comme on l'a vu le point de fonctionnement moyen définit les valeurs numériques des composantes du circuit équivalent.

$$(18) \quad i_{do} = I_s \left[\exp \left(\frac{qV_{do}}{AkT} \right) - 1 \right] - I_L$$

i_{do} }
 V_{do} } Coordonnées du point de fonctionnement moyen de la diode idéale

I_L courant de lumière (source à courant constant).

6 - Remplacement de la source de lumière par une polarisation

Puisque c'est la tension de fonctionnement de la cellule qui fixe la valeur de son impédance et non la source à courant constant, on obtiendra une même mesure d'impédance en remplaçant la source interne (création des paires électrons-trous sous l'effet des photons) par une source externe de polarisation en sens direct qui amène la cellule à la même tension.

On trouvera figure 6, la condition que doit remplir cette source auxiliaire pour qu'une cellule polarisée dans l'obscurité ait un comportement dynamique identique (c'est-à-dire, une même ten-

sion moyenne) que si elle était éclairée.

La condition s'écrit :

$$(19) \quad V_p - V_e = R_s I_L$$

V_p = tension de polarisation appliquée aux bornes de la cellule

V_e = tension mesurée aux bornes de la cellule éclairée

R_s = résistance série de la cellule

I_L = courant de lumière (à peu près égal au courant de court-circuit)

Cette propriété n'est pas intuitive et sera utile.

Il n'était pas évident a priori, que l'impédance de la cellule soit fixée par la tension et non par le courant qui la traverse.

L'admittance de diffusion et la capacité de transition ont des valeurs liées à la tension aux bornes de la diode, ou, ce qui revient au même, au courant de diffusion de la diode, mais pas au courant débité par la cellule qui vaut le courant de lumière diminué du courant de diffusion.

On disposera ainsi d'une méthode pratique pour amener l'impédance d'une cellule solaire à sa valeur nominale indépendamment des conditions d'éclairement ambiant. Il ne sera donc pas nécessaire de disposer d'un soleil artificiel pour contrôler le fonctionnement du système intégré.

7 - Illustration - Application numérique

On va mesurer ce qui précède par une application numérique valable pour l'une des cellules solaires mesurées. Les caractéristiques de cette cellule sont les suivantes :

sion moyenne) que si elle était éclairée.

La condition s'écrit :

$$(19) \quad V_p - V_e = R_s I_L$$

V_p = tension de polarisation appliquée aux bornes de la cellule

V_e = tension mesurée aux bornes de la cellule éclairée

R_s = résistance série de la cellule

I_L = courant de lumière (à peu près égal au courant de court-circuit)

Cette propriété n'est pas intuitive et sera utile.

Il n'était pas évident a priori, que l'impédance de la cellule soit fixée par la tension et non par le courant qui la traverse.

L'admittance de diffusion et la capacité de transition ont des valeurs liées à la tension aux bornes de la diode, ou, ce qui revient au même, au courant de diffusion de la diode, mais pas au courant débité par la cellule qui vaut le courant de lumière diminué du courant de diffusion.

On disposera ainsi d'une méthode pratique pour amener l'impédance d'une cellule solaire à sa valeur nominale indépendamment des conditions d'éclairement ambiant. Il ne sera donc pas nécessaire de disposer d'un soleil artificiel pour contrôler le fonctionnement du système intégré.

7 - Illustration - Application numérique

On va mesurer ce qui précède par une application numérique valable pour l'une des cellules solaires mesurées. Les caractéristiques de cette cellule sont les suivantes :

Fabricant	: AEG
Matériau	: Silicium
Type	: N sur P
Résistivité	: $10 \Omega \times \text{cm}$
Superficie	: 8 cm^2

Cette cellule est repérée par le N°1 dans l'étude expérimentale. Les valeurs qui suivent ont été mesurées avant irradiation aux électrons de la cellule.

$T = 365^\circ\text{K}$

$I_s = 1,89 \mu\text{A}$

$A = 1,02$

$I_L = 0,301 \text{ A}$

$R_s = 0,1 \Omega$

$\tau_n = \text{estimé à } 10 \mu\text{s}$

} Déterminé sur caractéristique statique

Sur la figure 7, on a tracé la caractéristique statique de la cellule sous éclaircement en négligeant la résistance série et la résistance parallèle (i et v de la cellule sont alors confondus respectivement avec le courant et la tension de diffusion).

On a choisi deux points de fonctionnement :

$V_{do} = 100 \text{ mV et } 200 \text{ mV}$

On a tracé le parcours du point de fonctionnement sous excitation sinusoïdale à 10 kHz, 100 kHz et 1 MHz.

A cause des capacités de diffusion et de transition, le point de fonctionnement quitte la caractéristique statique et décrit une ellipse :

V_o, c' point moyen sur la caractéristique statique

V, c' point instantané de fonctionnement de la cellule

i_c courant dans la capacité totale de la cellule (diffusion + transition)

"Page missing from available version"

i_g courant dans la conductance de la cellule
 V_M amplitude de la tension d'excitation sinusoïdale de la cellule.

On calcule les courants dans la capacité et dans la conductance de la cellule :

$$(20) \quad i_c = \frac{Cdv}{dt}$$

$$(21) \quad i_g = G(v-v_0)$$

Or,

$$(22) \quad i = i_c + i_g + i_0$$

Donc,

$$(23) \quad i = \frac{Cdv}{dt} + G(v-v_0) + i_0$$

La tension aux bornes de la cellule est :

$$(24) \quad v = v_0 + V_M \cos \omega t$$

On en déduit i en reportant cette valeur dans (23). Le parcours du point de fonctionnement est défini par :

$$(25) \quad \begin{cases} v = v_0 + V_M \cos \omega t \\ i = i_0 + GV_M \cos \omega t - C\omega V_M \sin \omega t \end{cases}$$

C'est la représentation paramétrique d'une ellipse centrée sur i_0, v_0 .

On conçoit que si le point de fonctionnement instantané de la cellule s'écarte notablement de la caractéristique statique, ceci signifie que les composantes réactives du circuit équivalent à la cellule auront un effet perturbateur sur l'équipement de régulation de la tension d'alimentation.

Sur la figure 7, il apparaît également une autre interprétation du comportement dynamique du générateur solaire, il sera :

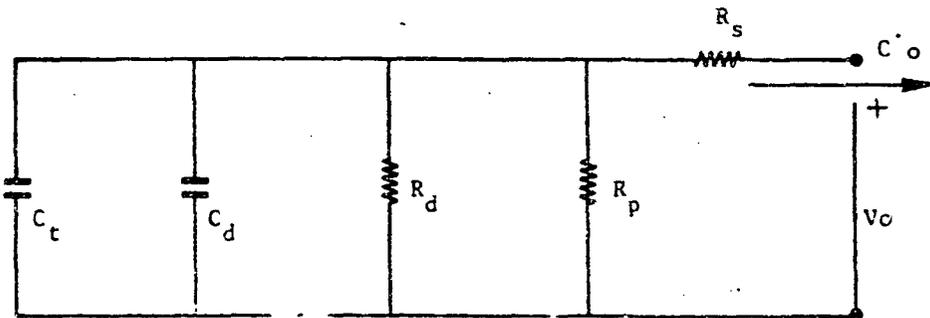
- source de courant aux fréquences basses
- source de tension aux fréquences élevées.

On calcule les composantes du circuit dynamique équivalent à l'aide des expressions (14), (15) et (17) ($T = 365^{\circ}\text{K} = 92^{\circ}\text{C}$) pour donner les ordres de grandeur.

Tension de fonctionnement	100 mV	200 mV
Courant de fonctionnement	301 mA	300 mA
Courant de diffusion	40 μA	0,96 mA
Tension de diffusion	130 mV	230 mV
Résistance de diffusion	290 Ω	13,2 Ω
Capacité de diffusion C_d	17 nF	380 nF
Capacité de transition C_t	143 nF	153 nF

FORMULAIRE RECAPILATIF

Circuit dynamique équivalent
à une cellule solaire au silicium



- T : Température absolue
- Vo : Tension continue aux bornes de la cellule
- io : Courant continu sortant de la cellule.

Capacité de transition (Ct)

$$C_t \text{ (nF/cm}^2\text{)} = \frac{16}{\sqrt{0,9 - V_o}}$$

Capacité de diffusion (Cd)

$$C_d \text{ (}\mu\text{F)} = \frac{58 \cdot 10^3 \text{ } i_s}{AT} \exp. \left[\frac{11590 (V_o + R_s \cdot i_o)}{AT} \right]$$

Is et A déterminés sur la caractéristique statique relevée sous éclairnement.

Résistance de diffusion (Rd)

$$R_d \text{ (}\Omega\text{)} = \frac{5}{C_d \text{ (}\mu\text{F)}}$$

Résistance parallèle (Rp)

A déterminer par mesure directe d'impédance en basse fréquence dans l'obscurité.

Résistance série (Rs)

A déterminer sur la caractéristique statique relevée sous éclairnement.

"Page^s missing from available version"

Pages 22, 23 + 24

3ème simplification

On adopte un schéma équivalent simplifié de la cellule solaire câblée dans son module.

Un générateur solaire est normalement utilisé dans la zone à courant constant de sa caractéristique statique afin de minimiser les pertes par diffusion. Pour une approche simplifiée, on peut admettre que le circuit équivalent à la cellule est constitué uniquement de la capacité de transition et de l'inductance du câblage d'interconnexion de la résistance série et de la résistance parallèle.

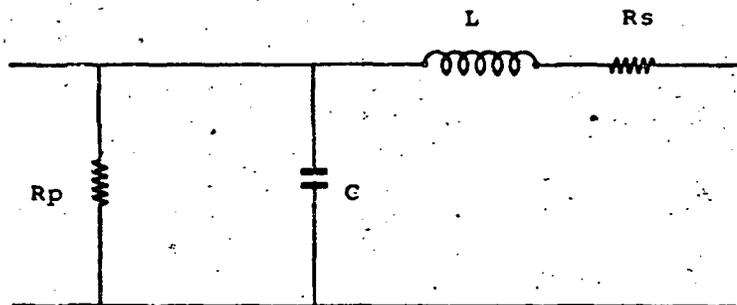


Figure 11' : CIRCUIT SIMPLIFIE D'UNE CELLULE

"Page missing from available version"

2 - Comportement sur perturbations à bande étroite

On dessine le circuit équivalent complet du module de générateur solaire à partir du schéma élémentaire d'une cellule avec les inductances d'interconnexion toutes supposées égales, sauf celles d'attaque du module, plus élevées :

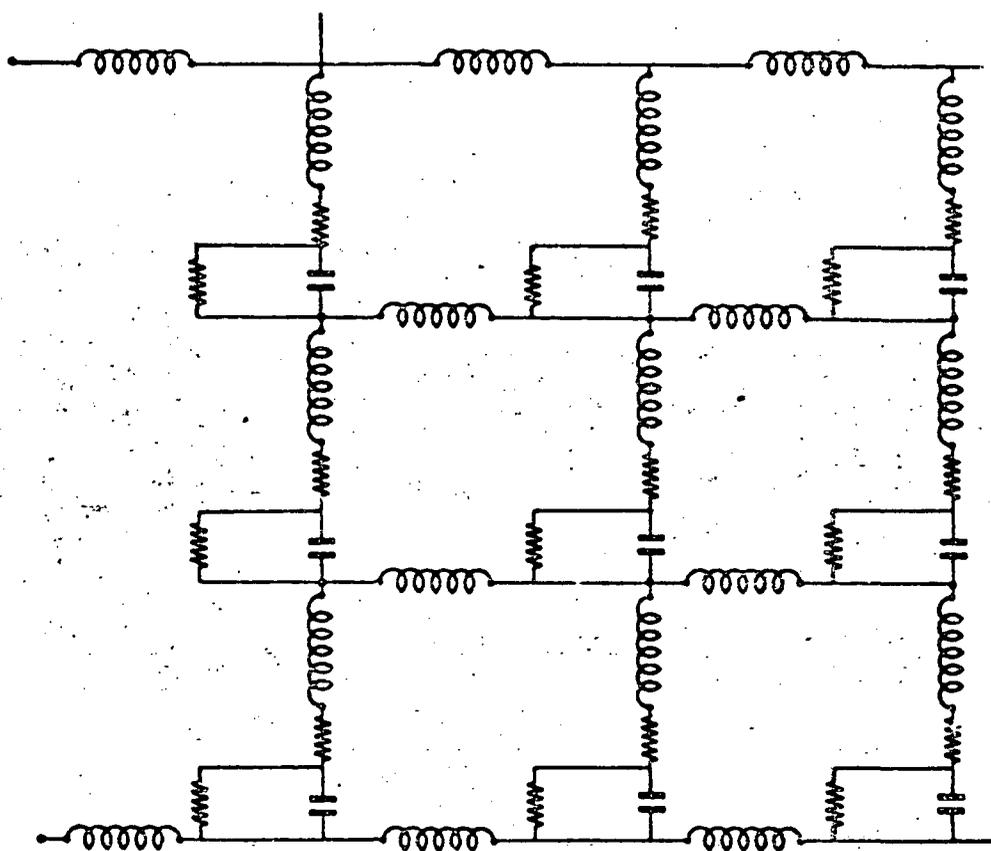


Figure 12 : CIRCUIT EQUIVALENT A 1 MODULE

On trouve en série avec la capacité de la cellule l'inductance de connexion en série et d'une cellule à l'autre l'inductance de connexion parallèle.

Chaque élément série LC d'une cellule a une fréquence de résonance.

$$(28) \quad f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{LC}$$

qui vaut dans l'exemple choisi

$$f = 4,1 \text{ MHz}$$

Cette valeur n'est qu'un ordre de grandeur, mais dans pratiquement tous les cas, elle sera comprise entre 1 et 10 MHz.

Au-dessous de cette limite, chaque circuit LC élément est essentiellement capacitif, le module est l'association série - parallèle de capacités de transition et des résistances parallèle.

Au-dessous de 1MHz, un générateur solaire a le comportement dynamique d'une capacité en parallèle sur une forte résistance.

La valeur de cette capacité est obtenue simplement par les règles d'association

- N_s cellules en série
- N_p cellules en parallèle

$$(29) \quad C_{GS} = \frac{N_p C}{N_s}$$

3 - Comportement sur perturbations à bande large

Les règles qui précèdent sont intéressantes pour l'analyse du comportement dynamique du générateur solaire en régime sinusoïdal.

On peut alors admettre que le générateur est équivalent à une inductance ou à une capacité selon la fréquence, la frontière étant située entre 1 et 10 MHz.

Le spectre des perturbations impulsives que l'on peut observer sur un satellite s'étend normalement de part et d'autre de cette frontière.

On n'ira pas plus loin ici dans l'analyse théorique de la réponse transitoire du générateur solaire, car une connaissance précise des inductances d'interconnexions serait nécessaire. Qualitativement, on peut s'attendre à une propagation de la perturbation le long du générateur solaire sous la forme de charge ou décharge successive des capacités de chaque cellule, puis des réflexions de la perturbation aux extrémités du panneau solaire de la même manière que sur une ligne de transmission désadaptée.

Il serait certainement intéressant de réaliser des mesures de réflectométrie sur générateur solaire complet, afin de caractériser son comportement sous l'effet de perturbations transitoires comme celles que l'on peut trouver sur la ligne primaire d'alimentation du satellite :

- impulsions de découpage d'un régulateur PWM
- modification brutale du régime statique sous l'effet des commutations d'un régulateur shunt digital.

On pourrait également prédire le comportement du générateur solaire à n'importe quelle perturbation en prolongeant la gamme de mesures en régime harmonique jusqu'à 100 MHz par exemple, mais d'après ce qu'on a dit, il faut s'attendre à des oscillations de la courbe d'impédance fonction de la fréquence comme on peut l'observer à l'entrée d'une ligne. La prédiction de la réponse impulsionnelle à partir de ces résultats, serait alors très délicate.

VI. ETUDE EXPERIMENTALE

- Appareillage -

1 - Conditions de mesure

La mesure d'impédance est effectuée sur cellule solaire unique ou sur un générateur solaire :

- en éclairement sous un soleil artificiel sur charge résistive ajustée à la valeur désirée,
- ou dans l'obscurité, la cellule ou le générateur pouvant être polarisé dans le sens direct.

On règle la tension aux bornes de la cellule à la valeur désirée en faisant varier, selon la condition d'éclairément, soit la résistance de charge, soit le courant de polarisation.

Les mesures ont été effectuées à plusieurs températures (- 70°C, 20°C, 90°C). On a essayé de garder la même température en éclairément et dans l'obscurité. Pour éviter des problèmes avec les variations de température, toutes les mesures ont été faites dans le vide.

On a relevé les impédances en fonction de la fréquence de 3 cellules du même type pour mettre en évidence les fluctuations de fabrication. Les trois cellules ont été mesurées avant et après irradiation aux électrons. Chaque cellule ayant subi un niveau d'irradiation différent.

<u>Paramètre</u>	<u>Variation</u>
Fabrication	3 cellules du même type
Irradiation	- avant irradiation - après irradiation : 1 dose différente pour chaque cellule
Température	- 70°C + 20°C + 90°C
Eclairage	- obscurité - niveau d'éclairage de l'espace
Tension	de 0 volt à la tension en circuit ouvert de la cellule éclairée
Fréquence	100 Hz à 1 MHz

2 - Contraintes de mesure

Des contraintes sur les conditions de mesure, on déduit les grandes spécifications de l'appareillage et on entrevoit les limitations que l'on doit subir.

2.1 Gamme de fréquence

La cellule solaire est en première approximation une capacité, la limite supérieure en fréquence apparait à la résonance entre la capacité de la cellule et l'inductance du câble qui sépare la cellule du point de mesure.

Dans le montage utilisé, en raison de la cuve à vide, il a été difficile d'avoir moins d'1 m de liaison ce qui a limité la validité des mesures à 1 MHz, alors qu'elles ont été effectuées

jusqu'à 10 MHz. Entre 1 et 10 MHz, on a donc mesuré l'inductance du câblage.

On notera que, pour que les mesures aient été valables jusqu'à 10 MHz, il n'aurait pas fallu excéder 1 cm de câble usuel.

2.2. Dynamique d'impédance

Du fait même que la gamme de fréquence soit relativement étendue et que la cellule solaire peut se comporter comme une capacité à faibles pertes, la dynamique de mesure d'impédance est tout aussi étendue. Pour une cellule solaire de 8 cm^2 , l'impédance pourra varier de $0,1 \Omega$ à $10 \text{ k}\Omega$ entre 100 Hz et 10 MHz.

Le même appareillage doit également servir à la mesure d'impédance d'un panneau de générateur solaire du type SRET constitué d'une chaîne série de 33 cellules de 4 cm^2 dont l'impédance peut, a priori, être 66 fois plus élevée que la cellule de 8 cm^2 , c'est-à-dire près de $500 \text{ k}\Omega$.

2.3. Superposition du régime statique

L'impédance dépend du point de fonctionnement sur la caractéristique statique de la cellule solaire. L'appareillage de mesure d'impédance doit accepter la superposition d'un régime de courant continu.

Pour la mesure en obscurité, cellule polarisée, on doit pouvoir injecter dans la cellule le courant de polarisation réglable de 0 à 300 mA. Ce courant de polarisation simule le courant de diffusion dans la diode, la valeur basse (0) correspond à la cellule éclairée en court-circuit, la valeur haute (300 mA) correspond à la cellule éclairée en circuit ouvert.

La mesure sous éclairage doit être effectuée alors que la cellule débite sur une charge variable de 0 (court-circuit) à l'infini (circuit ouvert).

3 - Principe de mesure

Le principe de mesure consiste très simplement à mesurer la tension aux bornes de la cellule et le courant qui la traverse.

Si la mesure de tension ne présente pas de difficulté particulière, il n'en est pas de même de la mesure de courant.

Deux solutions ont été retenues selon la valeur de l'impédance ou le régime statique imposé.

3.1 1ère solution

On mesure le courant par l'intermédiaire de la chute de tension dans une impédance connue (figure 13) qui peut être une résistance de 1Ω ou 50Ω . Cette méthode est bien adaptée à la mesure d'impédance de valeur élevée :

Référence $R = 1\Omega$	$0,1\Omega < X < 10\text{ k}\Omega$
Référence $R = 50\Omega$	$5\Omega < X < 500\text{ k}\Omega$

lorsqu'on n'a pas de contrainte sur la résistance maximum que l'on peut placer en série avec la cellule, c'est-à-dire qu'elle convient bien à la cellule solaire ou au générateur solaire polarisé.

3.2 2ème solution

On mesure directement le courant par une pince ampéremétrique alternative, figure 15. Cette méthode permet d'abaisser la résistance de charge en courant continu de la cellule à une valeur aussi faible qu'on le désire, c'est-à-dire, qu'elle convient bien à une mesure d'impédance de la cellule éclairée. En contre-partie la dynamique de mesure s'étend surtout du côté des impédances faibles et il n'est pas possible de mesurer une impédance supérieure à $2\text{ k}\Omega$.

Pour la mesure de l'impédance du panneau solaire du type SRET, contrairement à ce qui vient d'être dit, la première solution a été retenue même en éclairément car son impédance était trop élevée pour que la deuxième méthode puisse convenir.

Le transformateur d'isolement à large bande passante qui apparaît sur le schéma est indispensable pour plusieurs raisons.

- Le générateur sinusoïdal utilisé était à "couplage direct" c'est-à-dire, qu'une composante continue de 6 V était superposée au signal alternatif, ce qui nécessitait soit un transformateur, soit un condensateur d'isolement.

- Aux fréquences inférieures à 100 kHz on a remarqué qu'il était nécessaire d'avoir un point de masse unique pour éviter un couplage entre l'une des entrées de mesure et le courant de retour du générateur.

(Au-dessus de 100 kHz, dans le montage de la figure 13, il est possible de remplacer le transformateur d'isolement par une capacité pour atteindre la valeur maximum de fréquence de 10 MHz).

- Seul le transformateur permet dans le montage de la figure 15, d'avoir une résistance quasi nulle en courant continu. La limite maximum de fréquence est alors imposée par la bande passante du transformateur. Pour cette raison on a fixé à 1 MHz la limite supérieure de fréquence des mesures sur cellule éclairée.

4 - Montage complet

On a représenté sur les figures 14 et 16, les montages complets de mesure correspondant respectivement aux schémas de principe des figures 13 et 15.

On notera que l'on mesure directement par l'analyseur de réseau HP3570 le rapport en amplitude et phase des 2 tensions d'entrée V_A et V_B .

Solution 1 (figure 13)-

L'impédance inconnue vaut

(30)

$$X = R \frac{V_A}{V_B} - 1$$

"Page^s missing from available version"

Pages 35, 36, 37 & 38

Solution 2 (figure 15)

L'impédance inconnue vaut

$$(31) \quad X = \frac{V_B}{V_A}$$

car la sonde de courant placée dans la voie A de l'analyseur a une impédance de transfert de 1Ω .

Le système de mesure est piloté par un calculateur HP9830 qui commande le balayage automatique en fréquence du synthétiseur et de l'analyseur, il convertit en ohm la grandeur V_B/V_A mesurée en dB par l'analyseur à l'aide de l'équation 30 ou 31.

Il reporte la valeur ainsi calculée sur la table traçante X, Y.

VII. ETUDE EXPERIMENTALE

- Description des Spécimens -

1 - Cellules solaires AEG

Les mesures sur cellule solaire ont porté sur des cellules fabriquées par AEG, à usage spatial.

Ce sont des cellules au silicium n/p, de résistivité $10\Omega \times \text{cm}$, de superficie 8 cm^2 . La cathode en peigne a une couverture de 5 %.

La cellule est recouverte d'un filtre de verre de $200 \mu\text{m}$.

1.1 Montage de la cellule

Lors des mesures, la cellule était collée sur un circuit imprimé isolé au verre epoxy de $0,1 \text{ mm}$ d'épaisseur. L'ensemble était rapporté sur une plaque d'aluminium. Un thermocouple mesurait la température de ce support propre à chaque cellule.

Les trois cellules testées étaient fixées sur un support également en aluminium posé à l'intérieur du caisson à vide.

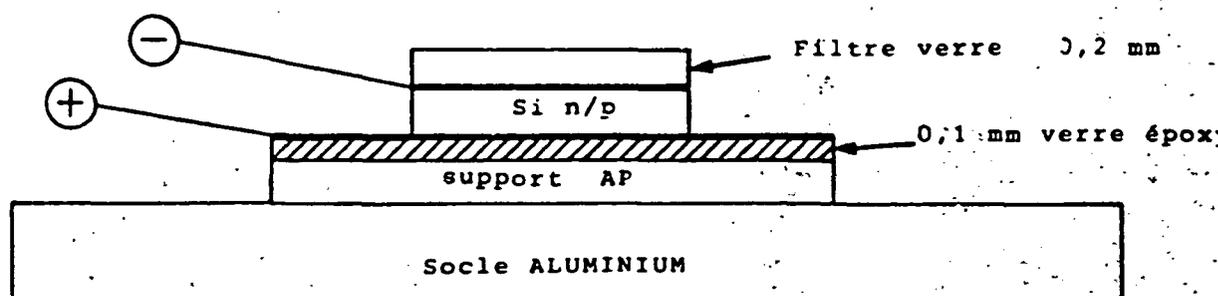


Figure 17 : MONTAGE DE LA CELLULE

Pour un usage réel en vol, on aurait remplacé l'isolant en verre epoxy par une feuille de kapton de 25 μm entre l'anode de la cellule et la structure du panneau solaire. La structure mécanique étant généralement reliée au point négatif de l'alimentation, on aura dans le montage réel une capacité supplémentaire.

Lors des mesures, le support d'aluminium était électriquement flottant.

Les trois cellules mesurées étaient respectivement repérées par les numéros 1, 5 et 9. Elles ont été prélevées dans un lot de 9 cellules dont on a relevé les caractéristiques statiques, avant et après irradiation, en fonction de la température (figures 20 à 23).

Les mesures d'impédance ont également été effectuées avant et après l'irradiation aux électrons.

Les doses reçues par les cellules 1, 5 et 9 sont croissantes et valent :

cellule 1 : $5 \cdot 10^{13}$ e (1 MeV)/ cm^2

cellule 5 : $5 \cdot 10^{14}$ e (1 MeV)/ cm^2

cellule 9 : $5 \cdot 10^{15}$ e (1 MeV)/ cm^2

1.2 Raccordement au point de mesure

On appelle "point de mesure" le noeud du circuit où on connaît simultanément la tension et le courant, c'est-à-dire le point exact où on connaît l'impédance. On voit donc l'impédance à travers la connexion reliant ce point aux bornes de la cellule. Cette liaison était constituée lors de toutes les mesures par un câble coaxial 50 Ω .

- du type KX20A, longueur 50 cm, à l'intérieur du caisson

- du type KX2, longueur 38 cm, à l'extérieur du caisson.

Ce câble met en série avec la cellule une inductance et une résistance non négligeable qui limite les mesures à 1 MHz environ. Au contraire, la capacité parallèle introduite par le câble est négligeable devant la capacité de la cellule.

Les constantes primaires de ces câbles sont les suivantes :

"Page^s missing from available version"

Pages 42 - 68

IX. ETUDE EXPERIMENTALE

- Interprétation des Mesures -

Un examen des courbes de mesures brutes permet d'extraire directement presque tous les composants du schéma équivalent :

Composant	Conditions de mesure
Résistance parallèle	Obscurité Tension nulle Fréquence < 1 kHz
Résistance série	Paramètre non mesurable avec précision par cette méthode
Résistance de diffusion	Eclairement ou polarisation (tension non nulle) Fréquence < 10 kHz
Capacité de diffusion	Eclairement ou polarisation (tension non nulle) 10 kHz < F < 500 kHz
Capacité de transition	Obscurité Tension nulle 10 kHz < F < 500 kHz

1 - Variations de fabrication

On compare les mesures obtenues sur les trois cellules, avant irradiation. (les cellules ont reçu des doses différentes).

1.1 Résistance parallèle

C'est le paramètre qui diffère le plus d'une cellule à l'autre. En effet, à 23°C on peut mesurer :

R_p (cellule 1) = 25 k Ω

R_p (cellule 5) = 1,2 k Ω

R_p (cellule 9) = 200 Ω

Il ne semble pas que ces différences aient de l'influence sur les performances des cellules, tout au moins pour une utilisation normale, toutefois, il n'est pas impossible que ce paramètre soit un indicateur d'une qualité ou d'une homogénéité de fabrication, surtout lors de la pose des électrodes.

1.2 Capacité de transition

Elle est voisine pour les trois cellules et vaut, à la température ambiante :

$$C_T = 110 \text{ nF}$$

1.3 Admittance de diffusion

Avant irradiation, on ne dispose que de peu de mesures à tension de cellule non nulle, on ne peut dire s'il existe des différences d'admittance de diffusion (résistance et capacité) d'une cellule à l'autre liées à la fabrication.

2 - Influence de l'irradiation

Les trois cellules ont reçu des doses différentes d'irradiation aux électrons :

Cellule 1 : $5 \cdot 10^{13}$ électrons de 1 MeV/cm²

Cellule 5 : $5 \cdot 10^{14}$ " "

Cellule 9 : $5 \cdot 10^{15}$ " "

2.1 Résistance parallèle

Pour chacune des cellules, la résistance parallèle a conservé la valeur qu'elle avait avant l'irradiation. Ceci est compatible avec l'explication que la conduction parallèle n'est pas liée à une caractéristique de jonction ou de semi-conducteur, mais à un défaut de finition de la cellule : percement de la jonction par des brins de métal lors de la pose des électrodes ou conductivité des bords de la cellule.

2.2 Capacité de transition

La capacité de transition (mesurée à la température ambiante) conserve la valeur d'avant irradiation.

2.3 Admittance de diffusion

L'absence de référence ne permet pas de conclure à l'action de l'irradiation sur l'admittance de diffusion.

Toutefois, on constate, après irradiation, une différence de la valeur de cette admittance d'une cellule à l'autre, sans qu'il soit possible de dire si la différence est une conséquence de la fabrication ou de l'irradiation.

On compare des valeurs obtenues à la température ambiante, 23°C, à la tension de 400 mV (tension relativement élevée pour s'abstraire des différences de résistance parallèle).

T = 23°C, V = 400 mV	Rd	Cd
Cellule 1	28 Ω	270 nF
Cellule 5	16 Ω	250 nF
Cellule 9	5,6 Ω	260 nF

Si les différences sur la conductance sont significatives, on peut admettre que celles sur la capacité restent dans la limite de l'erreur de mesure.

3 - Influence de la température et de la tension

Les mesures ont été effectuées dans la gamme normale d'utilisation des cellules solaires.

3.1 Résistance parallèle

On a tracé figure 53, les courbes de variation de la résistance parallèle en fonction de la température pour chacune des 3 cellules.

"Page missing from available version"

Ces valeurs correspondent à des mesures effectuées dans l'obscurité, la tension aux bornes de la cellule étant nulle.

Le comportement est identique pour les 3 cellules, la résistance est constante depuis les plus basses températures jusqu'à la température ambiante et décroît ensuite régulièrement.

On n'a pas d'explication à ce phénomène. S'il s'avérait intéressant il conviendrait de vérifier qu'il ne s'agit pas d'un courant de diffusion sous l'effet de la tension alternative injectée pour mesurer l'impédance.

3.2 Capacité de transition

Elle augmente légèrement avec la température. Cette variation est liée à l'influence de la température sur la hauteur de la barrière de potentiel, en effet, on rappelle que :

$$C_t = S \sqrt{\frac{\epsilon}{2} \frac{i}{\frac{1}{qNA} + \frac{1}{qND}}} \sqrt{\phi - v}$$

(pour les notations voir § IV.4.2.)

avec

$$\phi = \frac{kT}{q} \log \frac{N_A N_D}{n_i^2}$$

et

$$n_i^2 = N_D P_{on} = N_A n_{op}$$

P_{on} et n_{op} sont les densités de porteurs mineoritaires dans chaque zone et sont fortement liées à la température.

$$n_i^2 = 9.15 \cdot 10^{42} T^3 \exp\left(-\frac{12650}{T}\right)$$

dans le cas du silicium.

3.3 Admittance de diffusion

On rappelle la loi théorique de variation de l'admittance de diffusion (cf. § 4.4).

$$Y_d = \frac{qI_s}{AkT} \left(1 + \frac{j\omega\tau_n}{2}\right) \exp\frac{qV}{AkT}$$

Le courant de saturation I_s étant lui-même fortement dépendant de la température par la densité n_{op} d'électrons minoritaires puisque :

$$I_s = \frac{S_q D_n n_{op}}{L_n}$$

On a tracé pour chaque cellule, à chaque température d'essai, la loi de variation en fonction de la tension

- de la résistance de fuite totale (résistance parallèle et résistance de diffusion)
- de la capacité totale (capacité de diffusion et capacité de transition).

Lorsque la composante continue de la tension tend vers 0, l'admittance de diffusion disparaît et il ne reste plus que la capacité de transition en parallèle sur la résistance dite "parallèle".

Il apparaît à l'évidence sur les courbes de capacité (figures 55 à 57) que si la capacité de transition dépend peu de la tension et de la température, sauf peut-être lorsque la température devient très basse, l'admittance de diffusion varie considérablement avec ces deux paramètres.

En fonction de la tension, lorsque celle-ci devient suffisamment élevée pour que, seule l'admittance de diffusion soit visible, les courbes de résistance ou de capacité deviennent rectilignes, leurs pentes sont égales au signe près, et ont pour valeur l'argument de l'exponentielle

"Page^s missing from available version"

Pages 75 - 81

$$P = \frac{qV}{AkT}$$

En fonction de la température, on observe une translation parallèle aux abscisses, l'amplitude, en volts de cette translation apparaît proportionnelle à la variation de température.

On a reporté sur les graphiques des figures 55 à 57, les courbes théoriques de variation de la capacité totale de la cellule en fonction de la tension à partir des paramètres I_s et A déduits des caractéristiques statiques des cellules irradiées. On constate une concordance plutôt bonne pour la capacité de diffusion, les écarts par rapport aux mesures semblant dus à une détermination incertaine du courant de saturation.

4 - Comparaison cellule éclairée - cellule polarisée

On a tracé, courbes des figures 58 à 60, sur un même graphique la résistance totale de fuite, toutes causes confondues (diffusion et résistance parallèle), en fonction de la tension mesurée directement aux bornes de la cellule :

- en condition d'éclaircement normal, la tension étant alors contrôlée par variation de charge,
- en polarisation dans le sens direct.

On constate que ces 2 courbes se déduisent l'une de l'autre par translation parallèle à l'axe des tensions, ce qui confirme l'analyse théorique (cf. § 4.6) selon laquelle, pour une cellule à une température donnée, pour un éclaircement donné, l'écart entre les courbes est une constante (c'est-à-dire indépendante de la tension qui vaut :

$$V_p - V_e = R_s \cdot I_L$$

On devrait donc toujours trouver un décalage de l'ordre de 30 mV puisque :

$$R_s = 0,1 \Omega$$

$$I_L = 0,3 \text{ A}$$

pour les cellules utilisées.

"Page missing from available version"

On a effectué une opération analogue pour la capacité totale vue aux bornes d'un générateur solaire du type SRET. On trouve de la même manière un décalage en tension des courbes obtenues en éclairnement et en polarisation. Du fait de la dispersion entre les caractéristiques des cellules solaires, il n'était pas certain qu'une polarisation d'ensemble du panneau solaire soit équivalente à son éclairnement et que chaque cellule prenne le même état de fonctionnement conduisant à une même impédance.

5 - Effet de la diode anti-retour.

Pour éviter que les chaînes de cellules éclairées débitent dans les chaînes à l'ombre, on dispose en série des diodes de blocage.

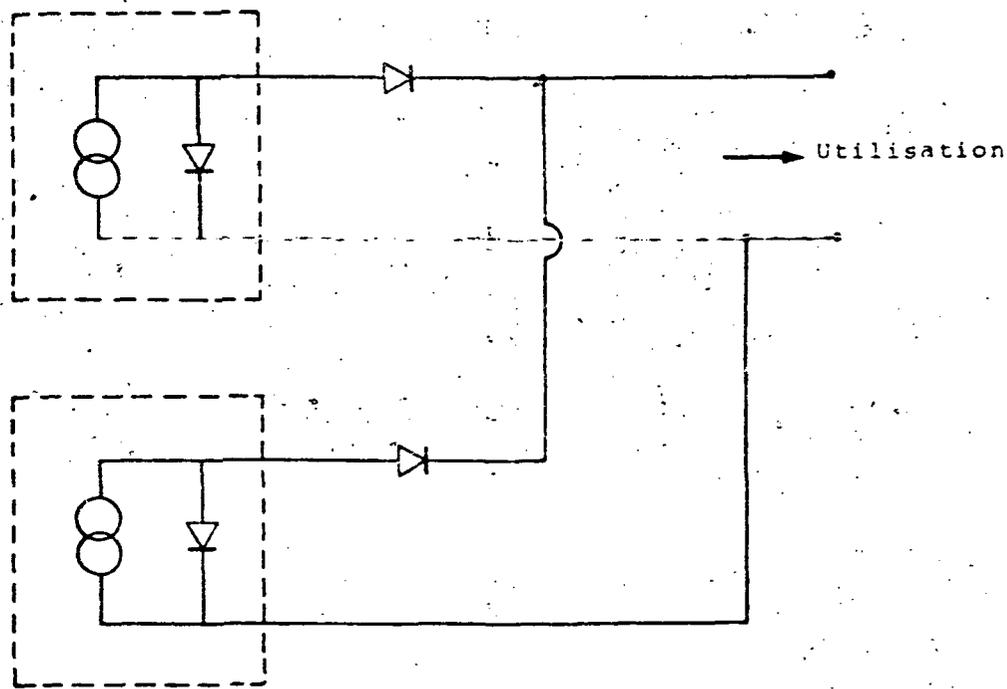


Figure 24 : BRANCHEMENT EN PARALLELE DE PLUSIEURS PANNEAUX SOLAIRES

"Page missing from available version"

Ces diodes modifient légèrement l'impédance du générateur solaire vue de l'utilisation, ainsi qu'on a pu le vérifier par la mesure (figure 62). Son effet paraît plutôt favorable car elle a tendance à augmenter l'impédance du panneau. Sur cette figure, l'effet de la diode paraît important, car le générateur en circuit ouvert ne débite pas dans la diode ; mais, en fonctionnement normal tout le courant fourni par le générateur solaire sera un courant de diffusion de la diode, son schéma équivalent se réduira à sa résistance série et aura un effet négligeable.

X. CONCLUSION

On a montré par cette étude qu'il était possible de calculer l'impédance d'une cellule solaire en fonction de la fréquence jusqu'à 1 MHz ou son circuit équivalent à partir de mesures statiques, puisqu'il est possible de déterminer à partir des caractéristiques statiques les grandeurs :

- R_s résistance série
- I_s courant de saturation
- A coefficient technologique
- R_p résistance parallèle

d'où l'on déduit directement, ou indirectement, les composants du circuit équivalent.

- R_s résistance série
- R_p résistance parallèle
- R_d résistance de diffusion
- C_d capacité de diffusion

Il ne manque alors plus que la capacité de transition qui peut être facilement mesurée en circuit ouvert dans l'obscurité.

On a également montré que l'on pourrait remplacer l'ambiance nominale (éclairage solaire dans l'espace) par une simple polarisation du générateur solaire.

Dans cette étude, on a limité les mesures à la fréquence maximum de 1 MHz, ce qui était suffisant pour la caractérisation de la cellule solaire.

Au-dessus de cette fréquence, l'inductance des interconnexions entre les cellules a un effet essentiel sur le comportement du générateur solaire. En raison de la difficulté de l'évaluation théorique de ces inductances, il serait utile dès qu'un panneau solaire est disponible de mesurer sa réponse à une perturbation impulsionnelle selon les méthodes classiques de réflectométrie.