

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

12/87

وزارة التعليم و البحث العلمي  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT : GENIE ELECTRIQUE  
المدرسة الوطنية للتكنولوجيا  
BIBLIOTHEQUE - المكتبة  
Ecole Nationale Polytechnique

PROJET DE FIN D'ETUDES

SUJET

ETUDE THEORIQUE ET EXPERIMENTALE  
D'UN GENERATEUR PHOTO VOLTAIQUE  
CAS DU PRECHAUFFAGE D'UN GAZ PAR  
ENERGIE SOLAIRE

Proposé Par :  
S.A. DARADJI

Etudié par :  
ZENDAQUI  
F. ZOHRA

Dirigé par :  
S.A. DARADJI

PROMOTION : janvier 1987

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
BIBLIOTHEQUE — المكتبة  
École Nationale Polytechnique

“ DEDICACE ”

A toute ma famille , et surtout à mon frère , ma soeur FATIHA, et ma nièce  
GHADA . Qu'ils trouvent ici tout mon amour .

A tous les amis(es) :

NEBBACHE NACER ; MOUSSAQUI YASMINA , BENAMIRA NADIA , MOULA NADIA , LA  
FAMILLE MOULA , BOUTOUTA SIHEME , BOUTRIA SAMIRA , Z.BARBARA , NAILI.T ,  
CHOUAIKHI NACERA , NAIMA , B.NADIRA , BECHIKHI SORAYA , BOUMGHAR.Y ,  
ABDESSEMED.Y , R.CHELALI , R.ASMA , GUERIDI.F , SAIDANI.F . M.AZZOUG .

A tous les enseignants du C.E.F les palmiers et surtout à la surveillante  
générale Mme MANSOURI.F .

*"REMEMBERMENT"*

JE TIENS A REMERCIER

Mr S.A.DARADJI , Professeur à L'E.N.P , et Directeur chargé du laboratoire de l'énergie solaire de L'E.N.P , de m'avoir proposé ce sujet , ménagé ses conseils judicieux et son aide bienveillante .

Mr MEKBEL , Directeur de la sonelgaz (Gué de Constantine) , de m'avoir autorisé à travailler sur le poste de détente du gaz de la société , et d'avoir mis à ma disposition tout le matériel nécessaire .

également , Mr TABAKH , de m'avoir aidé pour le montage et pour le matériel .

Mrs BELAKHDAR et MALOUFI , ingénieurs et responsables à la D.T.N

( à TELEMLI) , pour la documentations et les conseils qui m'ont donné,

et aussi le temps qu'ils ont consacrés pour moi .

sans oublier tout l'ensemble du personnel du poste de détente ( Gué de Constantine) pour leur soutien .

Mr N.E.NEBBACHE , Responsable du centre d'AUDIO-VISUEL , pour son aide matérielle et morale .

Mr BOUCHERIT , Assistant à L'E.N.P , pour sa serviabilité et son aide morale .

Mme SEBAIBI , Secrétaire au département de GENIE ELECTRIQUE , pour sa sympathie et sa serviabilité .

Ma sincère gratitude va aussi à tous ceux qui, de près ou de loin , ont participer à la réalisation de ce projet , et leurs encouragements .

INTRODUCTION

CH I ETUDE ET DESCRIPTION DE L'INSTALLATION SOLAIRE DE L'E.N.P .

I-1: INTRODUCTION

I-2: DEFINITION ET DESCRIPTION DE L'INSTALLATION SOLAIRE (L.E .5)

I-2-1: GENERATEUR PHOTO-VOLTAIQUE .

I-2-2: CARACTERISATION D'UN GENERATEUR PHOTO-VOLTAIQUE .

I-2-3: MODULE ARCO-SOLAR M53 .

I-2-4: CELLULES PHOTO-VOLTAIQUE .

I-3: DIFFERENTES ASSOCIATIONS DES MODULES PHOTO-VOLTAIQUES .

I-3-1: ASSOCIATION SERIE DES MODULES .

I-3-2: ASSOCIATION PARALLELE .

I-3-3: ASSOCIATION SERIE-PARALLELE .

CH II ETUDE THEORIQUE DU DESEQUILIBRE DU GENERATEUR PHOTO-VOLTAIQUE .

II-1: INTRODUCTION

II-2: DIODES BY-PASS

II-3: SCHEMA EQUIVALENT D'UNE CELLULE SOLAIRE .

II-4: PARAMETRES CARACTERISTIQUES .

II-4-1: RESISTANCE SERIE

II-4-2: RESISTANCE SHUNT

II-5: RESULTATS ET COURBES THEORIQUES

II-5-1: CELLULE SOLAIRE IDEALE;  $R_s=0$  ET  $R_p =$

a) LA CELLULE EST SOUMISE SOUS ECLAIREMENT

b) LA CELLULE EST A L'OBSCURITE

CH III ETUDE EXPERIMENTALE DU DESEQUILIBRE DU GENERATEUR PHOTO-VOLTAIQUE

III-1: INTRODUCTION

III-2: MANIPULATION

III-3: ESSAIS ET RESULTATS EXPERIMENTAUX

CH IV POSTE DE DETENTE DU GAZ ALIMENTE PAR LE GENERATEUR PHOTO-VOLTAIQUE

IV-1: INTRODUCTION

IV-2: DESCRIPTION DU POSTE DE DETENTE DU GAZ

IV-3 PROBLEMES PRATIQUES POSES PAR LE REFROIDISSEMENT

- \* CONDENSATION
- \* HYDRATES
- \* GENE DANS LE FONCTIONNEMENT DU DETENDEUR

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
BIBLIOTHEQUE — المكتبة  
Ecole Nationale Polytechnique

IV-4 ETUDE DE L'ECOULEMENT

- IV-4-1 PRINCIPE
- IV-4-2 LOIS THEORIQUES DU REFROIDISSEMENT
- IV-4-3 DESCRIPTION MATHEMATIQUE DE L'ECOULEMENT
  - a) INTRODUCTION
  - b) BILAN DE MASSE (Equation de continuité)
  - c) BILAN D'ENERGIE
- IV-4-4 EQUATIONS GENERALES SIMPLIFIEES

IV-5 MODELE GLOBALE DE SIMULATION DU SYSTEME

CH V MODELE DE L'ETUDE PRATIQUE ET CALCULS DES ECHANGES CALORIFIQUES

V-1 INTRODUCTION

V-2 TRANSMISSION DE CHALEUR PAR CONDUCTION

V-3 TRANSMISSION DE CHALEUR PAR CONVECTION

V-4 TRANSMISSION MIXTE DE CHALEUR

V-5 CALCULS PRELEMINAIRES

V-5-1 CALCUL DE  $K_i$

V-5-2 CALCUL DE  $K_h$

V-5-3 CALCUL DE  $K_e$

V-5-4 EXPRESSION FINALE DE Q (Quantité de chaleur totale)

V-5-5 EXPRESSION DE LA VITESSE REELLE DE L'ECOULEMENT

V-5-6 BILAN THERMIQUE DU MODELE PRATIQUE

V-6 SIMULATION DU MODELE DONNANT LA RESISTANCE ELECTRIQUE (Chauffage)

V-6-1 INTRODUCTION

V-6-2 ETUDE DE LA RESISTANCE ELECTRIQUE

CH VI ETUDE DE LA MANIPULATION ET RESULTATS EXPERIMENTAUX

VI-1 INTRODUCTION

VI-2 SCHEMA EXPERIMENTAL

VI-3 CARACTERISTIQUE DU STOCKAGE

VI-4 RESULTATS DE LA MANIPULATION

VI-4-1 UTILISATION D'UNE BOUTEILLE DE GAZ

VI-4-2 EXPERIMENTATION SUR SITE

VI-4-3 RELEVES EXPERIMENTAUX

CONCLUSION

ANNEXES

المدسة الوطنية المتعددة التقنيات  
BIBLIOTHEQUE — المكتبة  
Ecole Nationale Polytechnique

INTRODUCTION  
\*\*\*\*\*



Les sources d'énergie dans la nature étant diverses .Notre intérêt s'est porté sur l'une d'elles , à savoir l'énergie Photo-voltaïque , utilisant des photopiles qui transforment directement l'énergie solaire en énergie électrique .

Toutefois , le rendement ou taux de conversion énergie solaire-énergie électrique est faible 13% ou moins pour les piles solaires des vaisseaux spatiaux , et il existe un inconvénient majeur dans le bon fonctionnement du générateur photo-voltaïque . En effet , il se crée un déséquilibre dans celui-ci lors d'une occultation accidentelle . Les valeurs nominales des tensions ou des courants varient , et le fonctionnement du générateur s'inverse et il devient récepteur , il absorbe donc de l'énergie au lieu d'en générer .

Afin de bien cerner ce problème , nous faisons dans le cadre de ce travail ,d'une part une étude du déséquilibre proprement dit et d'autre part ses conséquences qui en découlent sur un système élethro-thermodynamique , pour le préchauffage d'un gaz à l'amont du détendeur dans les postes de détente de la sonelgaz afin d'éviter le givrage dans les conduites contenant le gaz , qui est dû à la baisse de température à une valeur en dessous de ( $- 2^{\circ}\text{C}$  ).

ETUDE ET DESCRIPTION DE L'INSTALLATION SOLAIRE DU  
\*\*\*\*\*  
LABORATOIRE D'ENERGIE SOLAIRE DE L'E.N.P.  
\*\*\*\*\*

I-1 INTRODUCTION :  
\*\*\*\*\*

L'installation solaire dont on se propose l'étude se situe au laboratoire d'énergie solaire de l'ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE . Elle se compose d'un ensemble de 24 modules photo-voltaiques de type ARCO-SOLAR M53 constituant 2 groupes de 12 modules chacun . Chaque groupe étant un panneau photo-voltaïque . Les bornes de sortie des modules sont groupées sur un tableau nous permettant de réaliser différentes combinaisons d'associations possibles de ces modules . fig ( 1 )

I-2 DEFINITIONS ET DESCRIPTIONS DE L'INSTALLATION SOLAIRE ( L.E.S. ) :  
\*\*\*\*\*

I-2-1 GENERATEUR PHOTO-VOLTAIQUE :  
\*\*\*\*\*

Un générateur photo-voltaïque se compose d'un ou plusieurs panneaux, l'un de ces panneaux contient 12 modules , ces derniers peuvent être connectés en série ou en parallèle , et ceci selon les besoins spécifiques de la consommation . Ce couplage a lieu lorsque la tension et le courant d'un module n'arrivent pas à donner la puissance nécessaire pour la charge , sachant que la puissance d'un module est de 40W .

I-2-2 CARACTERISATION D'UN GENERATEUR PHOTO-VOLTAIQUE ;  
\*\*\*\*\*

Un générateur P.V. peut-être représenté par le schéma de la figure 1' , une source de courant shuntée par une diode

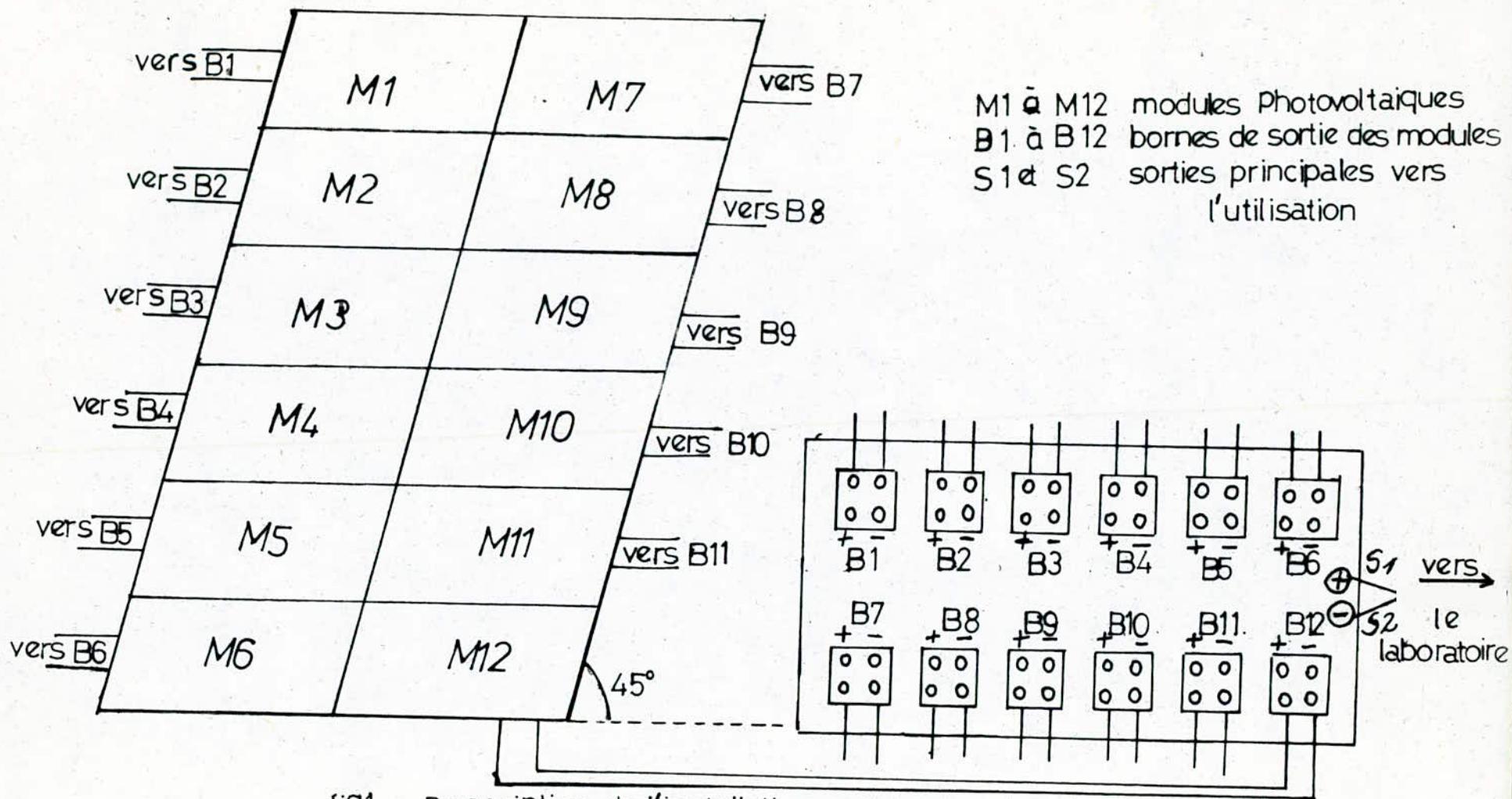


fig1 Description de l'installation solaire de l'E.N.P

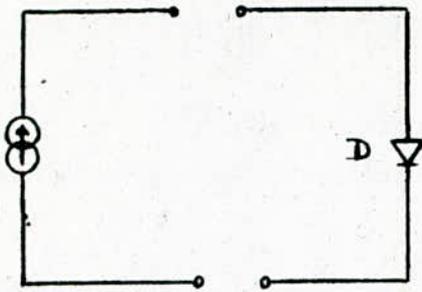


fig 1

cette source de courant fournit un courant  $I_0$  proportionnel à l'éclairement tel que :

$$I_0 = I_c + I_d$$

$$\text{donc : } I_c = I_0 - I_d$$

$I_0$  : photocourant

$I_d$  : courant de la diode

La caractérisation du générateur photo-voltaïque consiste à relever les courbes de puissance  $I(V)$  pour différentes variations du flux lumineux et de la température. Les différentes courbes  $I(V)$  nous définissent certains paramètres qui caractérisent le module.

Le courant direct de la diode varie en fonction de la température selon la formule :

$$I_d = I_s \cdot \exp \left( \frac{q_0 V_d}{K_0 T} - 1 \right)$$

et la puissance photo-voltaïque délivrée par le générateur est :

$$P = V_c \cdot I_c$$

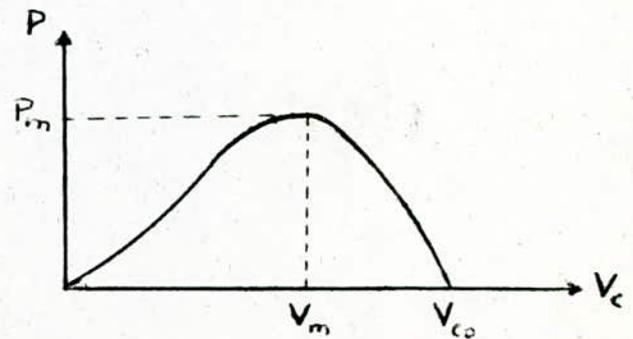
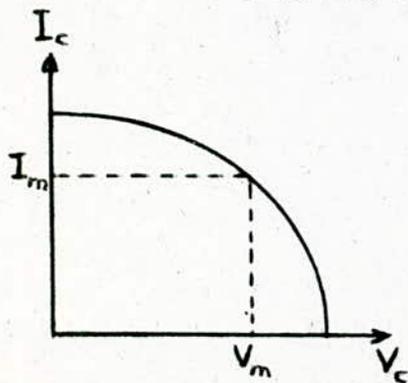
cette puissance est maximale pour un point de fonctionnement optimum, situé dans la courbe de la caractéristique COURANT-TENSION (fig 2).

Ce point de fonctionnement du générateur est fixé par la charge  $R_c$  connectée à ces bornes. Si, on court-circuite la sortie du générateur (pour  $R_c = 0$ ), le point de fonctionnement aura pour coordonnées

$$(I_c, V_c) = (I_{cc}, 0)$$

Dans ce cas, la puissance délivrée est :

$$P = V_c \cdot I_c = 0 \cdot I_{cc} = 0$$

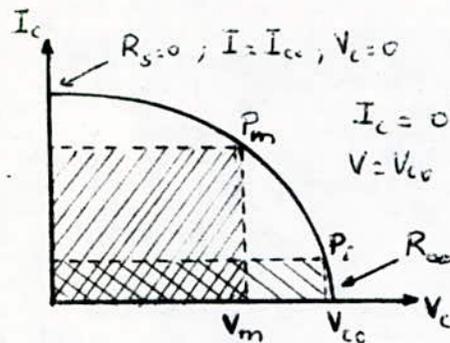


et pour une charge infinie (circuit ouvert à la sortie)  $R_c = \infty$ , le point de fonctionnement aura pour coordonnées :

$$(I_c, V_c) = (0, V_{cc})$$

et la puissance délivrée est :

$$P = V_c \cdot I_c = V_{cc} \cdot 0 = 0$$



donc la puissance électrique fournie par le générateur est maximale au point de fonctionnement  $P_m$ . Elle correspond au rectangle de surface maximale, correspondant à une valeur  $R_p$  de  $R_c$  (fig 3)

fig 3

I-2-3 MODULE ARCO-SOLAR M53 :  
\*\*\*\*\*

Le module M53 utilise des cellules carrées ; qui sont composées d'un seul cristal en silicium et d'un verre laminé traité thermiquement. Les cellules solaires sont laminées au verre antireflectif supportées par derrière par une protection polymère de couches multiples. L'ensemble est alors refermé par un couvercle en aluminium anodisé. Le M53 peut-être utilisé pour fournir de l'énergie continue pour divers systèmes. Quand il est utilisé en conjonction avec des piles et des régulateurs, il est normalement considéré que chaque M53 en série fournirait un voltage suffisant pour charger une pile de 12V par exemple quatre M53 feront marcher un moteur à courant continu nominalemt conçu pour operer autour de 60 Volts.

I-2-4 CELLULES PHOTO-VOLTAIQUE :  
\*\*\*\*\*

La cellule solaire ou la photopile transforme directement l'énergie rayonnante reçue en une énergie électrique. Cette cellule est constituée soit par la jonction d'un métal et d'un semi-conducteur, ou encore d'un semi-conducteur avec un autre du type opposé, exemple : photopiles en silicium qui sont utilisées en L.E.5.

Elle se compose donc d'une plaquette de semi-conducteur de type N, recouverte d'une très mince couche de semi-conducteur de type P qui est obtenu par diffusion (voir fig 4).

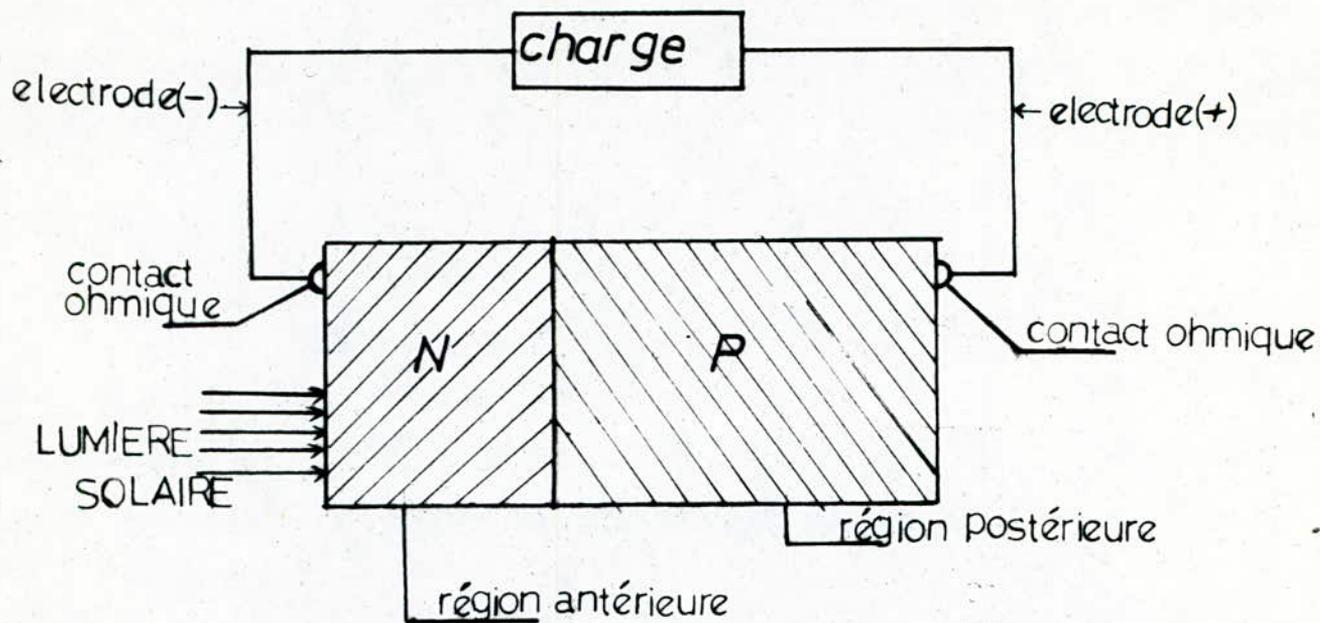


fig 4 structure d'une cellule solaire

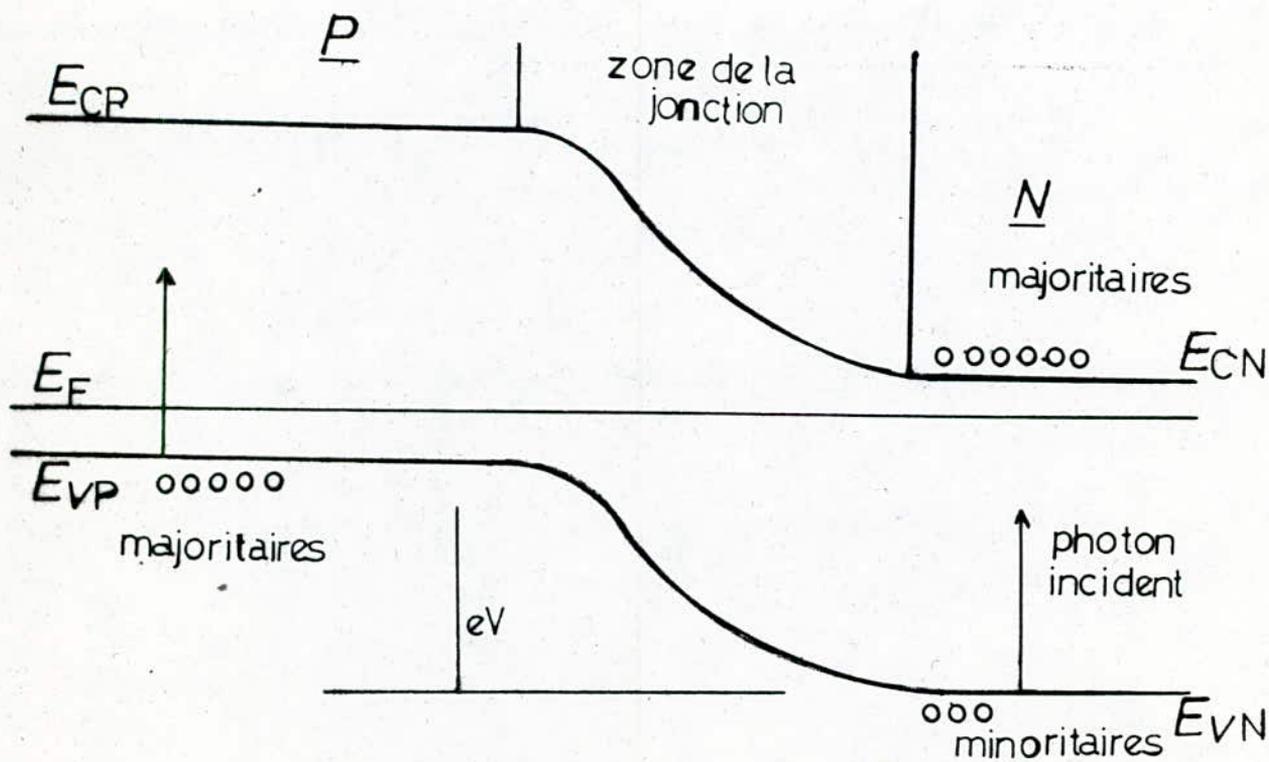


fig 5

Modele de bande d'energie

### I-2-5 FONCTIONNEMENT D'UNE JONCTION P-N

\*\*\*\*\*

La jonction P-N est la surface séparant dans un monocristal, une région N d'une autre P fig(4), lorsque nous réalisons cette jonction, il s'établit un phénomène de diffusion des porteurs majoritaires, les électrons diffusés par N dans P laissent derrière eux une charge d'espace positive et les trous diffusés par P laissent une charge d'espace négative.

Il existe donc au niveau de la jonction P-N une différence de potentiel, d'où un champ électrique qui repousse les électrons vers N et les trous vers P. Supposons que nous éclairons la jonction P-N avec une lumière contenant des photons dont l'énergie ( $h\nu$ ) est supérieure à la largeur de la bande interdite (gap d'énergie) fig(5), Chaque photon peut être absorbé par un électron de la bande à valence (porteurs minoritaires) et donnera naissance à une paire électron-trou.

Lorsque cette paire atteint la zone de la charge d'espace, la barrière de potentiel les brise et accélère les minoritaires, les électrons dans le cristal P ou ils deviennent majoritaires, ceci se traduit par une f.e.m fournissant un courant électrique dans le cas où la cellule est branchée à un récepteur.

### I-3 DIFFERENTES ASSOCIATIONS DES MODULES PHOTO-VOLTAIQUES

\*\*\*\*\*

Dans la plupart des installations solaires, nous sommes amenés à coupler plusieurs modules afin d'obtenir une puissance optimale. Tous les modules qui seront connectés en parallèle doivent avoir la même tension du circuit ouvert  $V_{co}$  et un même courant de court-circuit pour l'association en série.

#### I-3-1 ASSOCIATION SERIE DES MODULES

Le M53 est conçu pour des systèmes dont le maximum de voltage à circuit ouvert est de 24v, cette valeur sera multipliée par le nombre de modules branchés en série.

Le nombre de modules branchés en série ne doit jamais excéder 25, avec 25 modules en série, les voltages nominaux de fonctionnement du système sont:

- 300v pour un chargement d'une batterie.
- 375v pour une connection directe à un moteur.

Le courant de court-circuit pour ce type de branchement reste le meme, et si l'un des modules est à l'ombre, il sera polarisé en inverse par la somme des f.e.m résultantes des autres modules éclairés, ce qui tend à accroître le courant inverse ainsi que la température, ce qui va intensifier le courant, et ainsi de suite jusqu'à emballement thermique. voir fig(6).

### I-3-2 ASSOCIATION PARALLELE DES MODULES

---

pour ce type de branchement, la tension du circuit ouvert de chaque module doit rester la meme. Le courant augmente et la résistance du générateur diminue, et lorsque l'un de ces modules est à l'ombre, le courant parcourant ce dernier sera la somme des courants des autres modules éclairés et lorsqu'il atteint le courant de saturation, il risque d'être détérioré.

Le nombre de M53 qui peuvent être connectés en parallèle est limité par la capacité de transport de courant du cablage utilisé pour l'association de ces modules. Donc pour une section de  $5.3\text{mm}^2$ , la limite de cette association est de 10 modules, une exception pour cette limitation peut être faite pour un cablage ayant plus grande capacité de transport de courant. voir fig(7).

### I-3-3 ASSOCIATION SERIE-PARALLELE DES MODULES

---

On ne peut faire ce type de branchement que lorsque les modules connectés ont le meme point de fonctionnement optimal, la tension maximale, qui est la somme des tensions des modules en série, et le courant maximum qui est la somme des courants des modules en parallèle. voir fig(8).

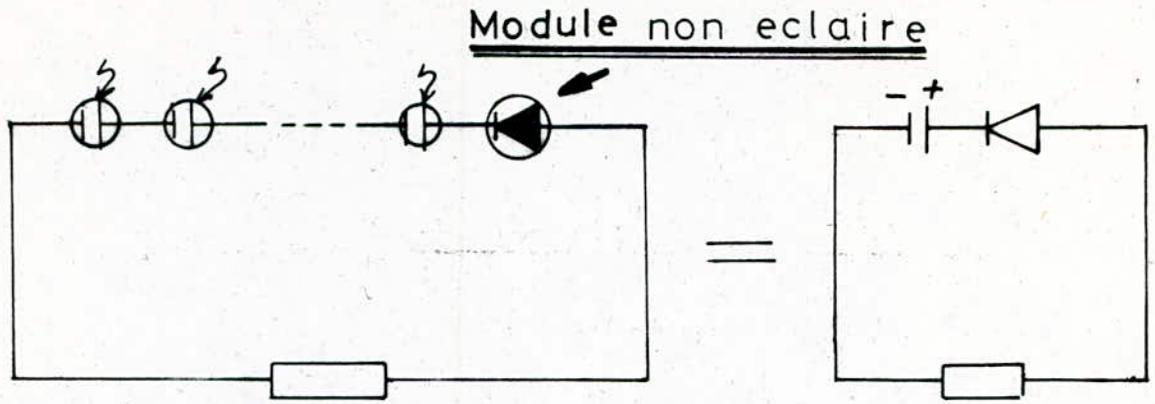


fig 6 ASSOCIATION SERIE

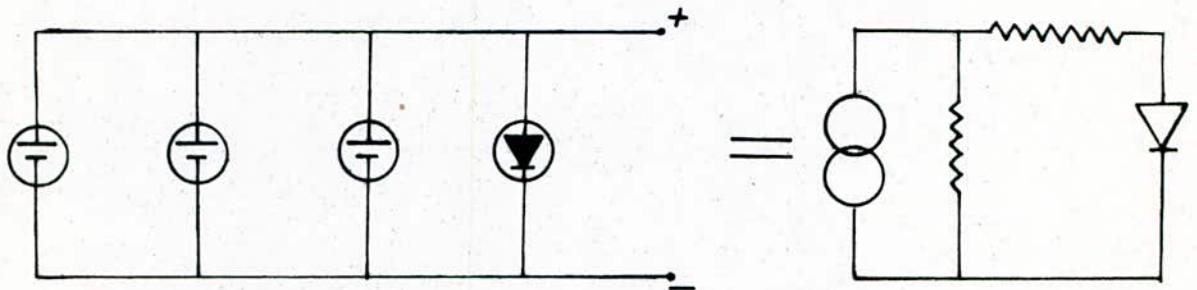


fig 7 ASSOCIATION PARALLELE

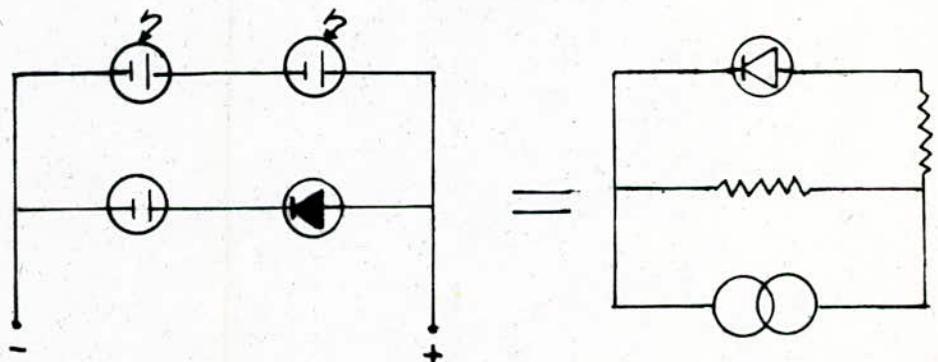


fig 8 ASSOCIATION MIXTE

## CHAPITRE II

\*\*\*\*\*

### ETUDE THEORIQUE DU DESEQUILIBRE DU GENERATEUR PHOTO-VOLTAIQUE

: \*\*\*\*\*

#### II-1 INTRODUCTION

\*\*\*\*\*

Le degré d'échauffement entre les cellules affectées dépend d'un certain nombre de conditions: modules série-parallèle, quantité de flux d'illumination et aussi quantité de surintensité dans les cellules affectées . Dans d'autres, les mesures à l'extérieur peuvent engendrer des variations indésirables sur le mode d'opération du module, ceci est dû aux changements climatologiques( un nuage passant en un temps de 2s peut agir sur le comportement de la cellule ou du module ); une cellule obscurcie agit comme une résistance et absorbe de l'énergie au lieu d'en générer . Pour prévenir ceci, en plus de la diode de protection, il est nécessaire de désigner des cellules d'interconnexion convenables à l'intérieur du module .

#### II-2 DIODE BY-PASS

\*\*\*\*\*

L'occultation des cellules et de fil de modules en série peut causer un voltage inverse aux bornes de la cellule ou du module parceque le courant est forcé de circuler à travers la partie occultée , ceci peut être suivi d'une augmentation de température, utiliser une diode pour contourner la partie occultée peut minimiser cette température ainsi que la réduction du courant de rangée . Chaque module M53 est fourni à l'usine avec des diodes de contournement (BY-PASS) . Par exemple, pour des systèmes de 12v( un module en série ), les diodes installées apportent une protection convenable au circuit, sans la nécessité des diodes additionnelles . Et pour des systèmes de 24v et plus( 2 ou plusieurs modules en série ), le plus simple arrangement est de connecter les modules en fil individuel en série, et puis mettre en parallèle ces fils pour obtenir le courant de rangée nécessaire et enfin placer une diode extérieure autour du groupe afin d'assurer une bonne protection. En effet cette diode doit avoir la capacité de conduire le courant total du groupe en parallèle.

## II-3 SCHEMA EQUIVALENT D'UNE CELLULE SOLAIRE

\*\*\*\*\*

Une photopile est un générateur qui, sous l'action du rayonnement solaire fournit de l'électricité, par effet photo-voltaïque.

Nous représentons la cellule solaire par les deux figures (9) et (10); la figure (9) représente une cellule lors de son fonctionnement sous éclairement et la figure (10) c'est pour une cellule fonctionnant à l'obscurité .

Pour une cellule éclairée les caractéristiques I(V) sont données par la formule :

$$I = -I_0 \left( \exp \left( \frac{q(V + R_s I)}{n \cdot K \cdot T} \right) - 1 \right) + \frac{V}{R_p} + I_{ph} .$$

ou  $I_0$  représente le courant de saturation .

$I_{ph}$  est le courant de photopile (Photocourant)

$R_s$  Résistance série .  $R_p$  : Résistance parallèle .

$K$  Nombre de Boltzman .  $n$  : coefficient d'idéalité .

$T$  Température

Et pour une cellule non éclairée (obscurcie), la formule donnant les caractéristiques I(V) est:

$$I = I_0 \left( \exp \left( \frac{q(V - R_s I)}{n \cdot K \cdot T} \right) - 1 \right) + \frac{V}{R_p} .$$

Nous remarquons dans cette formule qu'il n'y a pas de photocourant .

## II-4 PARAMETRES CARACTERISTIQUES

\*\*\*\*\*

### II-4-1 RESISTANCE SERIE

Elle est due aux contacts des électrodes avec le semi-conducteur ainsi qu'à la résistance interne de ce dernier .

La résistance due aux contacts des électrodes avec le semi-conducteur est négligeable, par contre celle due à la couche de diffusion ne peut être réduite que si en déposant une fine grille conductrice sur la couche antérieure éclairée celle-ci doit avoir une couche épaisse; en effet, une grande partie des charges libérées à la surface et dans un voisinage immédiat n'atteignent la jonction que

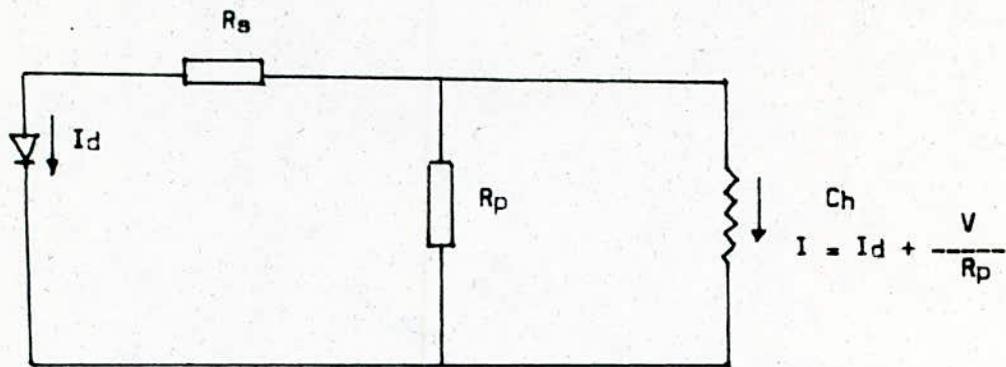


fig 9 Shéma équivalent d'une cellule sans éclairnement

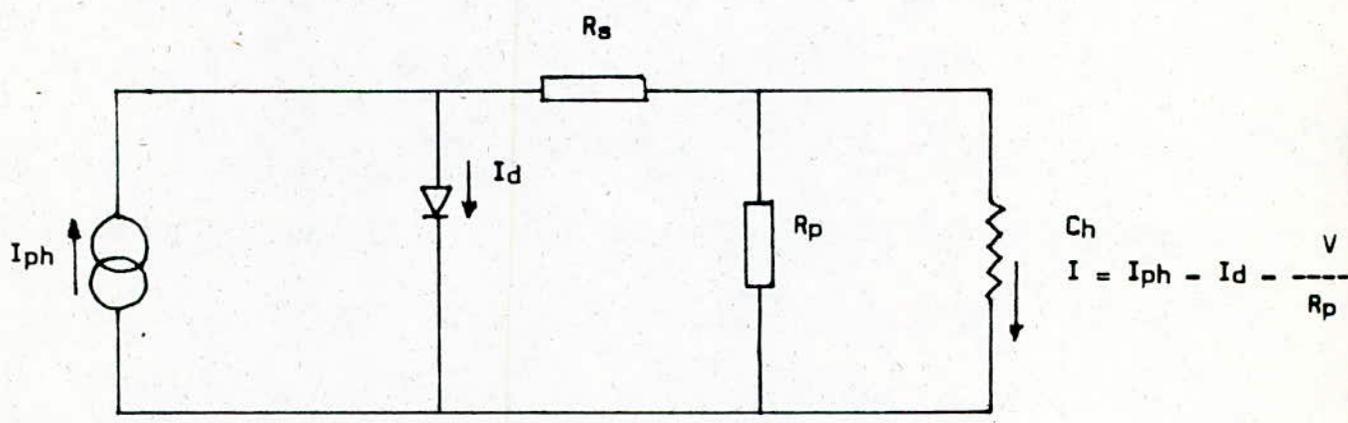


fig 10 Shéma équivalent d'une cellule sous éclairnement

si la région antérieure est très mince, parallèlement sa résistance augmente il en résulte une épaisseur optimale de cette région .

\* Détermination de la résistance série "Rs"

A partir de la caractéristique courant-tension d'une cellule, nous pouvons déterminer sa résistance série .

$$R_s = \frac{\frac{K.T}{q} \text{LOG} \left( 1 + \frac{I_{ph} - I}{I_0} \right) - V}{I}$$

II-4-2 RESISTANCE SCHUNT

Elle est due aux effets de surface de la cellule à la présence des fissures sur la surface, elle devient le siège de flux physique assimilable à une résistance au niveau de la jonction. Le flux est nuisible et cette résistance augmente lorsque la cellule est sous éclairement.

II-5 RESULTATS ET COURBES THEORIQUES

\*\*\*\*\*

NOUS supposons le cas d'une cellule idéale :  $R_s = 0$  et  $R_p = \infty$

a) Cellule soumise sous éclairement

La caractéristique  $I(V)$  est donnée par :

$$I = -I_0 \left( \exp \frac{q.V}{n.K.T} - 1 \right) + I_{ph} \quad \text{Voir courbe fig(11 a)}$$

Et la caractéristique  $P(V)$  est donnée par :  $P = V.I$  Voir fig(13)<sub>a</sub>

b) Cellule à l'obscurité

Dans ce cas il n'y a pas de courant de photopile,  $I_{ph} = 0$  et la caractéristique  $I(V)$  est donnée par :

$$I = I_0 \left( \exp \frac{q.V}{n.K.T} - 1 \right) \quad \text{Voir fig (12 b)}$$

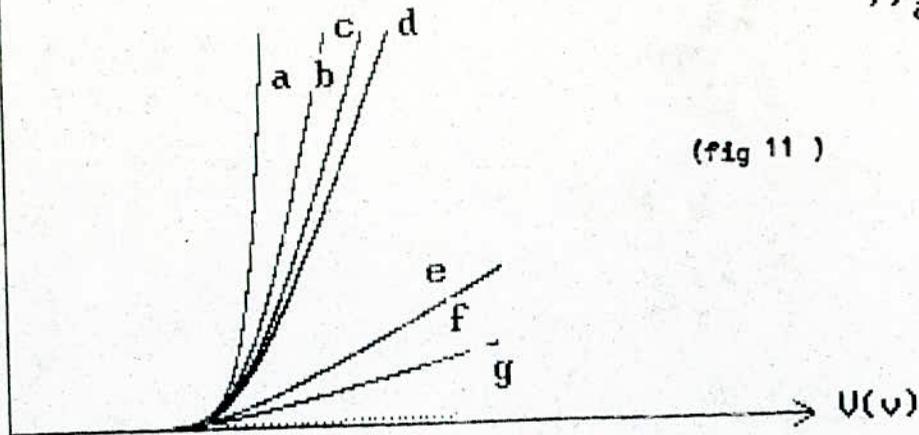
La caractéristique  $P(V)$  est donnée par la même formule précédente, voir fig(14 a).

\* Influence de la résistance série "Rs"

I(A)

(courbe  $I=f(U_1)$  d'une cellule solaire  
"à l'obscurité")

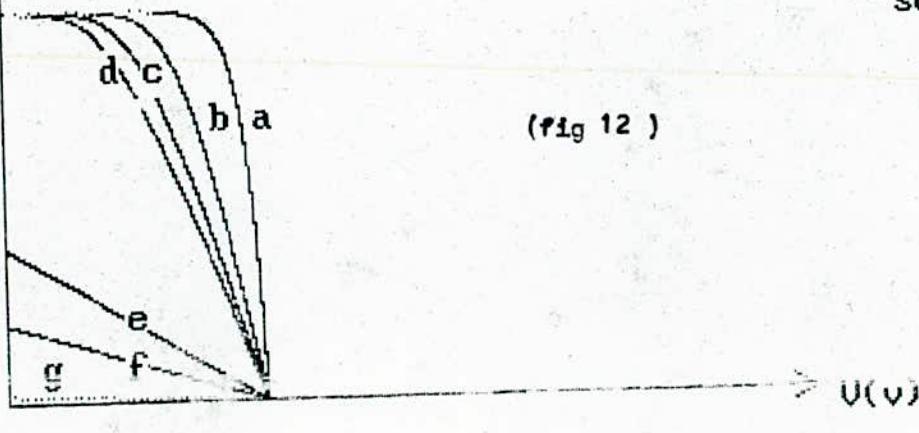
(fig 11)



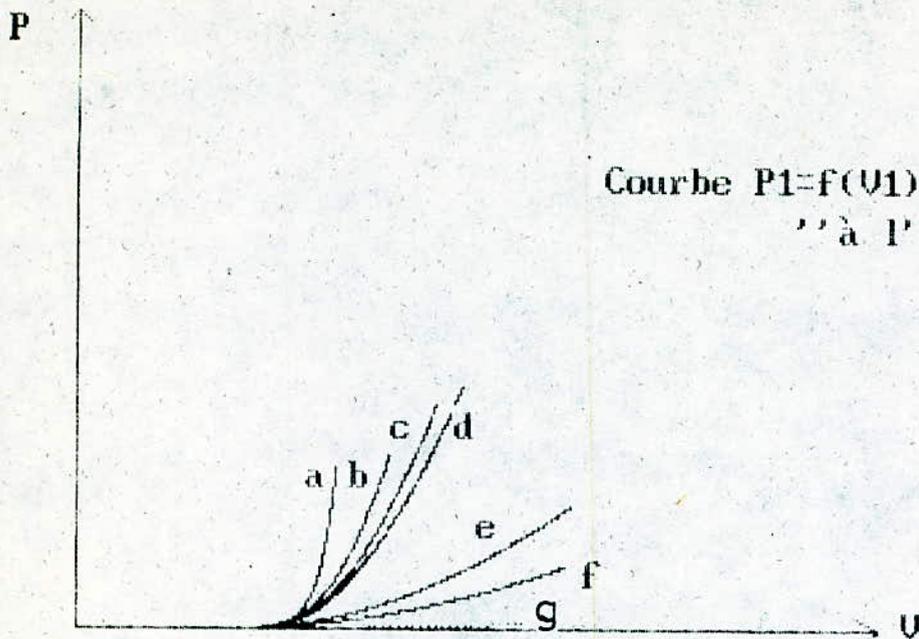
I(A)

Courbe  $I=f(U_2)$  d'une cellule solaire  
"sous éclairement"

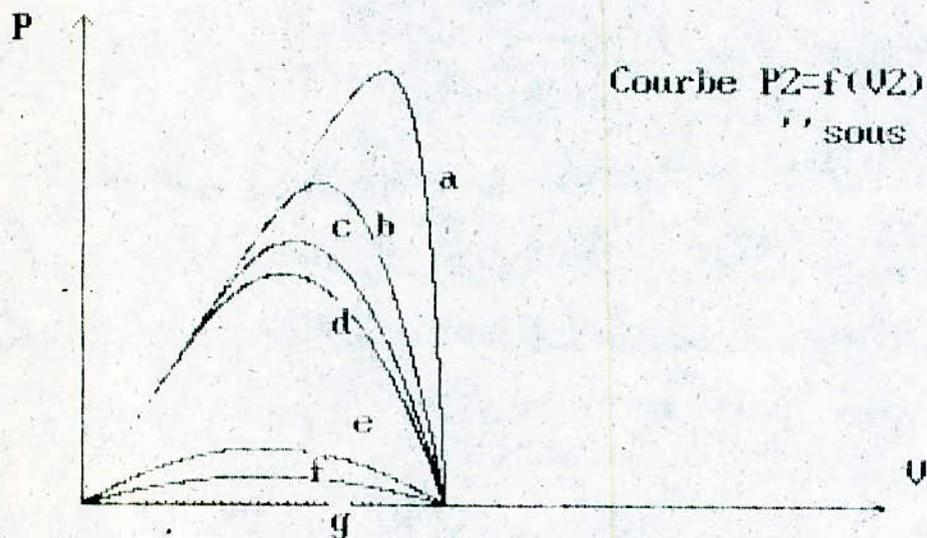
(fig 12)



- a)  $R_s = 0$
- b)  $R_s = 0,0005$
- c)  $R_s = 0,0008$
- d)  $R_s = 0,001$
- e)  $R_s = 0,005$
- f)  $R_s = 0,01$
- g)  $R_s = 0,1$



Courbe  $P_1=f(U_1)$  d'une cellule solaire  
"à l'obscurité"



Courbe  $P_2=f(U_2)$  d'une cellule solaire  
"sous éclairciment"

a)  $R_s = 0$

b)  $R_s = 0,0005$

e)  $R_s = 0,005$

c)  $R_s = 0,0008$

f)  $R_s = 0,01$

d)  $R_s = 0,001$

g)  $R_s = 0,1$

a) Cellule soumise sous éclairnement

La caractéristique I(V) est donnée par :

$$V = \frac{n \cdot K \cdot T}{q} \text{ LOG } \frac{I_{ph} - I + I_0}{I_0} - R_s \cdot I \quad \cdot \text{ voir fig (12) courbes b,c,d,e,f,g}$$

Le courant  $I_0$  est donné par :

$$I_0 = I_0 / \left( \exp \frac{q \cdot V_{co}}{2 \cdot K \cdot T} - 1 \right) \quad \text{ou } V_{co} \text{ est la tension du circuit ouvert}$$

b) Cellule à l'obscurité

La formule donnant I(V) est :

$$V = \frac{n \cdot K \cdot T}{q} \text{ LOG } \frac{I + I_0}{I_0} + R_s \cdot I \quad \cdot \text{ Voir fig (11) courbes: b,c,d,e,f,g}$$

Les caractéristiques P(V) sont données par la formule:  $P = V \cdot I$ , et elles sont représentées pour chaque cas par les figures (14) et (13).

Les données pour une cellule sont :

$$q = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ coulomb}$$

$$n = 1.$$

$$K = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ j / } ^\circ\text{K}$$

$$T = 16^\circ\text{C} = 289^\circ\text{K}.$$

$$I_{ph} = 190 \text{ mA}.$$

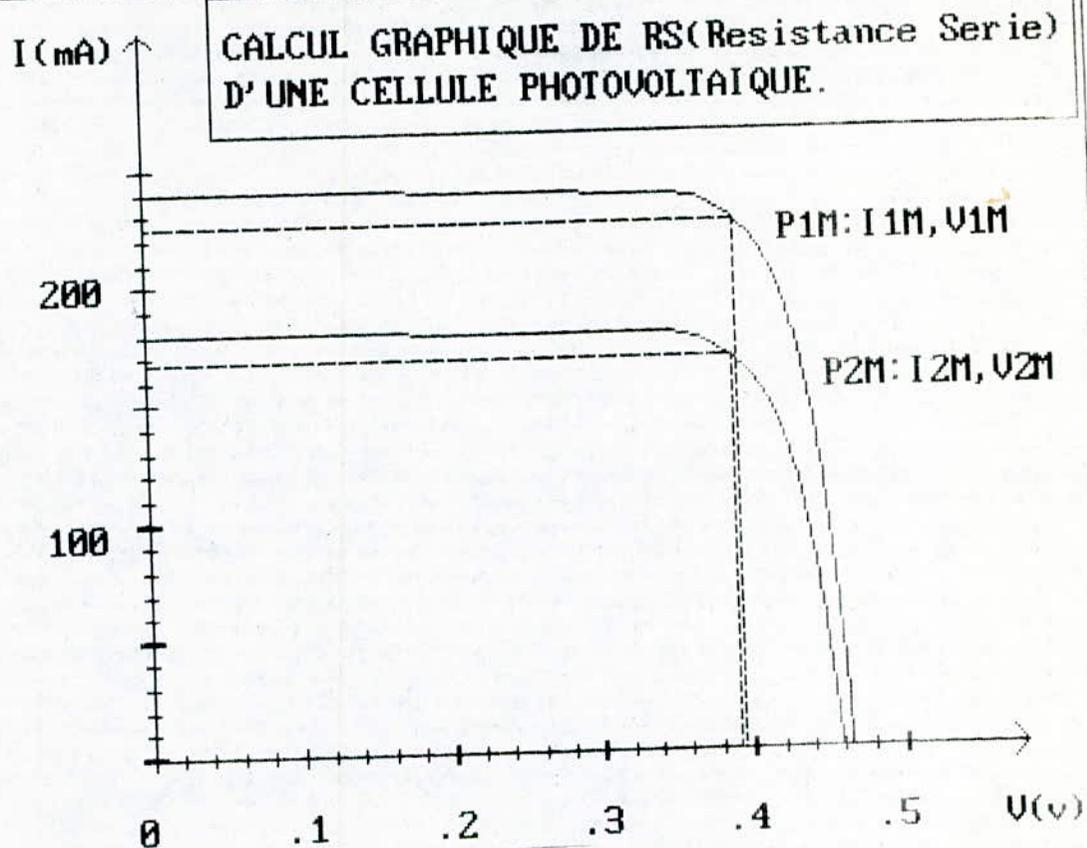
REMARQUE

\*\*\*\*\*

Il existe une autre méthode pour la détermination de la résistance série  $R_s$ , c'est une méthode graphique, la résistance  $R_s$  est directement donnée, à partir des caractéristiques I(V), par la formule:

$$R_s = \frac{V_{1M} - V_{2M}}{I_{cc1} - I_{cc2}}$$

Nous donnons un modèle de simulation numérique (voir listing en Annexe ), les résultats obtenus apparaissent sur la figure (15).



( fig 15 )

$P1M = 89.05 \text{ mw}$     $I1M = 225.59 \text{ A}$     $U1M = .3947502 \text{ v}$     $I_{cc1} = 240 \text{ mA}$   
 $P2M = 65.55 \text{ mw}$     $I2M = 168 \text{ A}$     $U2M = .3901919 \text{ V}$     $I_{cc2} = 180 \text{ mA}$   
 $RS = (U1M - U2M) / (I_{cc1} - I_{cc2}) = 75.97159 \text{ mOHM}$

INTERPRETATION (Résultats de simulation )  
\*\*\*\*\*

Les valeurs théoriques et expérimentales sont en assez bonne concordance, ce qui est très remarquable sur l'allure des courbes , exemple: courbe de la figure(12a) avec celle de la figure(17-1.a) .

Les données obtenues expérimentalement indiquent que l'occultation partielle systématique des modules photo-voltaiques peut induire des contraintes thermo-électriques assez grandes , susceptibles de créer des points chauds "HOT SPOT" d'où une détérioration des cellules solaires , ceci figure sur les courbes, exemple : figure(17.2b) avec la figure(17-2.c) , nous remarquons , en comparant ces deux courbes avec les courbes précédentes , une chute de tension , qui est d'ûe aux modules cachés qui deviennent récepteurs (au lieu de fournir de l'énergie , ils en absorbent ) .

Nous remarquons aussi, que plus le nombre de modules occultés est augmenté, plus nous diminuons le flux lumineux reçu , et plus la puissance fournie par le générateur photo-voltaique diminue ceci était en l'absence de la résistance série(  $R_s$  ) , mais lorsque cette dernière apparait , la diminution de la puissance devient importante .

CHAPITRE III  
\*\*\*\*\*

ETUDE EXPERIMENTALE DU DESEQUILIBRE DU GENERATEUR PHOTO-VOLTAIQUE  
\*\*\*\*\*

III-1 INTRODUCTION  
\*\*\*\*\*

Dans un groupement de modules, lorsque les valeurs nominales des tensions ou des courants d'un ou de plusieurs modules varient sensiblement, le fonctionnement s'inverse, et le module peut devenir récepteur, et dans ce cas nous disons qu'il y a déséquilibre. L'éclairement diminue, ce qui fait diminuer la puissance délivrée par le module occulté .

Nous avons vu dans le chapitre précédent, les variations du courant et de la puissance en fonction de la tension, pour une cellule solaire. D'une part lorsque cette cellule était occultée, et d'autre part lorsqu'elle était soumise sous éclairement:

Dans ce chapitre, nous allons traiter expérimentalement ces variations  $I(V)$  et  $P(V)$  pour un module ou plus associés différemment, afin de donner une interprétation sur les caractéristiques de puissance.

III-2 MANIPULATION  
\*\*\*\*\*

Le montage utilisé pour cette manipulation est donné par la figure ( )  
Nous effectuerons le déséquilibre électrique du générateur photo-voltaïque, par occultation d'un ou de plusieurs modules avec un couvert noir du type papier photographique .

III-3 ESSAIS ET RESULTATS EXPERIMENTAUX  
\*\*\*\*\*

Les résultats obtenus sont donnés sous forme de tableaux récapitulatifs. Ainsi que les courbes correspondantes pour chaque cas considéré.

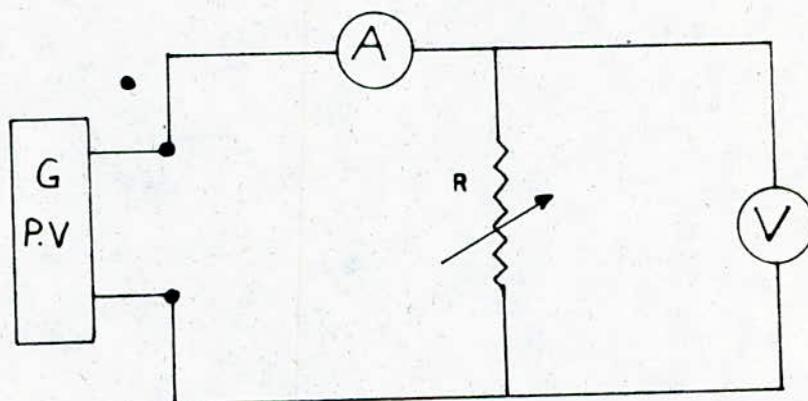
III-3-1 RESULTATS SOUS FORME DE TABLEAUX

III-3-1.1 Association série des modules

Tableau 1: Cas d'un seul module éclairé

Schéma utilisé pour la mesure des caractéristiques

COURANT-TENSION



R: résistance variable

G.P.V. : générateur photo-voltaïque

V	0	3.5	5	9.5	12.5	14	15	16
I	2.65	2.6	2.55	2.52	2.45	2.22	1.98	1.83
P	0	9.1	12.75	23.94	30.62	31.08	29.70	29.28

16.5	17	17.5	18	18.5
1.44	1.13	0.98	0.60	0
23.76	19.21	17.15	10.80	0

Tableau 2: Cas de deux modules en série éclairés uniformément

V	0	3.5	6.5	9.5	12.8	18.5	21.5	24.5
I	2.55	2.54	2.52	2.51	2.5	2.49	2.46	2.44
P	0	8.89	16.38	23.84	32.0	45.68	52.89	59.78

26.6	28.20	30.0	31.0	32.0	33.0	34.0	35.0
2.36	2.26	2.80	1.95	1.70	1.50	1.25	0.0
62.77	63.73	84.0	60.45	54.40	49.50	42.50	0.0

Tableau 3: Cas de trois modules en série éclairés uniformément

V	0.0	5.4	16.0	18.0	36.0	41.5	43.0	43.5
I	2.4	2.3	2.37	2.35	2.3	2.2	2.15	2.1
P	0.0	12.42	37.92	42.30	82.80	91.30	92.45	91.3

44.3	45.0	45.7	46.0	47.0	48.0	50.0	54.0	56.5
2.05	2.0	1.95	1.9	1.8	1.7	1.35	0.5	0.0
90.81	90.0	89.11	87.40	44.60	81.60	67.50	27.0	0.0

Tableau 4: Cas de trois modules en série dont un module est occulté

V	0.0	14.5	17.0	19.0	20.5	21.7	22.5	23.2
I	2.3	2.25	2.2	2.1	2.0	0.19	0.18	0.17
P	0.0	32.62	37.40	39.90	41.0	4.12	4.05	3.94

24.5	25.0	26.0	27.0	27.2	27.5	28.0	28.7	29.0
0.15	0.14	0.12	0.1	0.085	0.075	0.065	0.05	0.0
36.75	35.0	3.12	2.7	2.31	2.06	1.82	1.43	0.0

Tableau 5: Cas de trois modules en série dont deux modules sont occultés

V	0.0	0.8	1.2	1.6	1.8	2.0	2.48	3.0
---	-----	-----	-----	-----	-----	-----	------	-----

I	1.21	1.0	0.9	0.8	0.75	0.7	0.6	45
P	0.0	0.8	1.08	1.28	1.35	1.40	1.49	1.35

3.5	3.8	4.1	4.8	5.0	5.2	5.6	6.0	31.0
0.35	0.3	0.25	0.16	0.14	0.12	0.10	0.08	0.0
1.22	1.14	0.9	0.77	0.7	0.62	0.56	0.48	0.0

### III-3-1.2 Association parallèle des modules

Tableau 1: Cas de deux modules en parallèle éclairés uniformément

V	0.0	7.3	12.5	13.5	14.0	15.0	15.2	15.5
I	3.95	3.9	3.8	3.7	3.6	3.4	3.3	3.2
P	0.0	28.47	47.5	49.95	50.4	51.0	50.16	49.6

15.9	16.4	16.6	16.9	17.4	18.0	18.2	18.5	19.0
3.0	2.8	2.5	2.4	2.0	1.4	1.0	0.6	0.0
47.7	45.92	41.50	40.56	34.8	25.2	18.2	11.1	0.0

Tableau 2: Cas de deux modules en parallèle dont un module est occulté

V	0.0	10.5	12.4	13.5	13.7	14.5	15.2	15.6
I	1.9	1.85	1.8	1.75	1.7	1.6	1.5	1.4
P	0.0	19.42	22.5	23.6	23.29	23.20	22.8	21.84

16.0	16.5	17.0	17.5	17.6	18.0	18.1	18.2	18.5
1.35	1.1	0.9	0.65	0.6	0.4	0.25	0.15	0.0
21.6	18.15	15.3	11.37	10.56	7.2	4.52	2.73	0.0

III-3-1.3 Association mixte de quatre modules

Tableau 1: Cas de quatre modules éclairés uniformément

V	0.0	26.9	30.8	31.9	32.9	33.5	34.0	35.0
I	4.15	4.0	3.5	3.3	3.0	2.8	2.5	2.0
P	0.0	107.6	107.80	105.27	98.7	93.8	85.0	70.0

36.0	36.1	36.5	35.8	37.0	37.1	37.15	37.2	38.0
1.4	1.25	1.0	0.9	0.75	0.7	0.6	0.55	0.0
50.4	45.12	36.5	33.12	27.75	25.9	22.26	20.46	0.0

Tableau 2: Cas où l'un des modules est occulté

V	0.0	5.8	8.4	9.8	10.7	11.4	13.0	17.2
I	4.5	3.9	3.5	3.0	2.5	2.3	2.1	2.05
P	0.0	22.62	29.4	29.4	26.75	26.22	27.3	35.26

24.6	26.1	28.0	30.0	31.0	31.2	31.6	32.0	33.0
------	------	------	------	------	------	------	------	------

2.0	1.95	1.9	1.77	1.7	1.65	1.6	1.55	1.4
40.2	52.26	53.2	53.1	52.7	51.48	50.56	49.6	46.2

33.5	34.0	34.8	35.0	35.4	35.8	36.0	36.2	37.4
1.3	1.2	0.92	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.0
43.55	40.8	32.36	31.5	28.32	25.06	21.6	18.1	0.0

Tableau 3: Cas ou deux modules sont occultés

V	0.0	6.2	7.0	8.2	8.7	9.7	10.0	10.5
I	3.8	3.5	3.3	2.8	2.5	1.7	1.5	1.1
P	0.0	21.7	23.1	22.96	21.75	16.49	15.0	11.55

11.0	11.1	11.4	11.5	11.8	12.0	12.4	12.5	25.6
0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.19	0.18	0.0
8.8	7.77	6.84	5.75	4.72	3.6	2.35	2.25	0.0

Tableau 4: Cas ou trois modules sont occultés

V	0.0	5.85	7.35	8.35	9.10	9.60	10.0	10.20
I	1.84	1.70	1.50	1.25	1.00	0.85	0.71	0.65
P	0.0	9.94	11.02	10.43	9.10	8.16	7.10	6.63

10.35	10.55	10.95	11.30	11.50	11.55	11.60	11.80	23.60
0.6	0.5	0.4	0.3	0.23	0.21	0.20	0.17	0.0
6.21	5.27	4.38	3.45	2.64	2.42	2.32	2.0	0.0

III-3-1.4 Association mixte de deux panneaux (24 Modules )

Tableau 1: Cas de deux panneaux éclairés

V	0.0	45.0	113.0	140.0	146.0	150.0	160.0	165.0
I	5.45	5.10	5.0	4.95	4.8	4.7	4.7	4.6
P	0.0	229.5	565.0	693.0	708.0	705.0	752.0	742.0

170.0	175.0	179.0	184.0	186.0	190.0	192.0	195.0	215.0
4.5	4.3	4.1	3.8	3.6	3.3	3.0	2.8	0.0
765.0	752.5	733.9	699.2	669.6	627.0	576.0	546.0	0.0

Tableau 2: Cas ou un groupe de six modules est occulté

V	0.0	30.0	35.0	45.0	55.0	65.0	72.0	128.0
I	4.95	4.8	4.5	4.0	3.4	3.0	2.9	2.5
P	0.0	144.0	157.5	180.0	187.0	195.0	208.8	320.0

166.0	175.0	180.0	185.5	190.5	195.0	200.0	204.0	215.0
2.4	2.4	2.3	2.1	1.9	1.7	1.4	1.1	0.0
<b>398.4</b>	420.0	414.0	389.55	361.95	331.5	280.0	224.4	0.0

Tableau 3: Cas où ~~trois~~ groupes de six modules sont occultés

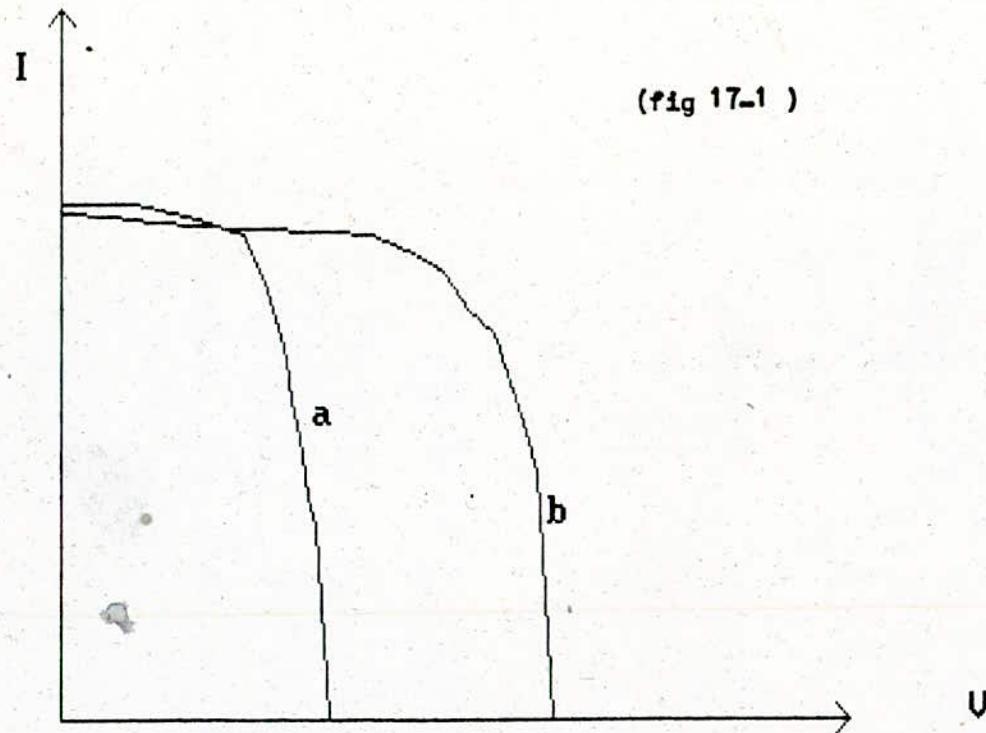
V	0.0	15.7	31.0	44.0	50.5	62.0	69.5	76.5
I	2.6	2.5	2.4	2.35	2.3	2.25	2.2	2.0
P	0.0	39.25	74.4	103.4	116.15	139.5	152.9	153.0

87.0	92.0	96.2	103.0	107.5	112.0	118.0	122.0	211.0
1.9	1.7	1.5	1.2	0.9	0.8	0.7	0.65	0.0
165.3	156.4	144.3	123.6	94.96	89.6	82.6	79.3	0.0

Tableau 4: Cas où ~~deux~~ groupes de six modules sont occultés

V	0.0	30.0	38.5	50.3	61.5	73.0	76.0	80.0
I	4.8	4.5	4.0	3.0	2.8	2.5	2.15	1.7
P	0.0	135.0	154.0	168.9	172.0	182.5	163.4	136.0

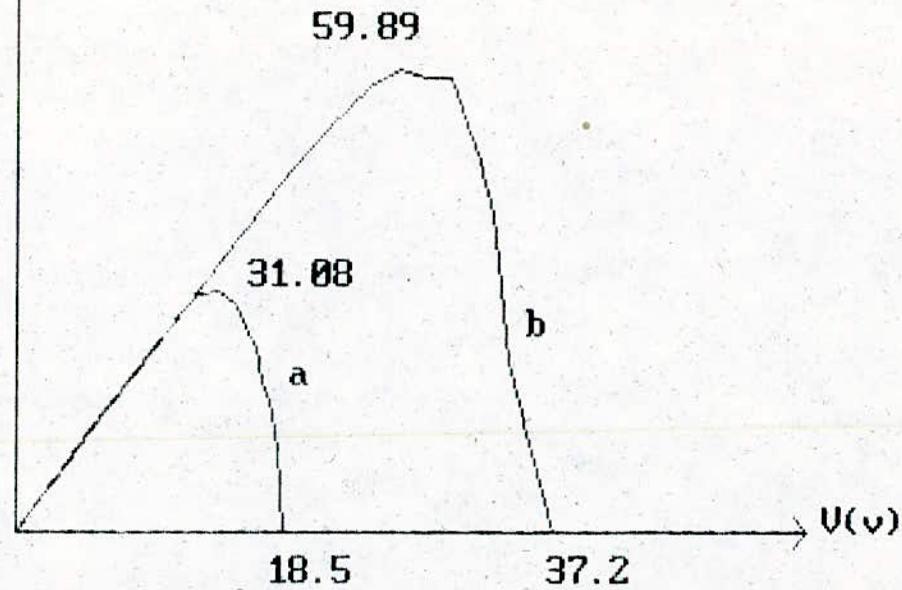
82.0	83.5	87.0	88.0	90.0	93.0	97.0	101.0	210.0
1.5	1.3	1.0	0.9	0.8	0.7	0.6	0.55	0.0
123.0	108.55	87.0	79.2	72.0	65.1	58.2	55.5	0.0



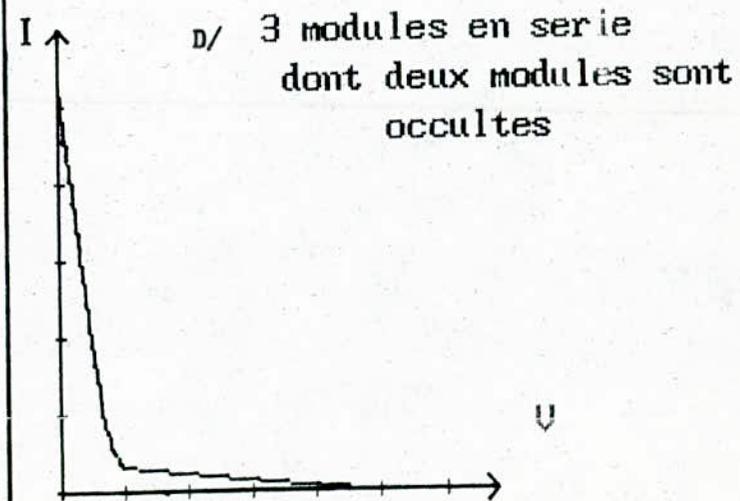
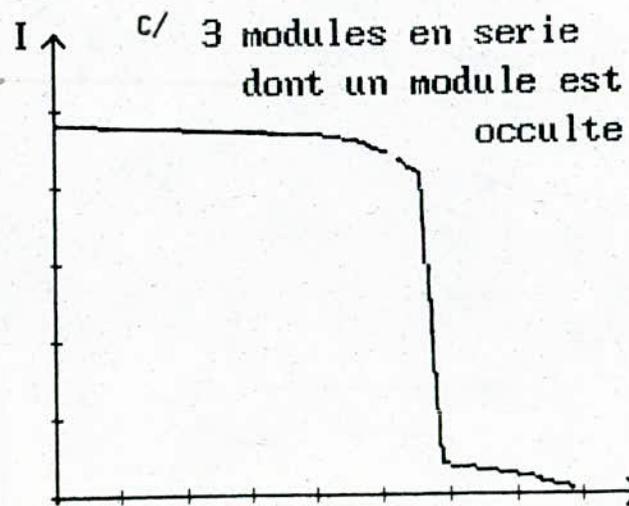
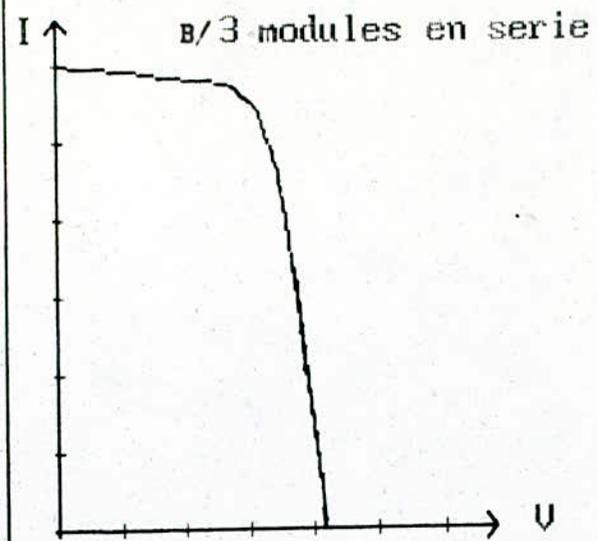
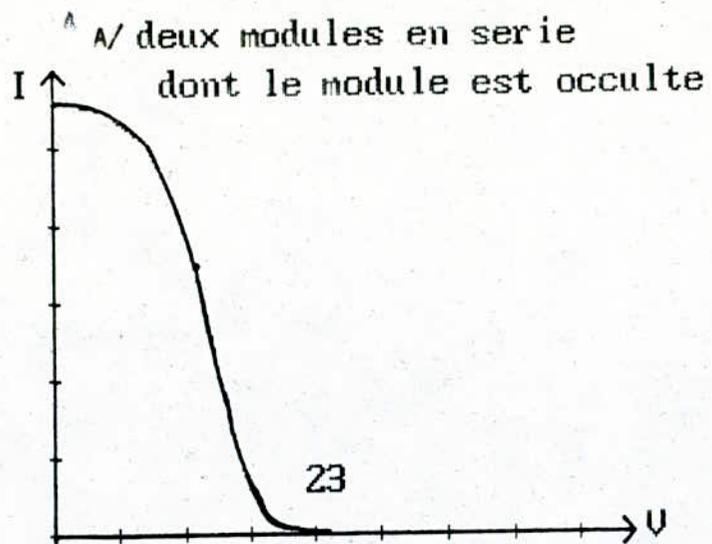
a: courbe experimentale  $I(U)$  pour un module eclaire  
b: courbe experimentale  $I(U)$  pour 2 modules eclaires

$P(U)$

(fig 17-1')

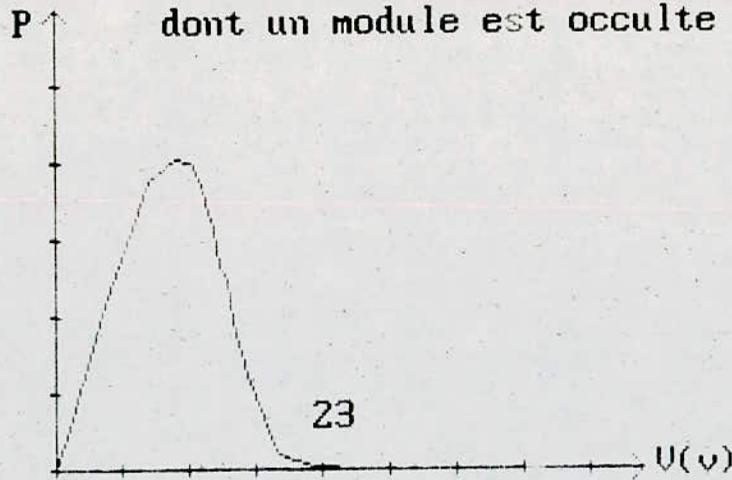


a: courbe experimentale  $P(U)$  pour un module eclaire  
b: courbe experimentale  $P(U)$  pour 2 modules eclaires

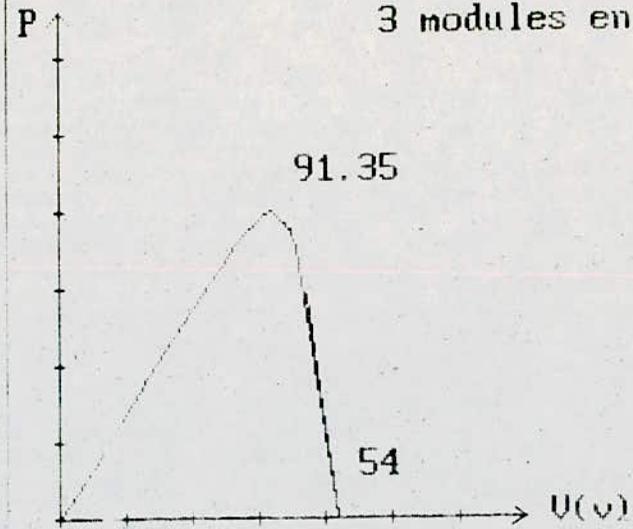
courbes  $I(U)$  experimentales

courbes P(U) experimentales

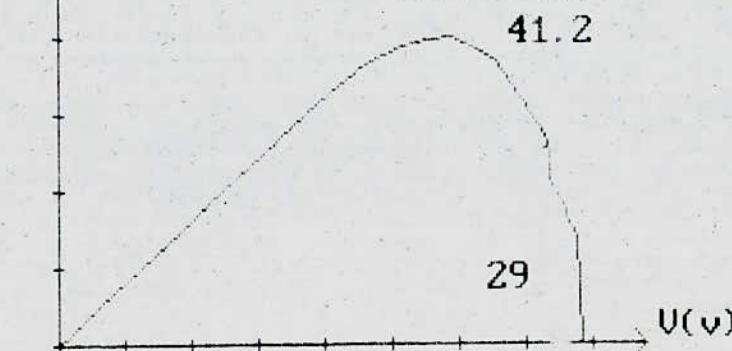
deux modules en serie  
dont un module est occulte



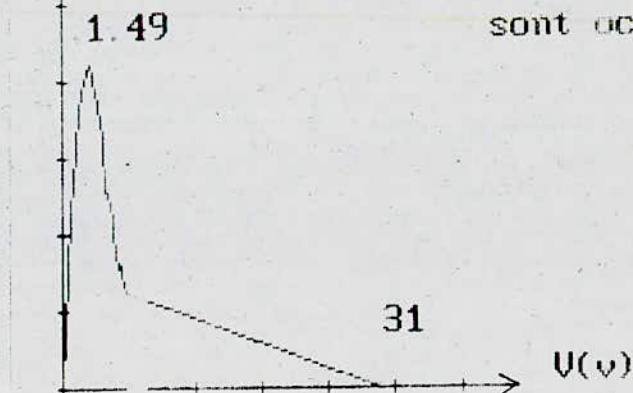
3 modules en serie



3 modules en serie  
dont un module  
est occulte

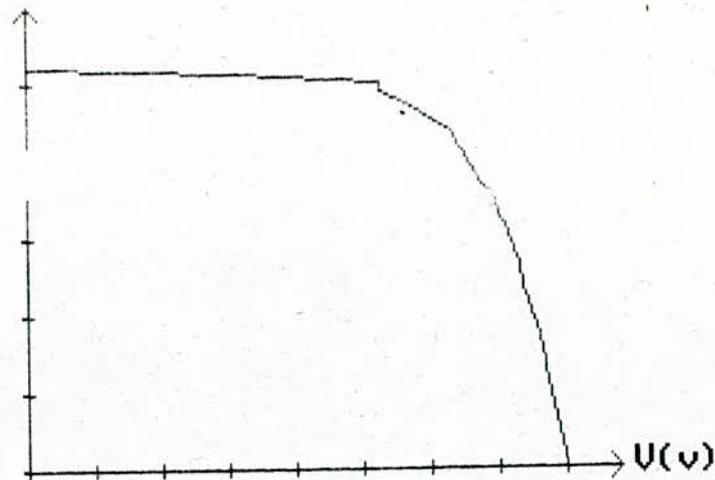


3 modules en serie  
dont deux modules  
sont occultes

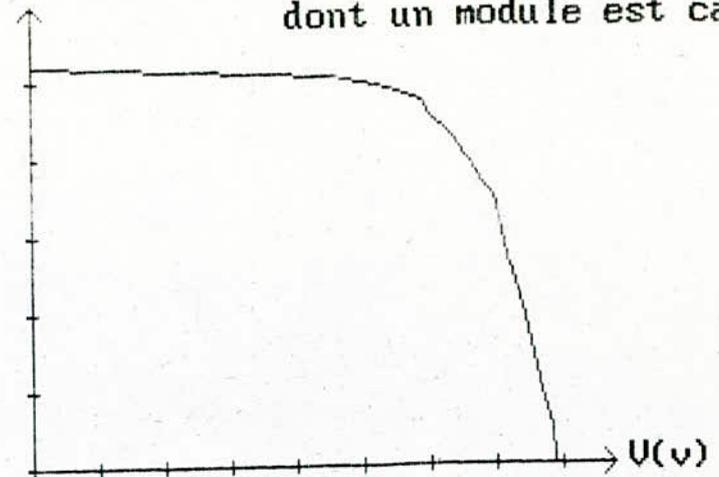


courbes I(U) experimentales (fig 19)

I(A) A/ 2 modules en parallele

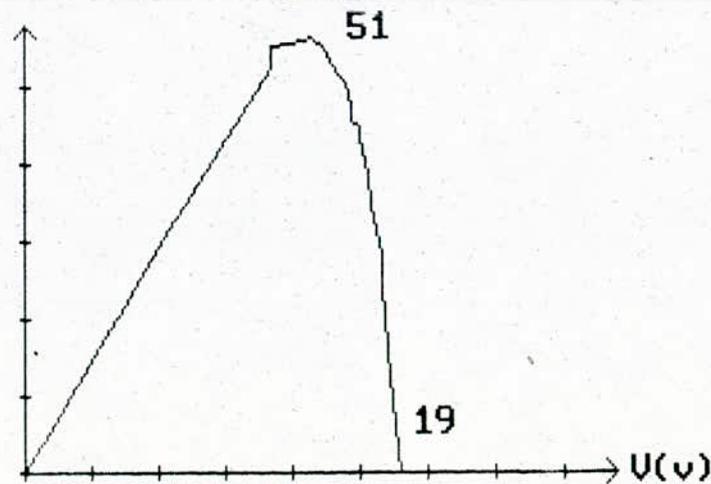


I(A) B/ 2 modules en parallele  
dont un module est cache

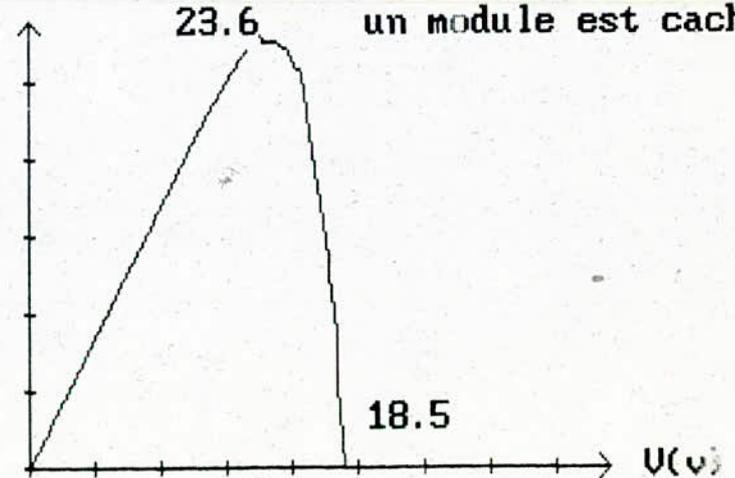


courbes P(U) experimentales

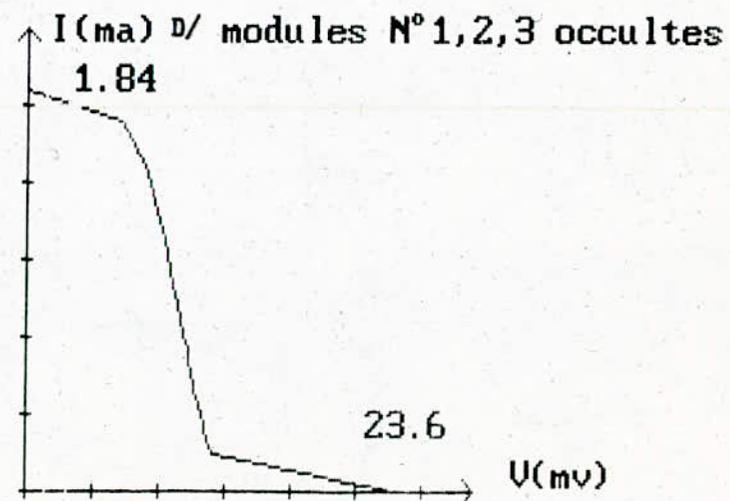
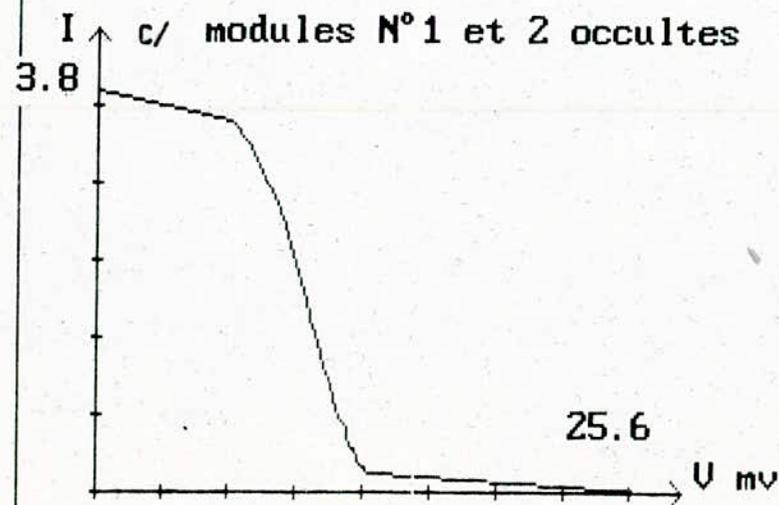
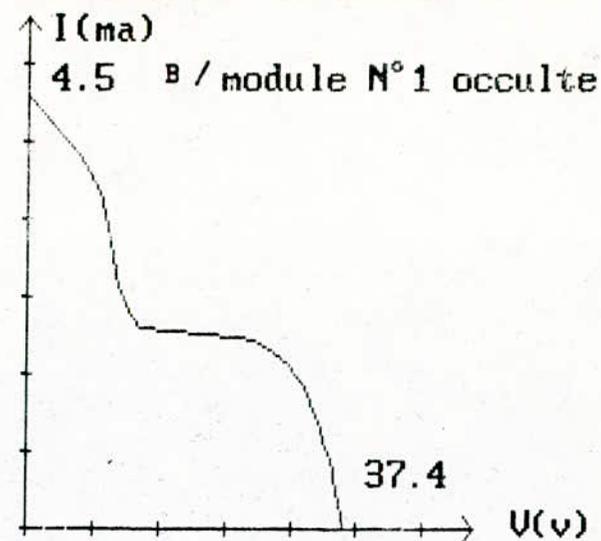
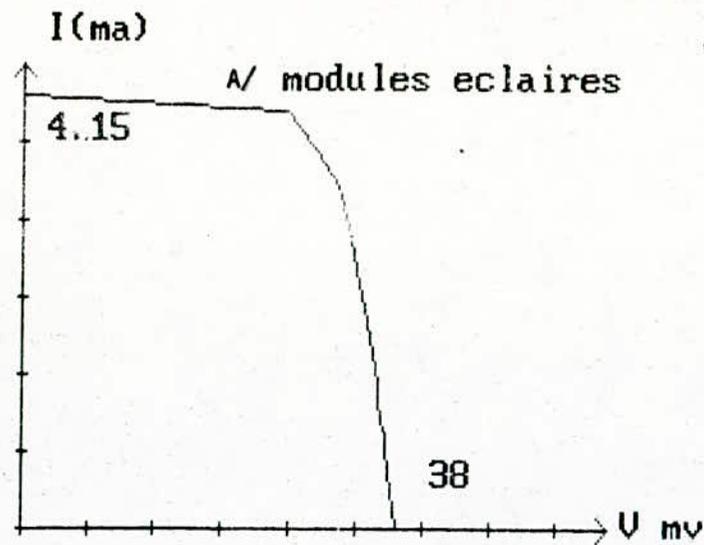
P(w) c/ 2 modules en parallele



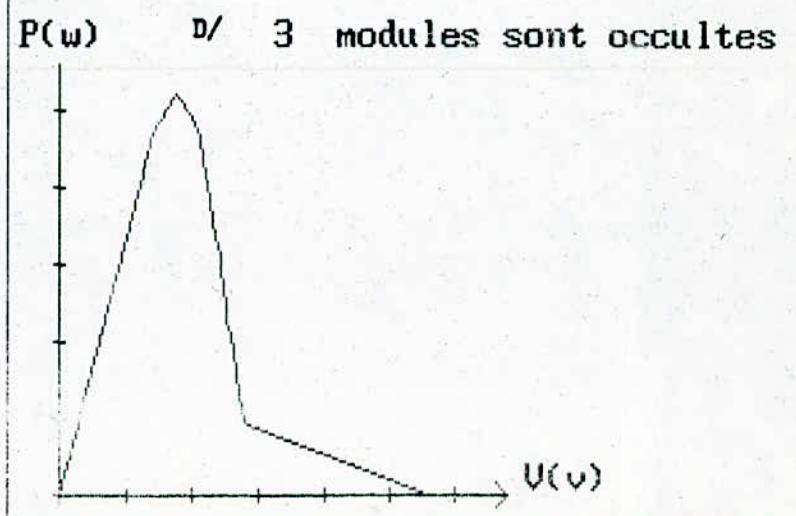
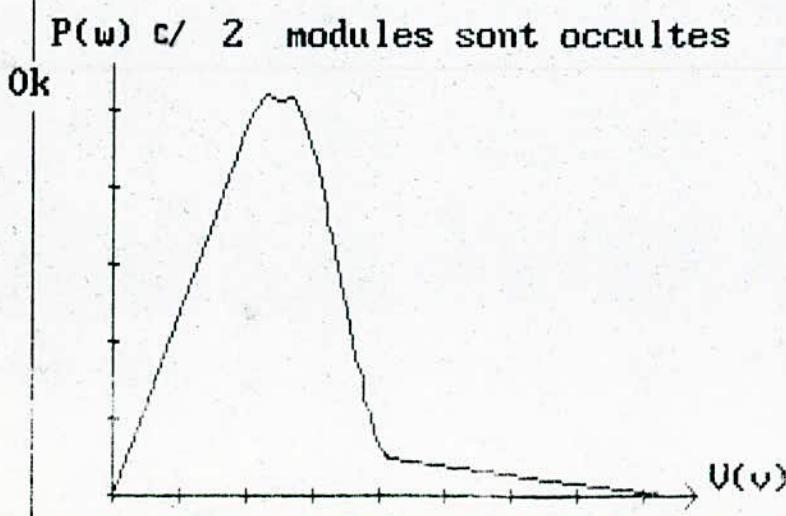
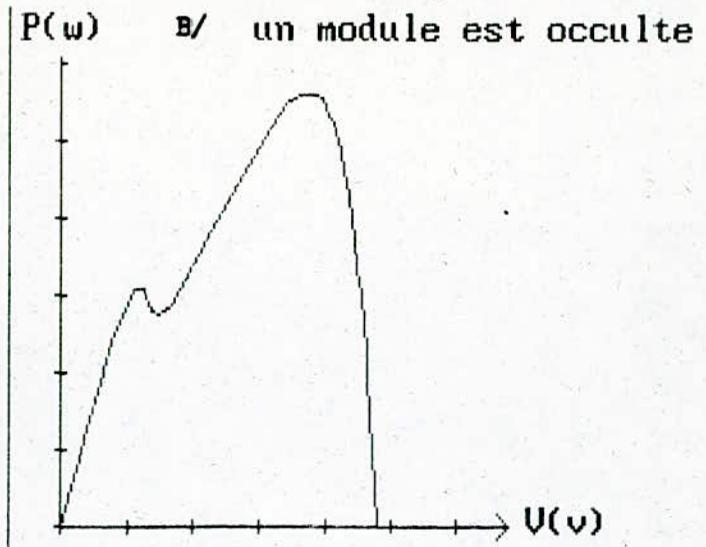
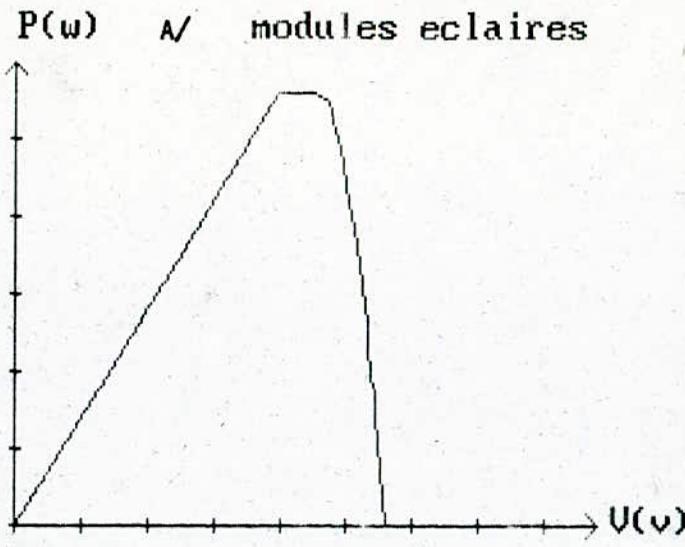
P(w) d/ 2 modules en parallele  
dont un module est cache



courbes I(U) experimentales  
association mixte des modules (1,2,3,4) (fig 21)



courbes  $P(U)$  experimentales  
association mixte de 4 modules (fig 22)

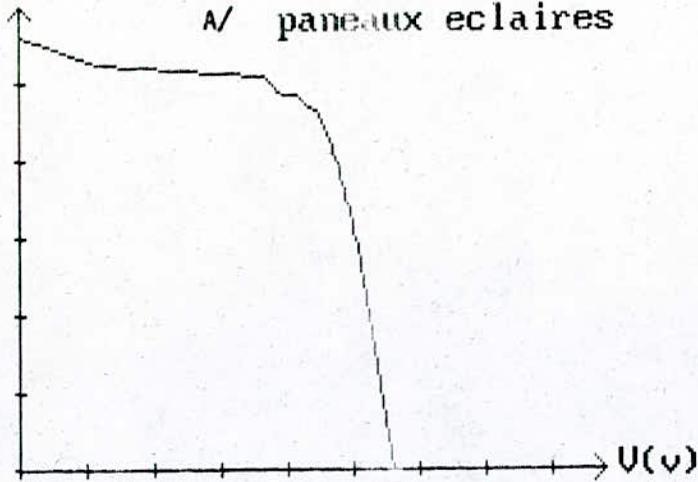


Ok

courbes  $I(U)$  expérimentales  
association des 2 panneaux solaires (FIG 23)

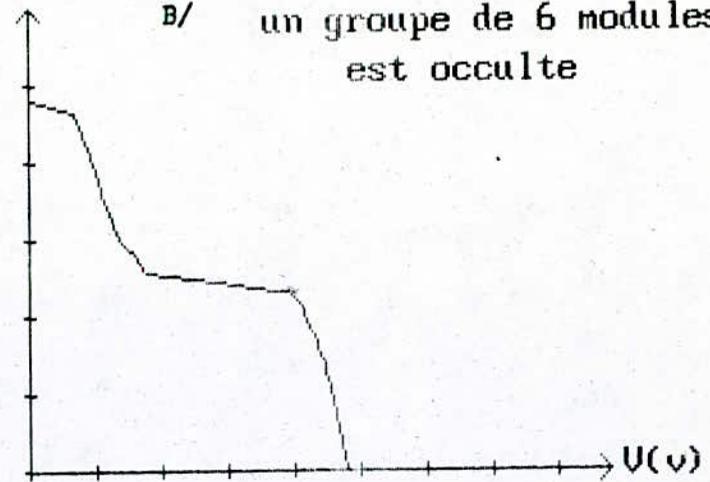
$I(A)$

A/ panneaux eclaires



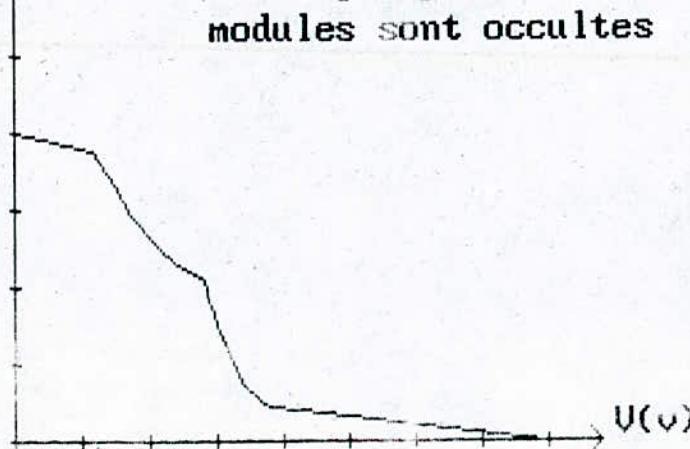
$I(A)$

B/ un groupe de 6 modules est occulte



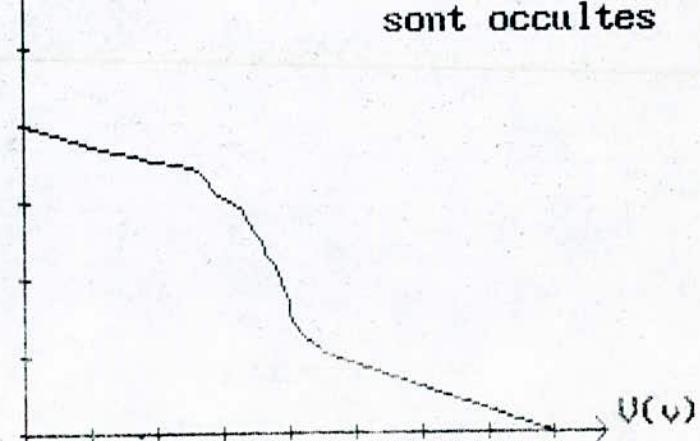
$I$

C/ deux groupes de 6 modules sont occultes

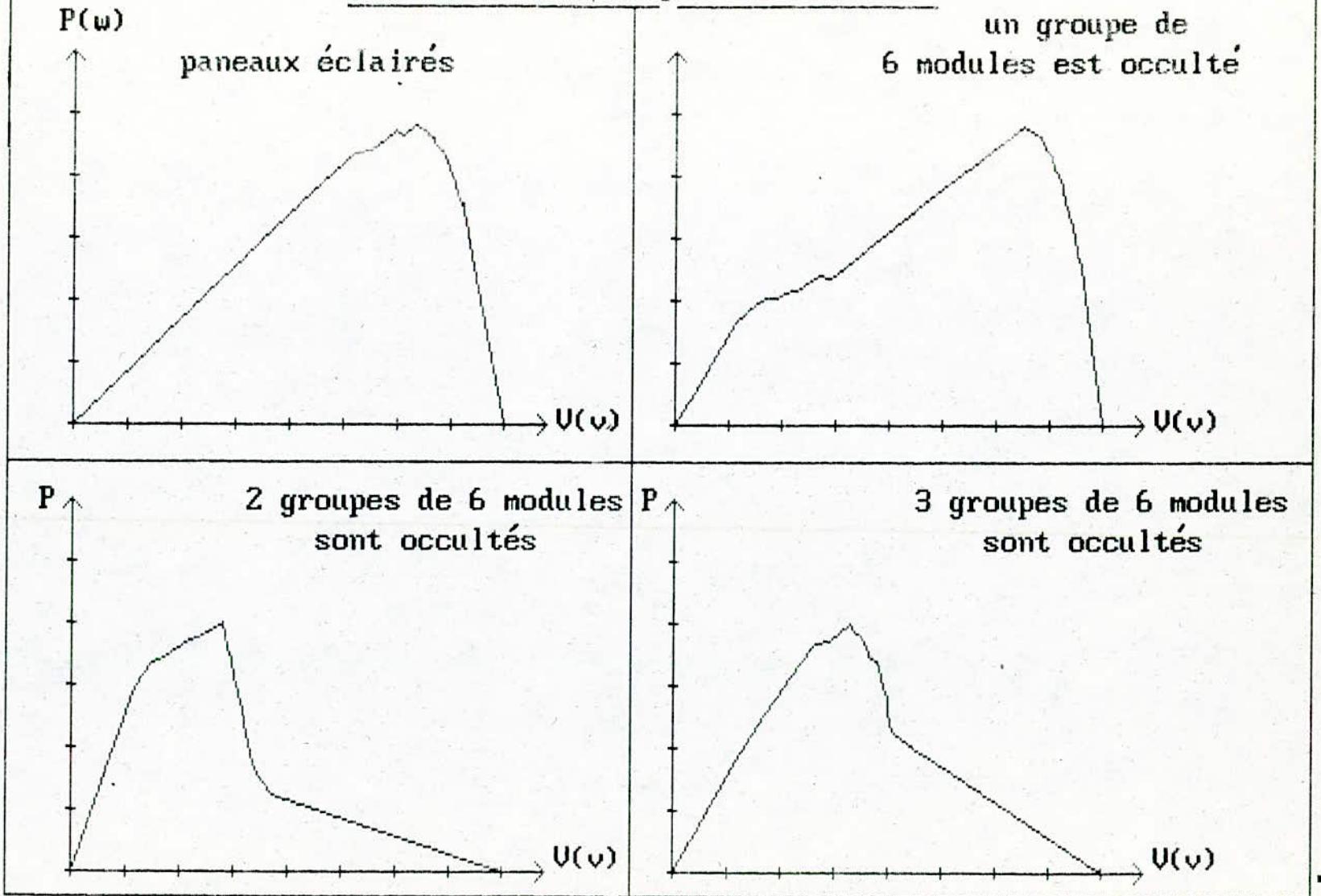


$I$

D/ 3 groupes de 6 modules sont occultes



**courbes  $P(U)$  expérimentales**  
**association des 2 panneaux solaires**



## CHAPITRE IV

\*\*\*\*\*

### APPROCHE THEORIQUE DU POINT DE VUE DE LA MECANIQUE DE FLUIDE

\*\*\*\*\*

#### IV-1 INTRODUCTION

\*\*\*\*\*

Avant d'être livré à l'utilisateur qui peut être le secteur industriel, ou la clientèle domestique, le gaz naturel subit des transformations physiques, celles-ci peuvent être soit un traitement destiné à le débarrasser des impuretés solides ou liquides qu'il véhicule, soit une modification des paramètres de son écoulement (pression ou vitesse de circulation du gaz). Ces transformations s'effectuent dans une installation de détente du gaz naturel, voir fig(25).

Le but de ce chapitre est d'étudier ces transformations et d'envisager le préchauffage du pilote directement par l'énergie électrique fournie par le générateur en déséquilibre étudié dans les chapitres précédents.

#### IV-2 DESCRIPTION DU POSTE DE DETENTE DU GAZ NATUREL

\*\*\*\*\*

Un poste de détente, est une installation dont la fonction est d'assurer l'interruption de l'écoulement du gaz, l'abaissement de sa pression, la protection contre les anomalies, l'élimination de l'eau ou des impuretés .

Sur un poste de détente, on trouvera donc comme appareils courants, des robinets ou vannes, des soupapes de sûreté, des détendeurs, des dispositifs séparateurs (filtres), des appareils de contrôle et des appareils de mesure.

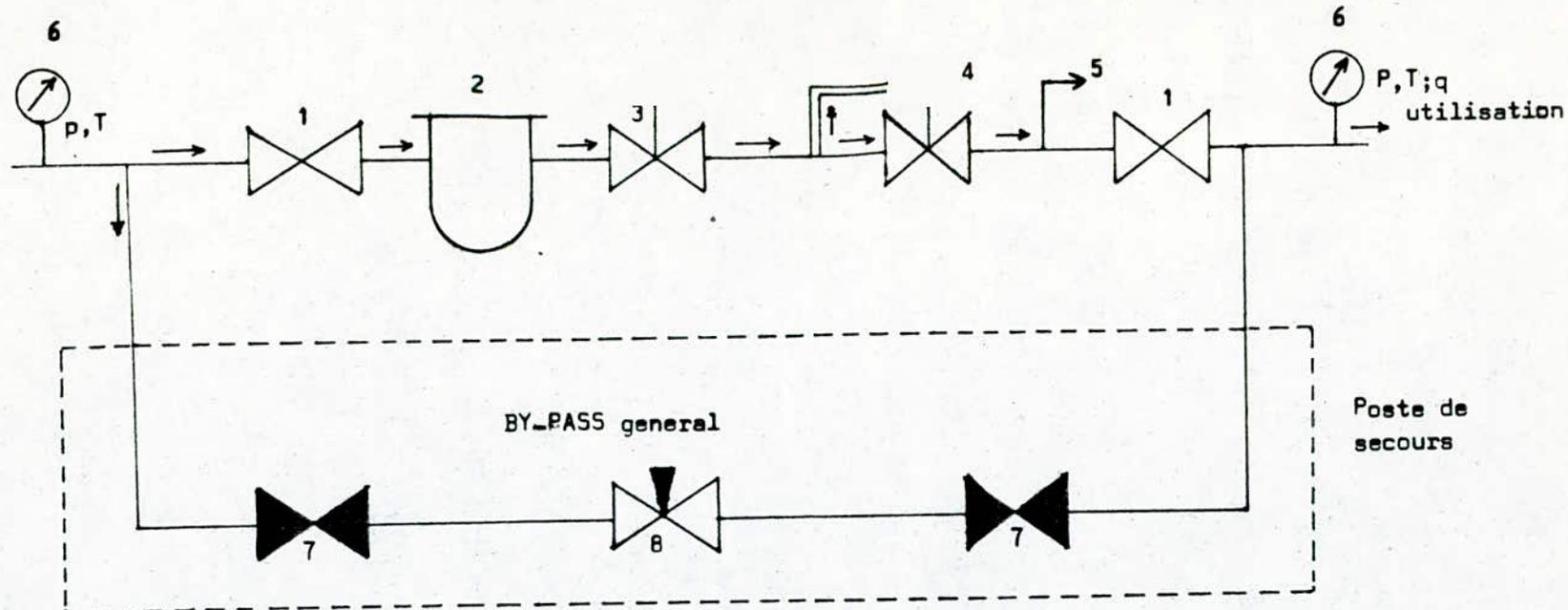
En suivant le sens de l'écoulement du gaz, une station de détente comprend les appareils suivants:

##### IV-2-1 ROBINETS D'ARRET

Ils sont destinés à isoler l'installation et à interrompre l'écoulement du gaz en cas de nécessité (entretien ou intervention).

##### IV-2-2 FILTRE

C'est un appareil destiné à retenir les impuretés solides véhiculés par le gaz,



1. Robinet d'arrêt

2. Filtre

3. Robinet automatique de sécurité

4. Régulateur-Détendeur

5. Soupape de sécurité

6. Appareil de contrôle

7. Robinets d'isolement

8. Vanne de Laminage

fig 25 INSTALLATION DE DETENTE

provenant soit du gaz lui même, soit des canalisations ou des systèmes de raccordement et qui risqueraient de se déposer sur les sièges ou les obturateurs des robinets et des détendeurs ou encore dans les injecteurs des appareils d'utilisation.

#### IV-2-3 ROBINET AUTOMATIQUE DE SECURITE

C'est un appareil destiné à interrompre automatiquement l'écoulement du gaz dès que la pression atteint une valeur jugée dangereuse pour l'utilisateur.

#### IV-2-4 DETENDEUR REGULATEUR

C'est l'élément essentiel du poste. Cet appareil destiné à abaisser la pression (fonction détendeur) jusqu'à une valeur appelée pression nominale de détente et à maintenir cette pression détendue constante (fonction de régulateur).

La détente est obtenue passage dans un orifice dont la section libre est plus ou moins obturée par un obturateur appelé clapet suivant le type de commande de ce dernier. On peut distinguer des détendeurs à action directe et des détendeurs à action indirecte ou à pilote. Un détendeur est prévu pour fonctionner entre deux limites:

- de pression amont
- de débit
- de pression de réglage.

#### IV-2-5 APPAREILS DE MESURE DE LA PRESSION (Manomètre )

- thermographe : sert pour la mesure de la température.
- Compteur volumique : sert pour la mesure du débit.

#### IV-3 PROBLEMES PRATIQUES POSES PAR LE REFROIDISSEMENT \*\*\*\*\*

On se borne ici à indiquer succinctement les divers problèmes posés par le refroidissement du gaz à la détente .

##### \* Condensation

SI la température tombe en dessous du point de rosée l'eau se condense pouvant provoquer des obstructions, et même la formation de la glace si la température descend au dessous du point de congélation.

### \* Hydrates

Nous verrons que dans certaines conditions de pression, la présence d'eau condensée peut entraîner, même si la température est supérieure au point de congélation, la formation d'hydrates de méthane qui forment des bouchons pouvant obstruer la conduite, et être la cause de pertes de charge considérables

### \* Gene dans le fonctionnement du détendeur

Les ennuis précédents peuvent être évités grâce à la déshydratation du gaz au départ, ce qui est réalisé pour le gaz naturel.

Cependant un abaissement excessif de la température risque de perturber le fonctionnement du détendeur en agissant sur les propriétés physiques et le fonctionnement des organes mécaniques.

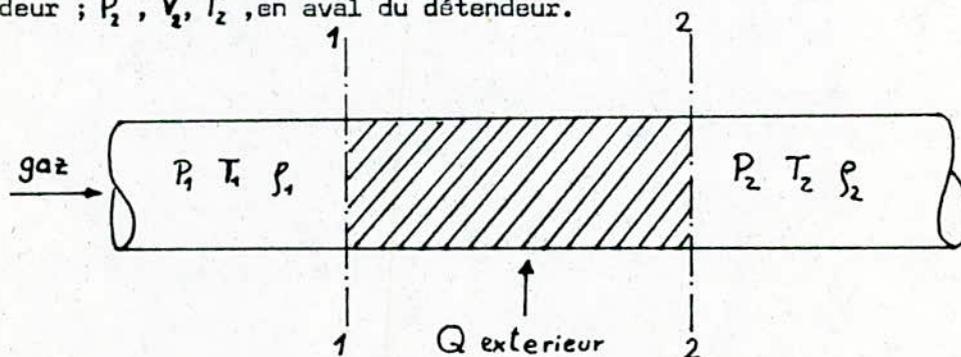
Pratiquement, le fonctionnement de l'appareillage mobile est perturbé par le froid rigoureux (durcissement des membranes en particulier).

## IV-4 ETUDE DE L'ÉCOULEMENT

\*\*\*\*\*

### IV-4-1 PRINCIPE

Pour le schéma du modèle d'écoulement, on peut considérer que la conduite reliant le pilote au régulateur, est une canalisation cylindrique dans laquelle circule du gaz ou un apport de chaleur extérieur  $Q$  est effectué entre les deux sections droites 1 et 2, d'épaisseur négligeable. Ce gaz circule dans la conduite en traversant le détendeur. En régime permanent, les pressions, les températures et les volumes moléculaires du gaz sont  $P_1, V_1, T_1$ , en amont du détendeur ;  $P_2, V_2, T_2$ , en aval du détendeur.



En première approximation, nous pouvons supposer qu'il n'y a aucune dissipation

de chaleur et que toute l'énergie calorifique se repercute sur la seule phase gazeuse. D'une manière classique, on suppose que la détente est une détente isenthalpique de joule thomson.

#### IV-4-2 LOIS THEORIQUES DU REFROIDISSEMENT

Pour la transformation élémentaire qui fait passer le gaz de l'état  $(p, T)$  à l'état  $(P+dP, T+dT)$ , écrivons que la variation d'enthalpie est nulle (détente isenthalpique).

$$H = U + P.V$$

$$dH = d(U + P.V) = dU + P.dV + V.dP = 0$$

mais l'énergie interne  $U$  est telle que:

$dU = \delta W + \delta Q$  D'après le premier principe de la thermodynamique, relation dans laquelle:

- Le travail  $\delta W = -P.dV$  représente le travail des forces de pression reçu par le gaz.
- La chaleur  $\delta Q = c_p.dT + h.dP$  représente la quantité de chaleur échangée avec l'extérieur, la pression ayant connue une variation  $dP$  et la température une variation  $dT$ ;  $c_p$  étant la capacité calorifique à pression constante.

$$\text{avec } h = -T.(\partial V / \partial T)_P$$

La relation (1) s'écrit alors:

$$-P.dV + c_p . dT + h.dP + V.dP + P.dV = 0$$

$$\text{soit } \frac{dT}{dP} = \frac{-(h + V)}{c_p}$$

et finalement :

$$\frac{dT}{dP} = \frac{T(V/T) - V}{c_p}$$

expression qui donne la variation  $dT$  de la température en fonction de la variation de pression.

Il est remarqué que le coefficient  $\frac{dT}{dP}$  à fait l'objet de nombreuses mesures pratiques du gaz. Ainsi dans le cas du méthane (gaz naturel) pour des pressions

de l'ordre de  $50 \text{ Kg/cm}^2$  et pour une température de  $5^\circ\text{C}$  (température atteinte à l'amont du détendeur). Nous avons trouvé que :

$$0.4 < \frac{\Delta T}{\Delta P} < 0.5$$

Nous pouvons donc prendre comme formule approchée traduisant la loi du refroidissement  $\Delta T = 0.45 \cdot \Delta P$

ou  $\Delta P$  est la variation de pression (en  $\text{Kg/cm}^2$ , ou en bars).

$\Delta T$  est la variation de température (en  $^\circ\text{C}$ )

Pour opérer d'une façon plus précise, il serait **nécessaire** de calculer le refroidissement par tranches successives de quelques bars, en prenant dans chaque étape la valeur de  $\frac{\Delta T}{\Delta P}$  correspondant à la pression et la température obtenues à la fin de l'étape précédente.

#### IV-4-3 DESCRIPTION MATHÉMATIQUE DE L'ÉCOULEMENT

##### a) INTRODUCTION

Le système d'équations décrivant l'écoulement, est un système classique. On suppose que le gaz après sa sortie de la section 2 (voir schéma du ch IV-4-1) continue d'évoluer selon les mêmes lois d'équilibre qu'il avait avant l'apport de chaleur.

Le processus d'évolution du gaz est décrit par trois grandeurs à savoir sa vitesse  $V$ , sa masse volumique, et sa température  $T$ .

Les équations qui régissent cette évolution sont déduites du bilan de masse et d'énergie pour un certain volume de contrôle.

##### b) BILAN DE MASSE (équation de continuité)

L'équation traduisant le bilan de masse s'écrit :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho v)}{\partial x} = 0$$

$V$  est la vitesse du gaz, elle est constante dans une section.

$\rho$  sa masse volumique.

Cette quantité est affectée par les forces de pression agissant sur le gaz soit  $\partial P / \partial x$

Nous obtenons en utilisant le bilan de masse :

$$\rho \left( \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial v}{\partial x} \cdot v \right) = - \rho \frac{\partial P}{\partial x}$$

Dans ces équations, P représente la pression du gaz dans la section considérée.

### c) BILAN D'ENERGIE

Soit  $e_T$  l'énergie totale par unité de masse, que possèdent les particules de gaz, on a :

$$e_T = e + \frac{1}{2} \cdot v^2$$

ou  $\frac{1}{2} v^2$  représente l'énergie cinétique par unité de masse, elle est multiple de  $v^2$  (v étant la vitesse d'écoulement).

e : est l'énergie interne par unité de masse. Cette quantité d'énergie est affectée par le transfert de chaleur Q provenant du milieu extérieur.

On obtient après utilisation des bilans de masse de l'énergie

$$\rho \left( -\frac{dH}{dt} \right) v - \left( -\frac{dP}{dt} \right) v = Q$$

H étant l'enthalpie de l'unité de masse.

### IV-4-4 EQUATIONS GENERALES SIMPLIFIEES

La résolution des équations précédentes est assez complexe. Aussi certaines hypothèses simplificatrices s'imposent :

- a) l'écoulement est unidirectionnel, et ne dépend pas du temps.
- b) le gaz est considéré comme un gaz parfait.

La première hypothèse revient à considérer que toutes les dérivées partielles dépendant du temps et aussi des autres directions sont négligeables on obtient alors le système d'équations suivant :

$$-\frac{d}{dx} (\rho v) = 0 \quad \dots \dots \dots (1)$$

$$\rho v \cdot \frac{dv}{dx} + \frac{dP}{dx} = 0 \quad \dots \dots \dots (2)$$

$$\rho v \cdot \frac{dH}{dx} + \frac{-v}{dx} \frac{dP}{dx} = Q \quad \dots \dots \dots (3)$$

Dans ce système d'équations, on à  $\rho, V, P, H(^{\circ}C)$  sont inconnus. Aussi pour que le système soit complet, on doit joindre une quatrième équation, qui est généralement, l'équation d'état du système (gaz) prise sous la forme:

$$\frac{P}{\rho} = R.T \quad \dots\dots\dots (4)$$

Sur la base des équations théoriques précédentes, on élabore un modèle de simulation du système électro-thermodynamique du poste de détente du gaz naturel.

IV-5 MODELE GLOBAL DE SIMULATION DU SYSTEME  
 \*\*\*\*\*

Dans ce chapitre on se propose de mettre au point un modèle susceptible de simuler l'évolution du gaz.

. POSITION DU PROBLEME

On à vu que les hydrates du gaz naturel présentent des inconvénients très graves pour l'exploitation. Le Dr KATZ à établi des courbes qui permettent:

- soit d'estimer jusqu'à quelle pression finale on peut détendre un gaz naturel pris à une température et à une pression données sans risques de formation d'hydrates (1°Cas).
- soit d'évaluer à quelle température minimale on doit chauffer un gaz ayant une pression initiale donnée avant expansion pour que les hydrates ne puissent se former après détente jusqu'à une pression donnée (2°Cas).

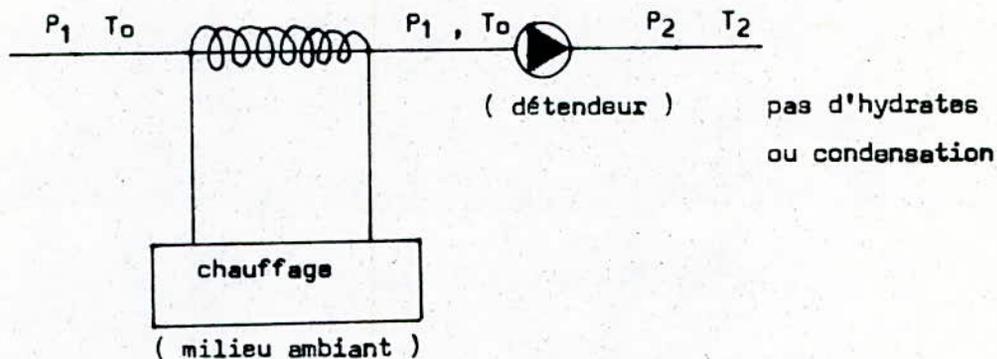
En résumé on a le tableau suivant:

Cas	Données	Inconnues
1*	$P_1, T_1$	$P_2$
2*	$P_1, P_2$	$T_1$

Notre problème relève du second cas et s'énonce ainsi:

" On décide de réchauffer le gaz naturel avant la détente qui doit réduire sa pression initiale de  $P_1$  à  $P_2$ . Quelle quantité de chaleur  $Q$  faut t'il lui fournir pour que sa température amont ne descende pas sous une température minimale  $T_1$  ( de congélation ) .

Données  $P_1, P_2, \Delta T$  . Inconnues  $T_1, Q$  voir le schéma suivant:



CHAPITRE V  
\*\*\*\*\*

MODELE DE L'ETUDE PRATIQUE ET CALCULS DES ECHANGES CALORIFIQUES  
\*\*\*\*\*

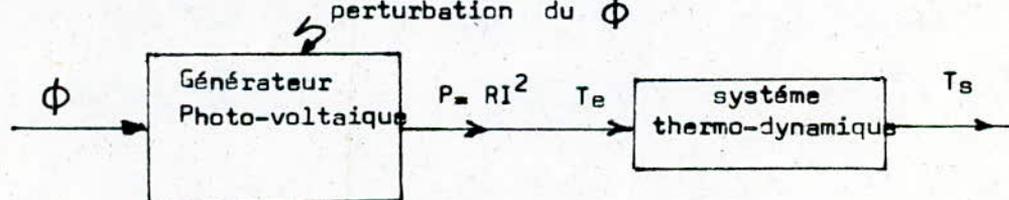
V-1 INTRODUCTION  
\*\*\*\*\*

Les équations précédentes régissant l'écoulement sont généralement conçues pour des fluides travaillant en régime dynamique, donc, pour une quantité de mouvement variable d'un point à un autre .

Or dans notre cas, des hypothèses simplificatrices s'imposent . Nous supposons qu'il n'y a pas de transfert de masse, et qu'il y a uniquement un transfert de chaleur.

Les hypothèses simplificatrices sont indispensables. Etant donné que le chauffage s'effectue grâce à une résistance électrique alimentée à l'aide d'un générateur photo-voltaïque fonctionnant en régime établi, et fournissant une énergie définie par U et I (tension et intensité de courant), donc une puissance  $P = V \cdot I$  , qui est la quantité de chaleur cédée au système électro-thermodynamique, et est fonction de l'état du flux lumineux . Elle est égale aussi à :  $P = R \cdot I^2$  .

Le process est défini par le schéma bloc suivant :



où:  $\Phi$  est le flux solaire incident.

P - est la puissance électrique fournie par le générateur photo-voltaïque

Te- est la température d'entrer du gaz.

Ts- est la température de sortie du gaz

La transmission de chaleur au niveau du système thermodynamique se fait par:

- \* Conduction
- \* Convection
- \* Le rayonnement étant négligeable

## V-2 TRANSMISSION DE CHALEUR PAR CONDUCTION

\*\*\*\*\*

La quantité de chaleur transmise par régime permanent par unité de temps à travers une paroi de surface  $S$ , à une distance  $L$ , dans une direction perpendiculaire à cette surface, sous l'action d'une différence de température  $(\theta - T_1)$  est donnée par :

$$Q = (\theta - T_1) \cdot \frac{S \cdot \lambda_h}{L}$$

Dans laquelle:  $\lambda_h$  représente la conductibilité thermique (en Kcal / m.h.°C)

$\theta$  : est la température de l'élément chauffant (en °C).

$T_1$  : est la température du milieu ambiant (gaz), donnée aussi en (°C).

Nous admettons que les variations de la conductivité du gaz avec la température sont représentées par la formule de SUTHERLAND :

$$\lambda = \lambda_0 \cdot \frac{1 + (C / T_0)}{1 + (C / T)} \cdot \sqrt{\frac{T}{T_0}}$$

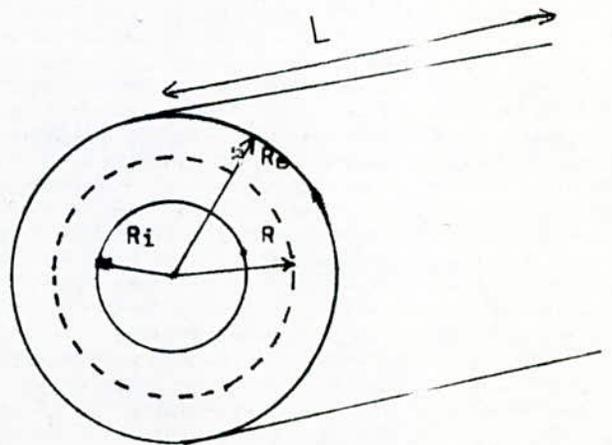
où :  $T$  représente la température absolue .

$T_0 = 273$  c'est la constante de SUTHERLAND, elle dépend du gaz .

$\lambda$  est exprimé en Kcal / m.h.°C .

Dans notre étude, la paroi utilisée est une paroi cylindrique de diamètre intérieur  $D_i$  et de diamètre extérieur  $D_e$ , l'expression de la quantité de chaleur est donnée par :

$$Q_{cd} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \lambda_b \cdot L \cdot (\theta - T_1)}{\text{LOG}(D_e / D_i)}$$



### V-3 TRANSMISSION DE CHALEUR PAR CONVECTION

\*\*\*\*\*

Lorsque le fluide pénètre dans la conduite cylindrique , la distribution de la vitesse est uniforme dans toute la section au voisinage de l'entrée cette distribution se modifie ensuite progressivement pour atteindre son profil définitif à une distance de l'entrée telle que :  $(L / Di)=0.03 Re$ .  
où: L est la longueur de la conduite; Di étant le diamètre intérieur  
Re est le nombre de REYNOLDS .

La quantité de chaleur par convection est donnée donc par l'expression :

$$Q_{cv} = K_i.S.(\theta - T_1 )$$

$K_i$  est le coefficient de transmission entre le fluide qui s'écoule et la paroi intérieure du tuyau " coefficient de convection " .

Il peut y avoir encore une autre transmission,c'est la transmission mixte c'est à dire par conduction et convection .

### V-4 TRANSMISSION MIXTE DE CHALEUR

\*\*\*\*\*

La transmission de chaleur en régime permanent à travers une paroi séparant deux milieux fluides s'exprime par :

$$Q = K . S . (\theta - T_1 )$$

où : Q est la quantité de chaleur transmise par  $m^2$  de surface de la paroi et par heure, exprimé en Kcal .

$\theta - T_1$  Est l'écart de température entre le fluide chauffant et le fluide chauffé .

Le coefficient K est fonction de :

- \* coefficient de passage  $K_e$  entre la paroi extérieure du tuyau et le milieu environnant .
- \* coefficient de passage  $K_n$  à travers l'épaisseur de la paroi et aussi du coefficient  $K_i$  défini auparavant .

La loi de composition étant celle des résistances en série :

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{K_e} + \frac{1}{K_n} + \frac{1}{K_i}$$

$K_e$  et  $K_i$  dépendent de la nature et de l'état du fluide (vitesse, température, ... etc)  
 $K_n$  est indépendant de la température, il n'est fonction que du matériau et des dimensions du tuyau.

#### V-5 CALCULS PRELIMINAIRES

\*\*\*\*\*

##### V-5-1 CALCUL DE $K_i$ (Fluide en écoulement)

Pour les gaz, l'expression pratique de  $K_i$  est :

$$K_i = 0.04 \cdot P_e \cdot \frac{\lambda h}{D_i} \quad \text{en (Kcal /m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{°C)}$$

$D_i$  étant le diamètre intérieur du tuyau (en m)

$$P_e = \frac{V \cdot D \cdot \gamma \cdot C_p}{\lambda h} : \text{c'est le nombre de pecllet (sans dimension)}$$

$V$  : est la vitesse de l'écoulement du fluide (en m/h).

$$\gamma = \rho \cdot g$$

$\gamma$  est le poids spécifique (en Kg/m<sup>3</sup>).

$C_p$  : c'est la chaleur spécifique à pression constante (en Kcal/Kg.°C)  
( il varie légèrement avec la température ).

$\xi$  : est un coefficient de majoration dépendant de la longueur du tuyau .

$$1.2 < \xi < 1.0$$

Nous prenons généralement pour les gaz la valeur  $\xi = 1$  .

## REMARQUE

Pour le calcul de  $Pe$ , nous pouvons utiliser pratiquement la relation suivante:

$$Pe = Re \cdot Pr = \frac{Re}{St}$$

avec :  $Re$  c'est le nombre de REYNOLDS, peut être donné par l'expression:

$$Re = \frac{V \cdot D}{\nu}$$

où :  $\nu$  est le coefficient de viscosité cinématique .  $\nu = \frac{\mu}{\rho}$  .  
 $\rho$  est la masse volumique  
 $\mu$  coefficient de viscosité dynamique .

nombre de PRAUDT, donné par l'expression suivante :

$$Pr = \frac{\rho \cdot g \cdot Cp}{h} = \frac{\nu}{a}$$

$$St = \frac{1}{Pr}$$

c'est le nombre de STANTON .

## V-5-2 CALCUL DE $Kn$

Ce coefficient est donné directement à partir de la formule :

$$\frac{f}{Kn} = \frac{Di}{2 \cdot \lambda h} \text{ LOG } \frac{De}{Di} \approx \frac{e}{\lambda h}$$

Pour des tuyaux à paroi mince l'épaisseur  $e$  est donné par :

$$2e = De - Di$$

## V-5-3 CALCUL DE $Ke$

Ce coefficient est donné par la relation :

$$Ke = \alpha_e \cdot \frac{De}{Di}$$

relation dans laquelle la conduite considérée étant placée en air ambiant,

Nous prenons l'expression pratique :

$$\alpha_e = \sqrt[4]{\frac{\Delta\theta}{\Delta i}}$$

Dans laquelle:  $\Delta\theta$  = Température paroi - Température du fluide .

#### V-5-4 EXPRESSION FINALE DE Q(Quantité de chaleur totale)

$$Q = \frac{\pi \cdot D \cdot L \cdot \Delta\theta}{\frac{D_i}{2\lambda_h} \text{ LOG } \frac{D_e}{D_i} + \frac{D_i}{\alpha_e \cdot D_e} + 0.04 \cdot P_e^{3/4} \cdot \frac{\lambda_b}{D} \cdot \xi}$$

C'est la quantité de chaleur totale déduite des équations précédentes.

#### V-5-5 EXPRESSION DE LA VITESSE REELLE DE L'ECOULEMENT

Si  $q_{vo}$  est le débit du gaz dans les conditions normales ( $\theta_0 = 0^\circ\text{C}$  ,  $P_0 = 1013 \text{ mbar}$ ) la vitesse réelle de l'écoulement à la température  $T$  et la pression  $P$  absolue, dans la conduite de diamètre  $D$  se calcule au moyen de la relation :

$$V = \frac{4 \cdot q_{vo} \cdot T_1 \cdot P_0}{\pi \cdot D^2 \cdot T_0 \cdot P_1}$$

$$V(\text{m/s}) = 1.25 \frac{q_{vo} \cdot T_1}{D^2 \cdot P_1}$$

Le diamètre  $D$  est donné en(mm) .

La pression  $P$  est donnée en(bar) .

La vitesse de l'écoulement  $V$  est donnée en(m/s) .

La vitesse  $V$  peut être aussi déterminée par l'abaque (donnée en annexe ) .

#### V-5-6 BILAN THERMIQUE DU MODELE PRATIQUE

La quantité de chaleur nécessaire pour faire passer le gaz d'un état ( $T_1, P_1$ ) à un autre état ( $T_2, P_2$ ), telle que  $T_2$  soit supérieure à  $T_1$ , est donnée par la somme des quantités de chaleur par conduction et par convection définissant le modèle plus la chaleur perdue dans l'atmosphère . Cette dernière peut être fonction du vent et ceci selon la formule suivante:

$$Q_p = H_v \cdot S \cdot (\theta - T_1) \quad .$$

où :  $H_v$  est un coefficient calorifique qui tient compte de la vitesse du vent, et nous avons :

$$H_v = 5.7 + 3.8 \cdot V_1 \quad / \quad V_1 \text{ étant la vitesse du vent } .$$

Nous avons donc  $Q_r$ , quantité de chaleur du chauffage égale à :

$$Q_r = Q_{cd} + Q_{cv} + Q_p$$

La quantité de chaleur par conduction  $Q_{cd}$ , et par convection  $Q_{cv}$ , ainsi que les pertes  $Q_p$ , peuvent être calculées à partir des formules données précédemment en connaissant la section de la conduite contenant le gaz, la température du chauffage, la vitesse de l'écoulement et ainsi différents coefficients caractérisant le gaz et la conduite le transportant .

#### V-6 SIMULATION DU MODELE DONNANT LA RESISTANCE ELECTRIQUE( Chauffage ) \*\*\*\*\*

##### V-6-1 INTRODUCTION \*\*\*\*\*

A l'aide des expériences que nous avons faites sur la résistance chauffante, nous connaissons la quantité de chaleur qu'il faut donner pour chauffer le gaz à l'amont du détendeur, pour qu'il n'y ait pas de givrage au niveau de la conduite du gaz , qui fait boucher cette dernière , ce qui va empêcher l'écoulement du gaz .

Nous avons conçu pour ça un programme( voir listing en annexe ) étudiant la variation de la résistance en fonction des autres paramètres qui caractérisent l'état du gaz .

##### V-6-2 ETUDE SUR LA RESISTANCE ELECTRIQUE \*\*\*\*\*

La résistance d'un conducteur varie avec sa température . Soient..:

$R_0$  : résistance du conducteur à  $0^\circ\text{C}$  .

$R_t$  : sa résistance à la température  $t^\circ\text{C}$

$a$  : coefficient de température du matériau considéré(acier),  $R_t$  est donnée par :

$$R_t = R_0 (1 + a \cdot t)$$

### \* Chauffage et effet joule

Le passage d'un courant dans un conducteur, provoque un dégagement de chaleur. Cette chaleur engendre une élévation de la température des corps environnants .



### \* Température d'équilibre d'un conducteur

Soit AB, le conducteur montré ci-dessus, celui-ci s'échauffe puis sa température se fixe à un maximum que l'on appelle la température de régime. Alors en un temps donné, la chaleur fournie par effet joule est égale à la chaleur dissipée, et la température ne varie plus. Si cet équilibre ne se produit pas, la température croit jusqu'à atteindre le point de fusion du conducteur, le circuit est alors coupé.

#### Remarque

La température d'équilibre d'un conducteur est atteinte quand la puissance calorifique (P) fournie au conducteur est égale à la quantité de chaleur cédée au milieu ambiant en une seconde.

### \* Densité de courant

Pour calculer la section optimale d'un conducteur, celle pour laquelle, la température d'équilibre serait acceptable.

L'intensité (I) par unité de section du courant qui doit passer dans le conducteur peut être donc déterminée; c'est le nombre d'ampères que nous pouvons admettre par millimètre carré de section, dans un conducteur :

$$J = \frac{I}{S}$$

Si nous représentons par :

S la surface périphérique du conducteur .

$\theta$  sa température et  $\theta_a$  celle du milieu ambiant. Dans notre cas c'est le tube.

K : Facteur qui dépend des conditions de refroidissement . Nous admettons que l'équilibre thermique est réalisé quand :

$$P_e = K \cdot S (\theta - \theta_a)$$

P : étant la puissance électrique (en W ou en KW), elle est aussi donnée par :

$$P_e = R \cdot I^2$$

R : est la résistance du conducteur

I : est l'intensité de courant passant dans le conducteur .

Par identification entre les deux relations donnant  $P_e$ , nous aurons :

$$R \cdot I^2 = K \cdot S (\theta - \theta_a)$$

Le conducteur étant homogène, de résistivité  $\rho$ , de longueur l, de section S et de périmètre p. La résistance R sera :

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S} \quad \text{où : la surface S de refroidissement est}$$

$$\text{égale :} \quad S = p \cdot l$$

$$\text{d'où :} \quad \rho \cdot \frac{l}{S} \cdot I^2 = K \cdot p \cdot l (\theta - \theta_a)$$

$$\theta - \theta_a = \frac{\rho}{K} \cdot \frac{l}{p \cdot S} \cdot I^2 = \frac{\rho}{K} \cdot \frac{S}{p} \cdot \frac{I^2}{S^2}$$

Nous remarquons que :  $\frac{I}{S} = J$  représente la densité du courant

$$\text{Donc :} \quad \theta - \theta_a = \frac{\rho}{K} \cdot \frac{S}{p} \cdot J^2$$

L'élévation de la température d'un conducteur est proportionnelle au carré de la densité de courant .

La résistance électrique peut être donnée en fonction de la densité de courant J ( ou intensité I ) par la formule :

$$R = \frac{K(\theta - T_1)}{J^2 \cdot S_1} = \frac{(\theta - T_1)}{J^2 \cdot S_1} \cdot \frac{Q_r}{S_1(\theta - T_1)} = \frac{Q_r}{S_1^2 \cdot J^2}$$

$$R = \frac{Q_r}{I^2}$$

$Q_r$  : est donnée en cal/s, ou en W(J/s) ;  $K = \frac{Q_r}{S_1 (\theta - T_1)}$

CHAPITRE VI  
\*\*\*\*\*

ETUDE DE LA MANIPULATION ET RESULTATS EXPERIMENTAUX  
\*\*\*\*\*

VI-1 INTRODUCTION

\*\*\*\*\*

Le but de cette étude est de concevoir une installation pour le réchauffage du gaz par énergie solaire , en amont des postes de détente . La détente du gaz est toujours accompagnée d'une baisse de température , qui en dessous d'une certaine valeur , et en fonction de la pression , provoque la formation d'Hydrates , ces Hydrates causent la détérioration du matériel et le blocage de l'écoulement du gaz au niveau du pilote .

Cette installation , utilisant une résistance électrique branchée à un générateur photo-voltaïque , peut servir , soit à chauffer le gaz circulant dans le pilote, soit à le gaz à détendre , suivant le montage considéré .

VI-2 SCHEMA EXPERIMENTAL

\*\*\*\*\*

Le montage utilisé pour cette étude est représenté par la figure (26)

Nous utilisons une bouteille de gaz débitant à une certaine pression , le gaz passe alors dans un détendeur , qui l'amène à une autre pression de sortie inférieure à celle de l'entrée .

Autour de cette tuyauterie , est installée une résistance électrique chauffante alimentée par le générateur photo-voltaïque , et fournissant une certaine quantité de chaleur .

En l'absence d'énergie solaire pendant la nuit , nous sommes amené à faire un stockage en utilisant des batteries de stockage .

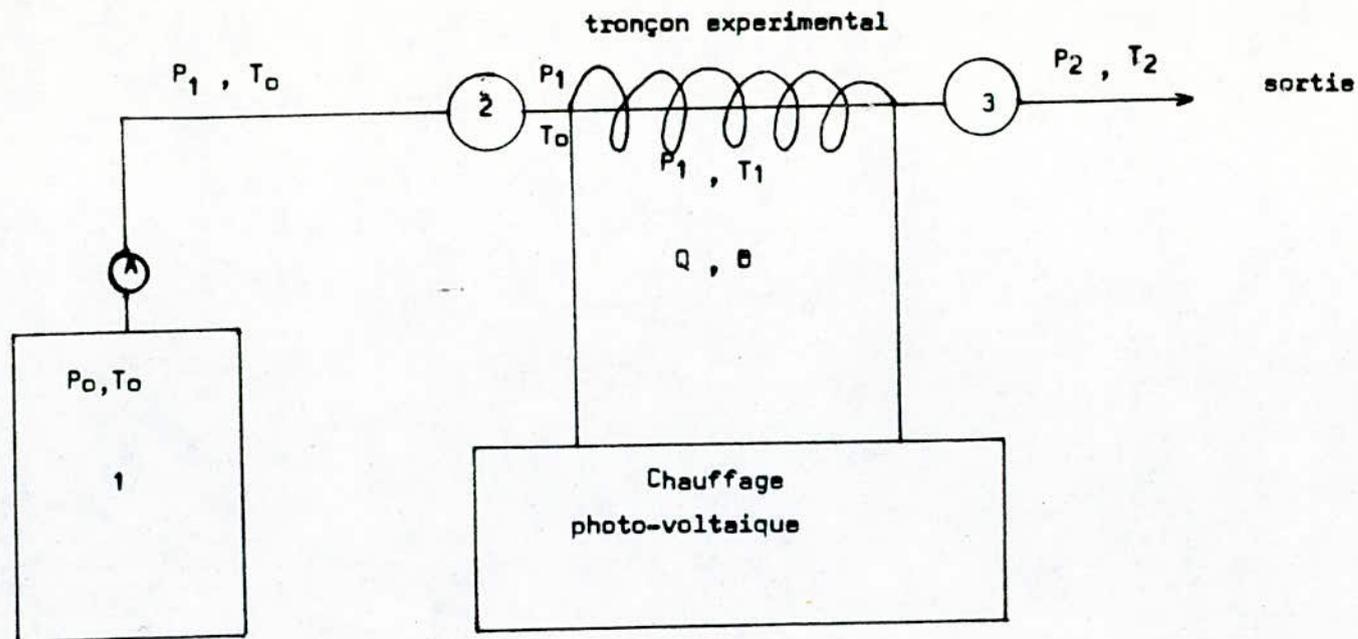
VI-3 CARACTERISTIQUES DU STOCKAGE

\*\*\*\*\*

Pour avoir la puissance voulue , il revient à étudier le nombre de batteries de stockage , satisfaisant cette demande , et donc la capacité de ces batteries pour une autonomie de 18h .

\* CAPACITE D'UNE BATTERIE

C'est le nombre d'Ampères-heures que peut déhiter une batterie pour un courant



- 1\* Reservoir de gaz avec detendeur incorporé
- 2\* Appareil de prédétente pour réguler la température
- 3\* Appareil de réglage du débit de sortie par détente
- 2-3 Tuyauterie expérimentale

fig 26 DISPOSITIF EXPERIMENTAL

et une tension de fin de décharge bien définis .

La capacité des batteries solaires est donnée en 10 h pour une tension d'arrêt par élément de 2v . Les batteries que nous utilisons sont du type chlorure , la capacité de six batteries mises en série (12v) est de 75 A h .

#### \* CHARGE DE LA BATTERIE

Le nombre de modules nécessaires , mis en série ou en parallèle , pour charger une batterie est :

\* Modules mis en série ( N<sub>s</sub> )

Soient V<sub>mod</sub> : Tension optimale du module = 16v .

V<sub>bat</sub> : Tension des batteries mises en service = 12v pour 6 Batteries mises en série .

$$N = \frac{V_{bat}}{V_{mod}} = \frac{12}{16} = 0.75 \approx 1 \text{ Module .}$$

\* Modules mis en parallèle ( N<sub>p</sub> )

Soient I<sub>ch</sub> : Courant de charge , il peut être donné à partir de la formule :

$$C = I_{ch} \cdot t \quad : \text{ où } t : \text{ est le temps de charge , } t = 10h .$$

C : Capacité des batteries , C = 75 Ah .

$$I_{ch} = \frac{C}{t} = \frac{75}{10} = 7.5A$$

$$N_p = \frac{I_{ch}}{I_m} = \frac{7.5}{1.5} = 5 \text{ Modules .}$$

I<sub>m</sub> : est le courant optimale du module , I<sub>m</sub> = 1.5A .

Le nombre de modules nécessaire pour charger une batterie est:

$$N = N_s \cdot N_p = 1 \cdot 5 = 5 \text{ Modules .}$$

### VI-4 RESULTATS DE LA MANIPULATION

\*\*\*\*\*

#### VI-4-1 UTILISATION DE LA BOUTEILLE DE GAZ

La réserve de gaz à détendre était dans la première phase expérimentale une bouteille de gaz butane du commerce , celle-ci permet d'obtenir une détente de gaz allant de 1 bar (en phase liquide) à 0.02 bars (en phase gazeuse) . Ceci nous permet d'obtenir un abaissement de température de l'ordre de un demi degré ,

valeur trop faible pour réaliser une expérimentation probante ( nous obtenons sur la tuyauterie de sortie le dépôt d'une buée qui disparaît sous l'influence de la température ambiante ), nous remarquons toutefois que cette expérimentation utilisant la bouteille à permis de dimensionner la résistance chauffante qui est alimentée à partir du générateur photo-voltaïque . Lors du déséquilibre de ce dernier, nous remarquons une baisse de température de la résistance chauffante qui est due à la baisse du courant électrique passant dans cette résistance ( baisse de la puissance électrique ) .

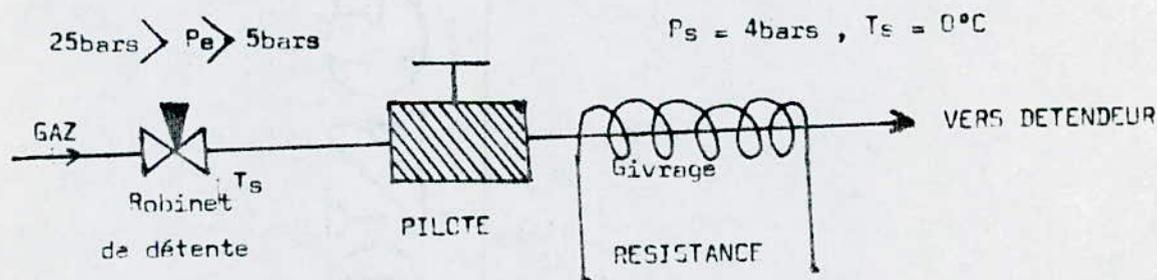
#### VI-4-2 EXPERIMENTATION SUR SITE

\*\*\*\*\*

L'utilisation de la bouteille de gaz ( BUTANE ), ne nous ayant pas permis de réaliser une expérimentation complète, cette dernière a été montée sur site, à la station de détente du gué de Constantine, où nous pouvions avoir, sur un pilote, des variations de pression allant de 55 bars à 0.02 bars, nous nous sommes limités à une détente s'arrêtant à 5 bars ( en amont ). Les relevés des températures donnant lieu à des givrages, sont résumés dans le tableau ci-dessous en fonction des pressions d'entrée des pilotes .

#### VI-4-3 RELEVES EXPERIMENTAUX

\*\*\*\*\*



La figure ci-dessus schématise l'installation sur site. Nous avons fait varier la pression d'entrée du gaz de 25 à 5 bars en maintenant la pression de sortie égale à 4 bars. La température notée est celle à laquelle nous avons constaté le givrage ( Tableau ), qui disparaissait dès que l'on mettait en service la résistance chauffante branchée sur batterie .

Soient  $P_e$  ,  $T_e$  : Pression et température d'entrée du gaz .

$P_s$  ,  $T_s$  : Pression et température de sortie du gaz.

$P_e(\text{bars})$	$T_e(^{\circ}\text{C})$	$P_e(\text{bars})$	$T_e(^{\circ}\text{C})$	$P_e(\text{bars})$	$T_e(^{\circ}\text{C})$
25	10.1	18	7.15	11	3.75
24	10	17	6.60	10	3.25
23	9.72	16	6.0	9	2.62
22	9.20	15	5.55	8	4.02
21	8.6	14	5.15	7	1.60
20	8.05	13	4.70	6	1.15
19	7.65	12	4.20	5	0.65

Nous constatons que l'évolution de la température de givrage répond à la relation expérimentale suivante :

$$T_e = 0.5 P_e \quad .$$

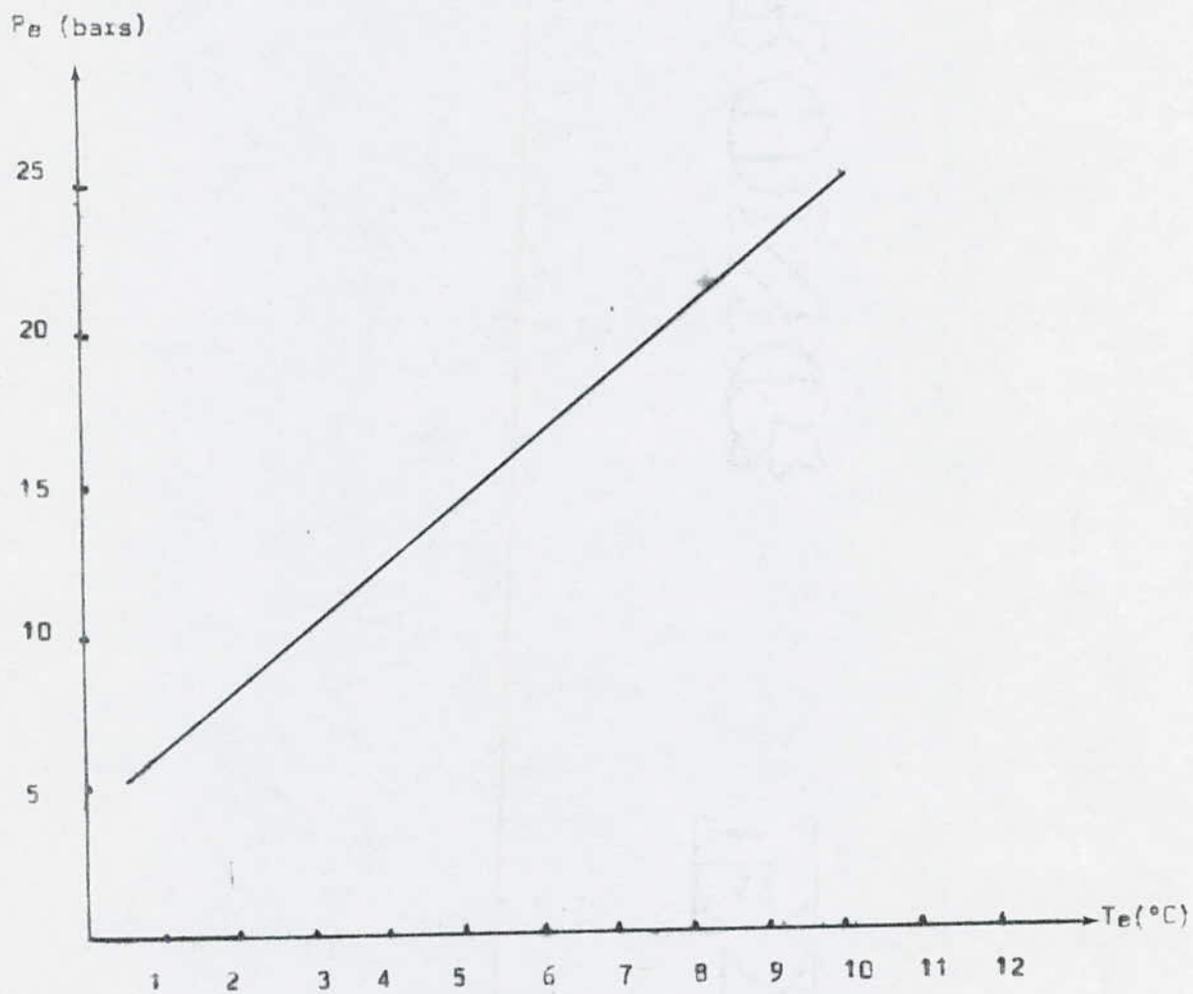


fig 27 COURBE  $P_e(T_e)$  DU GAZ NATUREL

## CONCLUSION

\*\*\*\*\*

Au niveau du générateur photo-voltaïque , il se passe un phénomène très important , c'est le déséquilibre de celui-ci , qui est dû à l'occultation partielle des modules , ou des cellules photo-voltaiques le constituant . C'est pourquoi , une étude de simulation numérique à été faite étudiant ce déséquilibre , et qui à été ensuite confirmée par des expériences sur le Générateur P.V .Et lors d'une occultation globale volontaire ou involontaire le courant fourni est très faible , et la puissance totale du générateur P.V n'arrive plus à satisfaire la demande d'énergie ; ce qui amène à penser à un stockage , il est donc nécessaire de faire débiter des photopiles dans des accumulateurs , et se servir ensuite , de l'électricité aussi stockée .

Vu les difficultés rencontrées concernant le montage du système de détente au laboratoire de l'énergie solaire , par exemple , l'encombrement des appareils , nous avons été amené à prendre des relevés expérimentaux à la sonelgaz du Gué de Constantine , nous avons utilisé pour le chauffage , des batteries , qui nous ont permis d'avoir la puissance nécessaire pour ce chauffage , et de simuler physiquement le générateur P.V .

Vu toutes les difficultés pratiques d'une telle réalisation , il nous semble que ce travail doit être poursuivi surtout en ce qui concerne la deuxième partie .

ANNEXE :  
\*\*\*\*\*

HYDRATES DU GAZ NATUREL  
\*\*\*\*\*

CARACTERISTIQUES DES HYDRATES DU GAZ NATUREL  
\*\*\*\*\*

un hydrate de gaz naturel est un solide blanc qui peut revêtir différents aspects selon son mode de formation : Champignons emprisonnant des bulles de gaz s'il y a barbotage dans l'eau, neige fondante ou pellicule en surface de l'eau, ou encore cristaux fixés aux parois.

\* Il ne se forme que dans certaines conditions de température et de pression, fonction de la composition du gaz et, semble-t-il, sous réserve qu'il y ait présence de l'eau liquide ; ce fait est admis par la majorité des chercheurs qui tiennent la possibilité d'existence d'hydrates à l'humidité contenue dans le gaz. Toutefois le risque de les rencontrer sans qu'il y ait d'eau en phase liquide ne doit pas être exclu totalement.

\* c'est la surface de contact Eau-Gaz qu'à lieu la réaction de formation s'il n'y a pas d'agitation (léchage du gaz), il apparaît en surface une pellicule qui peut arrêter tout développement ultérieur de la réaction. Immérgés, ces cristaux deviennent peu sensibles à toutes variations de température et de pression, ce sont des hydrates "coulés" qui subsistent très longtemps dans cet état instable.

Leur présence provoque la formation d'hydrates dès que la pression et la température d'équilibre sont atteintes. Par contre, en leur absence, on peut constater un retard important à leur formation, pouvant atteindre, à une température donnée, plusieurs dizaines de bars.

\* En résumé, le début de la réaction est tribulaire de l'apparition des premiers hydrates qu'il semble difficile de préciser dans les conditions d'exploitation. On pense généralement que la présence de divers obstacles, de poussières, d'oxydes provenant de corrosions d'une turbulence locale, jouent un rôle catalytique dans le déclenchement de la réaction d'initiation.

- \* Diverses études ont été consacrées à la constitution des hydrates ,et de nos jours certaines ont pour objectifs la détermination de leur composition . Leurs auteurs n'tant pas totalement d'accord sur leur constitution à partir de composés paraffiniques il faut extraire dans l'abondante littérature qui les concerne les hypothèses les plus généralement avancées .
- \* On peut considérer les hydrates comme des inclusions de molécules de gaz dans les espaces laissées libres dans un empilement dodé caédrique de molécules d'eau , Aucune liaison chimique n'existe entre le gaz et l'eau, la cohésion étant réalisée par les forces d'attraction dues aux interactions des électrons des couches externes. Les résultats des recherches portent à penser qu'à une molécule de gaz pourraient être associées, six, sept, ou huit molécules d'eau on peut cependant retenir deux types d'eau :
- Le premier qui contient les petites molécules tels le méthane; l'éthane et le gaz carbonique, correspond à une molécule de gaz pour 6 ou 7 molécules d'eau .
  - Le second, correspond aux plus grosses molécules tels le propane et l'isobutane avec une molécule de gaz pour dix sept molécules d'eau .

.../°.'°.

## ANNEXE :

=====

CARACTERISTIQUES CHIMIQUES ET PHYSIQUES DU GAZ NATUREL

le gaz naturel transporté provient des gisements de Hassi R'mel et possède les caractéristiques suivantes :

a) COMPOSITION CHIMIQUE DU GAZ NATUREL

composants		%mol
1- AZOTE	N <sub>2</sub>	5.76
2- ANHYDRIDE CARBONIQUE	CO <sub>2</sub>	0.21
3- HELIUM	He	0.19
4- METHANE	CH <sub>4</sub>	82.80
5- ETHANE	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	7.22
6- PROPANE	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	2.31
7- ISOBUTANE	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0.39
8- BUTANE	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0.61
9- ISOPENTANE	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	0.14
10- PENTANE	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	0.17
11- HEXANE	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	0.20

b) poide moléculaire des différents composants du gaz naturel

Composants		Poids molaire
1- AZOTE	N <sub>2</sub>	28
2- ANHYDRIDE CARBONIQUE	CO <sub>2</sub>	44
3- HELIUM	He	4
4- METHANE	CH <sub>4</sub>	16
5- ETHANE	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	30
6- PROPANE	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	44
7- ISOBUTANE	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	58
8- BUTANE	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	58
9- ISOPENTANE	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	72
10- PENTANE	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	72
11- HEXANE	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	86

... 4 ...

c) poids moléculaire du gaz naturel

1- AZOTE	N <sub>2</sub>	1.613
2- ANHYDRIDE CARBONIQUE	CO <sub>2</sub>	0.092
3- HELIUM	He	0.007
4- METHANE	CH <sub>4</sub>	13.248
5- ETHANE	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	2.166
6- PROPANE	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	1.0164
7- ISOBUTANE	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0.2262
8- BUTANE	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0.354
9- ISOPENTANE	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	0.101
10- PENTANE	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	0.122
11- HEXANE	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	0.172
	poids moléculaire .....	19.117

D) poids spécifique du gaz naturel à 15°C et à 760 mm de Hg

1° - Poids spécifique absolu

$$\rho = \frac{M \cdot P_0}{848 \cdot T_0} = 0.809 \text{ Kg/ Nm}^3$$

: poids spécifique absolu du gaz - Kg / Nm<sup>3</sup>

M : poids moléculaire du gaz            Kilomole

P<sub>0</sub>: Pression de référence

T<sub>0</sub> : Température de référence

2° - poids spécifique relatif à l'air

$$r = \frac{V_0}{V_e} = \frac{0.809}{1.225} = 0.66 \text{ (densité)}$$

... / ...

e) Température Pseudo-critique du gaz naturel

1- AZOTE	N <sub>2</sub>	7.251 °K
2- ANHYDRIDE CARBONIQUE	CO <sub>2</sub>	0.638 °K
3- HELIUM	He	0.009 °K
4- METHANE	CH <sub>4</sub>	157.734 °K
5- ETHANE	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	22.042 °K
6- PROPANE	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	8.542 °K
7- ISOBUTANE	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	1.586 °K
8- BUTANE	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	2.592 °K
9- ISOPENTANE	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	0.645 °K
10- NORMAL PENTANE	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	0.797 °K
11- HEXANE	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	1.016 °K

Température pseudo-critique ..... T<sub>c</sub> = 202.852 °K

f) Température pseudo-critique réduite du gaz naturel

T<sub>r</sub> = 1.42

g) Pression pseudo-critique du gaz naturel

1- AZOTE	N <sub>2</sub>	1.99 Kg / cm <sup>2</sup>
2- ANHYDRIDE CARBONIQUE	CO <sub>2</sub>	0.16 Kg / cm <sup>2</sup>
3- HELIUM	He	0.00 Kg / cm <sup>2</sup>
4- METHANE	CH <sub>4</sub>	39.16 Kg / cm <sup>2</sup>
5- ETHANE	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	3.59 Kg / cm <sup>2</sup>
6- PROPANE	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	1.00 Kg / cm <sup>2</sup>
7- ISOBUTANE	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0.15 Kg / cm <sup>2</sup>
8- BUTANE	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0.24 Kg / cm <sup>2</sup>
9- ISOPENTANE	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	0.05 Kg / cm <sup>2</sup>
10- NORMAL PENTANE	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	0.06 Kg / cm <sup>2</sup>
11- HEXANE	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	0.06 Kg / cm <sup>2</sup>

Pression pseudo-critique ..... P<sub>c</sub> = 46.46 Kg / cm<sup>2</sup>

h) Viscosité dynamique du gaz naturel

1- AZOTE	N <sub>2</sub>	0.098496 × 10 <sup>-4</sup> Poise
----------	----------------	-----------------------------------

2- ANHYDRIDE CARBONIQUE	CO <sub>2</sub>	0.003066 × 10 <sup>-4</sup>	poise
3- HELIUM	He	0.003420 × 10 <sup>-4</sup>	poise
4- METHANE	CH <sub>4</sub>	0.890100 × 10 <sup>-4</sup>	"
5- ETHANE	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0.066424 × 10 <sup>-4</sup>	"
6- PROPANE	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	0.018249 × 10 <sup>-4</sup>	"
7- ISOBUTANE	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0.002788 × 10 <sup>-4</sup>	"
8- BUTANE	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0.004361 × 10 <sup>-4</sup>	"
9- ISOPENTANE	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	0.000938 × 10 <sup>-4</sup>	"
10- NORMAL PENTANE	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	0.001139 × 10 <sup>-4</sup>	"
11- HEXANE	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	0.001320 × 10 <sup>-4</sup>	"
Viscosité dynamique .....		1.090301 × 10 <sup>-4</sup>	"

i) Chaleur spécifique moléculaire du gaz natyrel

1- AZOTE	N <sub>2</sub>	0.40059648
2- ANHYDRIDE CARBONIQUE	CO <sub>2</sub>	0.0182805
3- HELIUM	He	0.00944300
4- METHANE	CH <sub>4</sub>	6.9386400
5- ETHANE	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	0.8757860
6- PROPANE	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	0.3885420
7- ISOBUTANE	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0.0861900
8- BUTANE	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0.1393630
9- ISOPENTANE	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	0.0386260
10- PENTANE	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	0.0480590
11- HEXANE	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub>	0.677400

Chaleur spécifique moléculaire MCP = 9.01116598

j) Viscosité cinématique du gaz naturel

$$C = \frac{1.090301 \times 10^{-4}}{0.809 \times 10^{-3}} = 0.13477 \text{ stokes} = 13.477 \text{ cst}$$

k) exposant adiabatique = Cp / Cv

$$\frac{\text{MCP}}{\text{MCP} - 1.985} = 1.28251$$

PCS 9500 Kcal / Nm<sup>3</sup>

contenu d'eau : 73g sur 100 Nm<sup>3</sup> de gaz

... / ...

(d'après KATZ)

PRESSION DE FORMATION  
D'HYDRATES Kg/cm<sup>2</sup> Abs

METHANE d=0.555

d=0.6

0.7

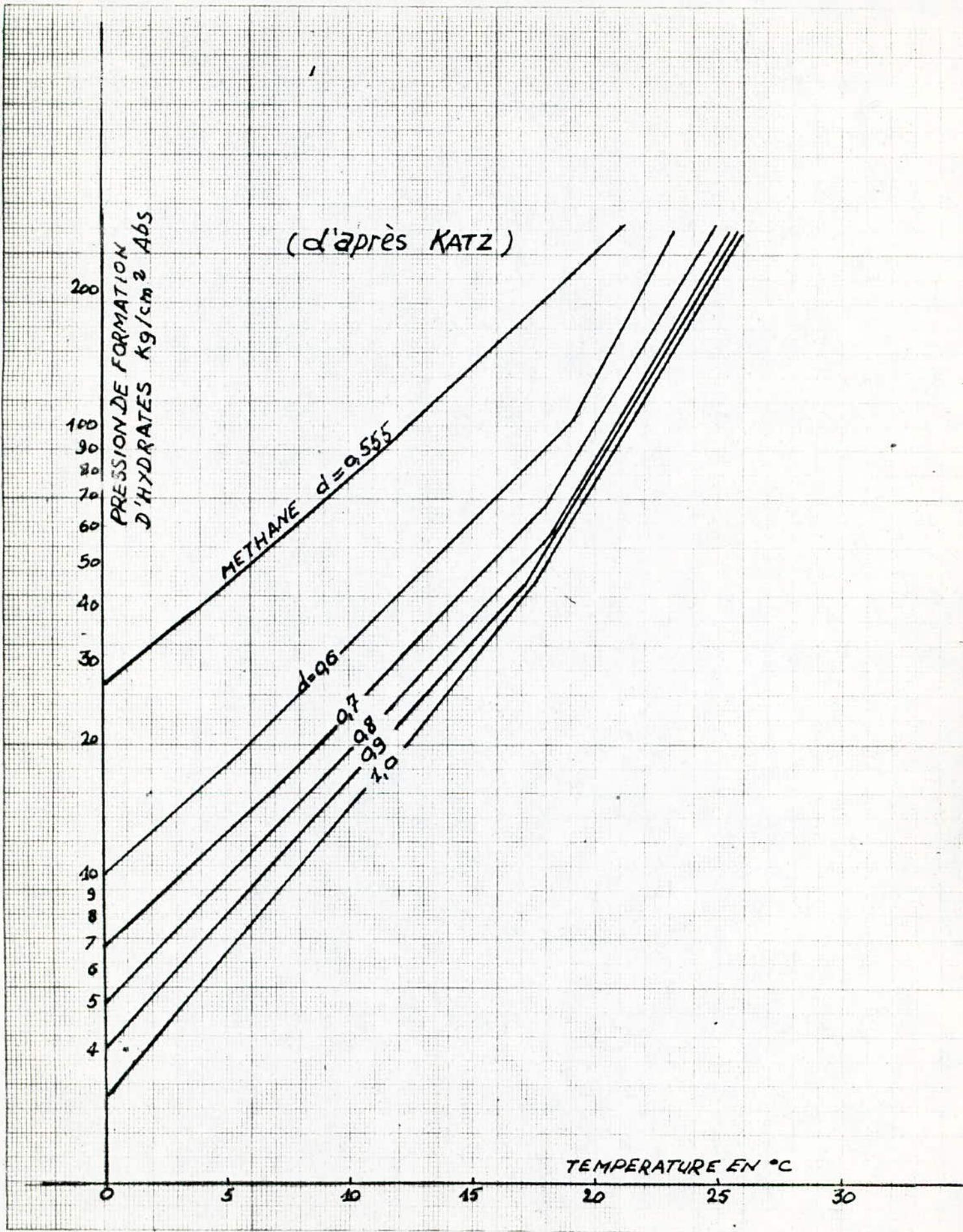
0.8

0.9

1.0

TEMPERATURE EN °C

Courbes de formation d'hydrates en fonction de la densité du GAZ



Exemple:

$$l = 50 \text{ mm}$$

$$r = 24b = 256 \text{ abs}$$

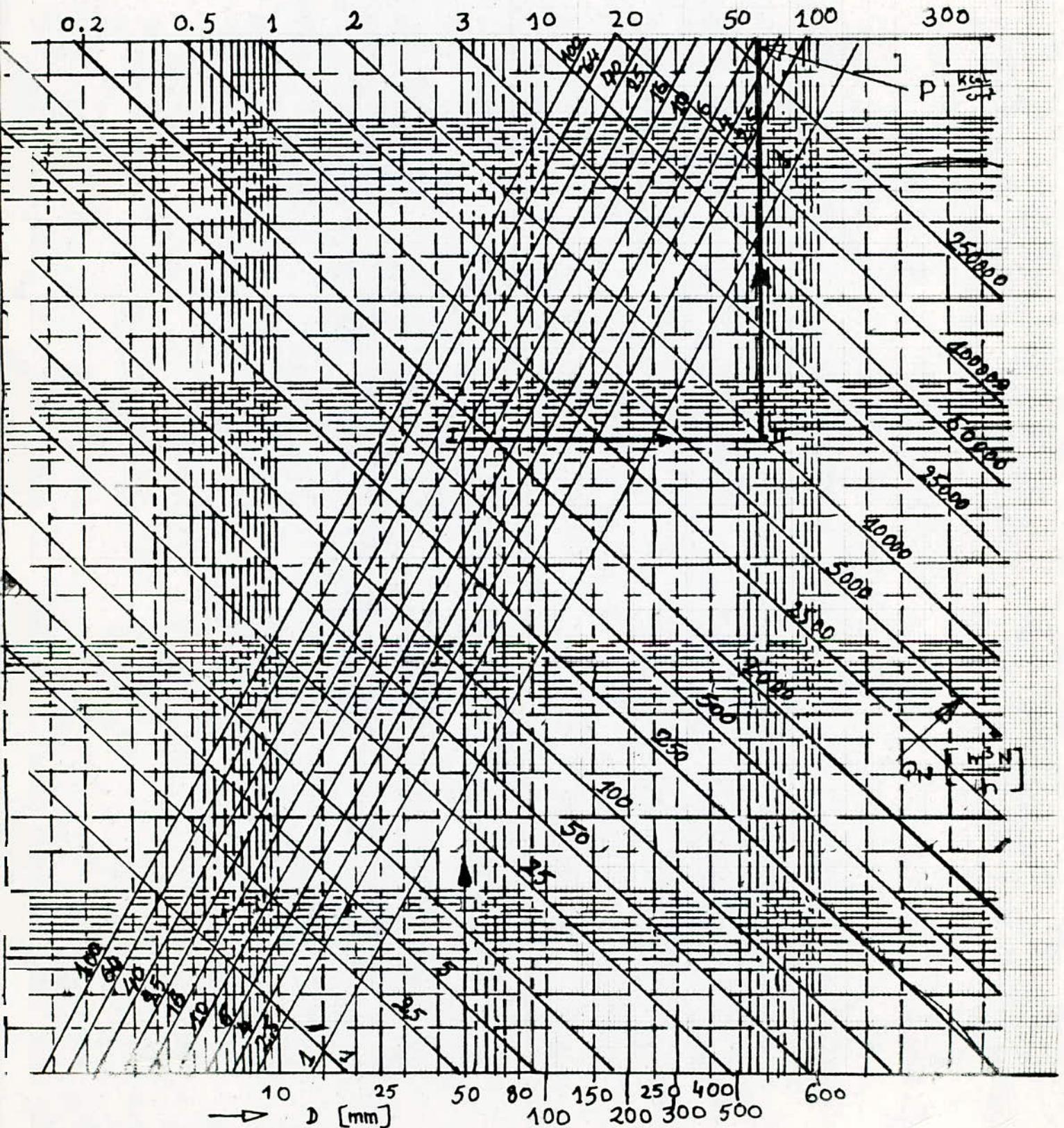
$$Q_n = 10.000 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

$$c = ? \text{ (m/s)}$$

1. La droite  $D = 50 \text{ mm}$  coupe  
 $P = 250 \text{ abs. en I}$

2. L'horizontale de I coupe  
 $Q_n = 10.000 \text{ Nm}^3/\text{h en II}$

3. A la verticale de II on  
trouve  $c = 60 \text{ m/s}$



```

0 REM *****
1 REM ** VALEUR DES QUANTITES DE CHALEUR EN FONCTION DES PARAMETRES **
   ATMOSPHERIQUES "TETA ; V1(vitesse du vent )"
2 REM *****
3 REM **" QCD=chaleur par conduction ; QCV= chaleur par convection **
4 REM   QP=Chaleur perdue ; QR= Chaleur totale
5 REM *****
6 REM *** valeur de la resistance R du materiau utilise pour le chauffage ***
7 REM   du tuyau contenant du gaz
8 REM   *****
9 B=-1
10 CLS
20 SCREEN 3
30 RE=.5*10^(-3):DE=10^(-3)
40 RI=.3*10^-3:DI=.6*10^-3 :E=DE-DI
50 T1=5
60 L=.3
70 LMDAH=40
71 J=5
72 C=41.8/36
80 KSI=1
90 S=2*3.14*RI*L
100 FOR TETA=6 TO 170 STEP 30
110 FOR V1=0 TO 5 STEP 1
111 FOR S1=1 TO 5 STEP 1
120 B=B+1
130 TETA2=TETA-T1
140 S=2*3.14*RI*L
150 Q=1.38
160 V=3600
170 CP=.47
180 RO=.817
190 G=9.810001
200 GAMA=RO*G
210 PE=(V*DI*GAMA*CP)/LMDAH
220 KI=.04*PE^ .75*LMDAH*KSI/DI
230 QCV=KI*S*TETA2*C
240 QCD=2*3.14*C*LMDAH*L*(TETA-T1)/LOG(DE/DI)
250 HV=5.7+3.8*V1
260 QP=HV*S*TETA2*C
270 QR=QCD+QCV+QP
281 K=QR/(S1*(TETA-T1))
282 R=K*(TETA-T1)/(J^2*S1)
290 IF B=0 OR B=5 OR B=10 OR B=15 OR B=20 OR B=25 OR B=30 OR B=35 OR B=40 OR B=4
5 THEN LPRINT"TETA"," V1"," QCD"," QP"," QCV"," QR","
   S1"," R"
300 LPRINT TETA," ",V1," ",QCD," ",QP," ",QCV," ",QR," ",S1," ";R
301 NEXT S1
310 NEXT V1
320 LPRINT"
330 NEXT TETA
435 END

```

\*\*\*\*\*  
\*BIBLIOGRAPHIE\*  
\*\*\*\*\*

- \*- Etude expérimentale et simulation numérique du déséquilibre dans un générateur photo-voltaïque .  
Projet de fin d'étude , promotion juin 1986 , proposé par: S.A.DARADJI et étudié par : TLILI et LAHMICI .
- \*- Technique de l'ingénieur .Article Mécanique des fluides .  
ANDRE FORTIER A.700 .
- \*- Thermodynamique appliquée .KLJNG .
- \*- Calcul des tuyauteries . ONEGA .
- \*- Spécifications et Normes SONEGAS .
- \*- Etude Expérimentale Du comportement d'un Générateur PHOTO-VOLTAIQUE Couplé à une charge .  
Projet de fin d'étude , promotion Janvier 1986 , proposé par: S.A.DARADJI et étudié par : YETTOU et BELAID .
- \*- Turbo-machines . Hydrauliques et Thermiques ( TOME IV )
- \*- Caractérisation électrique des convertisseurs PHOTO-VOLTAIQUES .  
projet de fin d'étude , promotion Janvier 1978 , proposé par : A.ADANE et étudié par : IGHILAHIRIZ et HOCINE