SIMULATION D'UN CIRCUIT DE REGULATION DE PUISSANCE D'UNE DIODE LASER

T. ROYANT
Lycée Félix Le Dantec
22300 BREST

1. INTRODUCTION

L'étude par simulation est très intéressante pour des circuits comportant des éléments sensibles et assez onéreux tel qu'une diode Laser.
Elle permet de plus de faire varier des paramètres du schéma de régulation (création de perturbations précises) et d'analyser toutes les grandeurs en réponse.

On trouve très peu de modèles SPICE de diode laser, décrivant correctement le comportement électro-optique et l'influence de la température : après une première partie présentant succintement la structure d'une diode Laser, la seconde partie est consacrée à la définition d'un modèle SPICE en partant de données constructeur, utilisable ensuite par tout simulateur analogique compatible.

Une troisième partie comporte l'étude du modèle élaboré dans un circuit classique de régulation de puissance optique, avec l'analyse de l'influence de la température notamment.

2. NOTIONS SUR LA PHYSIQUE DES DIODES LASER

Un laser est un émetteur de lumière basé sur le phénomène d'émission stimulée :
un électron amené dans la bande de conduction (par une opération de pompage) interagissant avec un photon inducteur, peut retomber dans la bande de valence en émettant un photon dit stimulé de mêmes longueur d'onde, phase, polarisation et directivité spatiale que le photon incident.

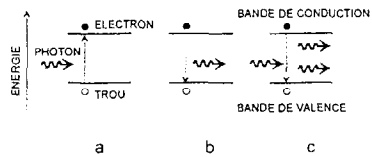


Figure 1 : a: absorption b: émission spontanée c: émission stimulée

Les 2 conditions favorisant l'émission stimulée et permettant d'obtenir l'effet laser sont :

--> la réalisation d'une inversion de population (pompage par injection de porteurs : courant alimentant la diode laser)

--> la création d'une cavité résonante pour obtenir une amplification de lumière (le clivage des faces, Cf figure suivante, permet d'obtenir une cavité de type Pérot-Fabry)

L'amplification de lumière se produit lorsque le courant dépasse une valeur de seuil notée ITh variant de 10 à 200 mA selon les diodes et fonction de la température.

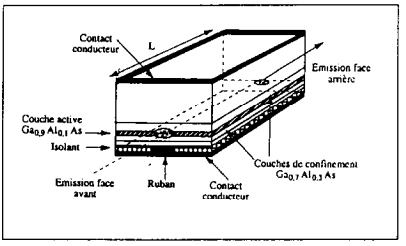


Fig. 2 Laser de type Pérot Fabry

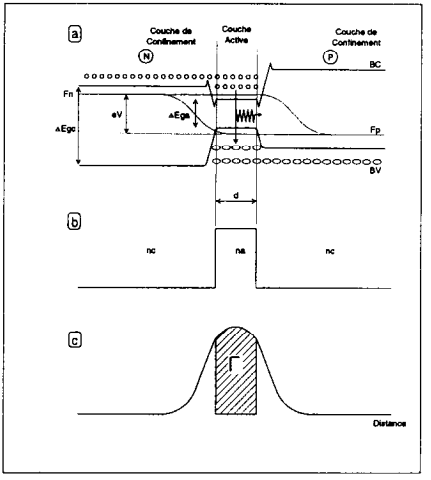


Fig. 3 Schéma d'une double hétérostructure

La figure 3-a) représente le diagramme des bandes d'énergie : on remarque que la bande interdite de la zone active est plus petite que celle des matériaux qui l'entourent : ceci permet d'obtenir le confinement électronique.

L'indice de réfraction de la zone active étant plus élevé que l'indice de réfraction des couches adjacentes (Fig. 3-b) : la lumière est donc confinée dans cette couche active, ainsi le couplage entre les photons et les électrons fournissant le gain optique est amélioré.

La figure 3-c) représente le carré de l'amplitude du champ optique (intensité lumineuse dans le matériau).

La longueur d'onde de la lumière émise est fonction des matériaux semi-conducteurs utilisés, comme l'indique le tableau suivant :

Longueur d'onde λ	0,8 µm	1,3 µm	1,55 µm
Substrat	GaAs	InP	InP
Couche active	GaAs	$Ga_{0,28}In_{0,72}As_{0,6}P_{0,4}$	$Ga_{0,2}In_{0,8}As_{0,9}P_{0,1}$
Couche de confinement	$Ga_{0,6}Al_{0,4}As$	InP	InP

La caractéristique Puissance Optique - Courant Laser (Figure 4) est constituée de 2 régions distinctes : les zones d'émission spontanée et stimulée. La transition entre les 2 zones se fait pour le courant Laser de seuil ITh (I Threshold), ITh augmentant avec la température.

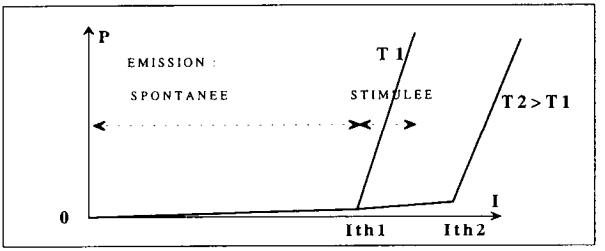
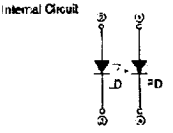


Figure 4

3. ELABORATION D'UN MODELE DE DIODE LASER

3.1) Exploitation des données constructeur

L'exemple s'appuie sur une diode laser classique, HL1324CF de chez HITACHI, comportant la diode laser émettrice et la photodiode PIN permettant de surveiller la puissance optique effectivement émise.



Le constructeur fournit les caractéristiques suivantes, qu'il s'agit d'exploiter :

- Figure 5.a : Puissance Optique = Fn (Courant Laser)
- Figure 5.b : Courant Laser = Fn(Tension Laser)
- Figure 6.a : Courant de seuil Laser = Fn (Température)
- Figure 6.b : Puissance optique = Fn (Courant PIN)

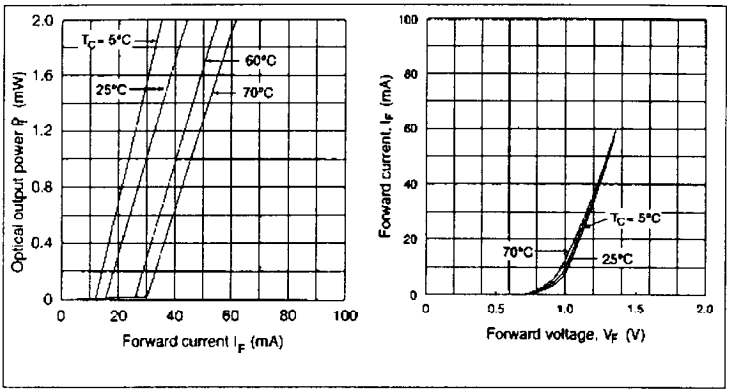


Figure 5.a **Figure 5.b**

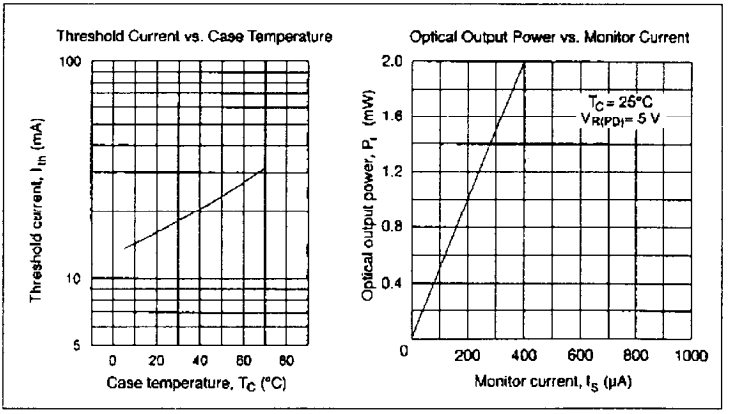


Figure 6.a **Figure 6.b**

La caractéristique 5.a montre l'influence importante de la température sur la puissance optique émise, avec le seuil de courant caractéristique : c'est pourquoi en général on utilise un dispositif de régulation de température de la diode avec une cellule Peltier, en plus de la régulation de puissance optique.

De la figure 5.b on déduit que la caractéristique Vf / If varie peu avec la température et que la tension seuil se situe autour de 0,9V.

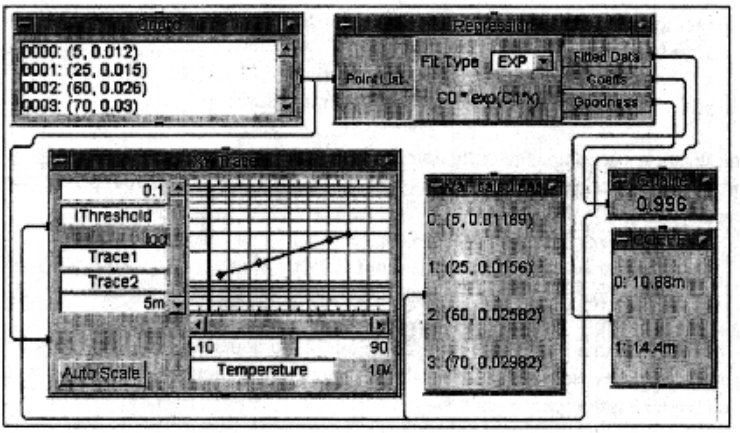
EXPRESSION DU COURANT DE SEUIL LASER (figure 6.a):

Le courant de seuil laser (Ithreshold) évolue de façon exponentielle avec la température. Avec une légère approximation (quantifiée ci-après), si on assimile la caractéristique à une droite, on obtient :

$$Ln\ (IThreshold) = a.TC + b \Rightarrow IThreshold = C0.\ exp\ (C1.TC)$$

Pour effectuer la modélisation de cette caractéristique, on peut utiliser le logiciel de programmation graphique HP VEE (logiciel dédié aux instruments GPIB, cartes d'acquisition PC, ... , doté de fonctions de traitement très intéressantes).

La figure suivante montre le programme et les résultats :



La relation à utiliser pour calculer le courant de seuil est donc :

ISeuil = 10.88m * exp (14.4m * TEMP)

RELATION ENTRE PUISSANCE OPTIQUE ET COURANT PIN (figure 6.b)

A 25 °C et pour une tension de polarisation inverse de 5V, on déduit une relation linéaire entre le courant inverse à travers la photodiode PIN et la puissance optique :

*IPIN (A) = 0.2 * Popt (W)*

Cette première relation serait à modifier pour tenir compte des effets de la température et de la tension de polarisation inverse, à condition de disposer des caractéristiques de la PIN, ce qui est rarement le cas.

NB : Le courant inverse IPIN est image de la puissance optique donc, lors de l'analyse des résultats de simulation avec la diode laser, cette grandeur joue le rôle de grandeur de sortie. Pour tracer la puissance optique on utilisera la formule : ***Poptique = 5 * IPIN***

EXPRESSION DE LA PUISSANCE OPTIQUE EN FONCTION DU COURANT LASER (Figure 5.a) :

Pour une température donnée, la caractéristique se décompose en 2 parties linéaires :

- pour ILaser < ISeuil Popt. # 0
- pour ILaser > ISeuil Popt. = a.ILaser +b
  (a variant légèrement avec la température)

La modélisation s'accompagne obligatoirement d'une approximation. Le choix de la description mathématique la plus adéquate est fonction de ce que l'on veut privilégier dans cette caractéristique :

- allure parfaitement linéaire dans le domaine d'émission normal
- Puissance optique non nulle pour ILaser < ISeuil
- Pente $\Delta Popt/\Delta ILaser$ légèrement dépendante de la température

La description par une fonction unique, couvrant tout le domaine de ILaser, et modélisant les 2 parties linéaires, de type polynomiale ou exponentielle, donne des résultats moins bons qu'une description par segments.

Dans un circuit compatible SPICE, 2 éléments sont définissables par domaines linéaires en fonction du niveau d'une grandeur de contrôle avec le mot-clef **TABLE**.
Ce sont les sources :

- E : source de tension contrôlée par une tension
- G : source de courant contrôlée par un courant

Ces sources permettent aussi un contrôle par une expression mathématique, faisant intervenir des intensités, tensions et paramètres.

La photodiode PIN étant assimilable à une source de courant d'intensité proportionnelle au flux lumineux reçu, la source de type G est bien adaptée.

La syntaxe est la suivante :

G.. pôle+ pôle- **TABLE** {Expression mathématique E} = (E1,I1)
+ (E2,I2) (E3,I3)

Le courant inverse de la photodiode (image de la puissance optique) est fonction du courant laser et du seuil.
L'expression mathématique de contrôle à considérer est donc : ***IC = ILaser - ISeuil***

GPD pôle+ pôle- **TABLE** {IC courant de contrôle} = (-10m,0)
+ (0,4u) (30m,0.43m)

(courant allant du pôle + vers le pôle - à travers la source, cf symbole ci-après)

Interprétation :

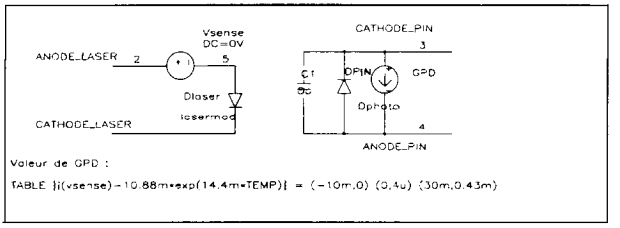
- pour IC < -10m : I(GPD) = 0
- pour -10m < IC < 0 : I(GPD) variation linéaire entre 0 et 4u
- pour 0 < IC < 30m : I(GPD) varie de façon linéaire entre 4u et 430uA
- pour IC > 30m : I(GPD) = 430 uA (saturation non réelle mais correspond à une utilisation anormale de la diode, en continu)

Le couple de points (IC = 30m ; IPIN = 430u) résulte de l'étude de la caractéristique pour T = 25°C.

3.2) MACROMODELE SPICE DE LA DIODE LASER

Les relations théoriques étant établies, il reste à les appliquer avec des composants élémentaires dans le macromodèle.

Le schéma interne qui permet de modéliser la diode laser d'entrée, la photodiode PIN de sortie est le suivant :



La source de tension continue Vsense = 0V ne sert qu'à capter le courant ILASER pour faire le couplage avec la source GPD de la photodiode.

La diode laser utilise un modèle lasermod défini pour obtenir un seuil de 0,9V à 25°C.

Pour la PIN, la source GPD définie par TABLE permet d'obtenir un courant inverse (de cathode vers Anode) proportionnel à ILaser en tenant compte du seuil.

La diode normale DPIN (de modèle dphoto) sert à donner au dipôle la caractéristique d'une diode lorsque la PIN est polarisée en direct.

Le modèle SPICE correspond à la "Netliste" de cette structure, encadrée par les directives .SUBCKT et .ENDS, et comprenant la définition des modèles utilisés pour les semiconducteurs DLASER et DPIN.

Le macromodèle SPICE correspondant est donné sur la page suivante :

```
*Definition d'un modele de diode Laser
* Modele avec seuil de courant pour la puissance optique
* Caracteristique LINEAIRE

*                Cathode DLaser
*                *   Anode Dlaser
*                *   *   PIN Cathode
*                *   *   *   PIN Anode
*                *   *   *   *
.subckt laserhi   1   2   3   4   PARAMS:  C0=10.88m C1=14.4m

* ITRHESHOLD = C0*exp(C1*TEMP)
* Partie Laser
Dlaser 5 1 lasermod
Vsense 2 5 dc 0

* Partie PIN
DPIN 4 3 Dphoto
GPD 3 4  TABLE  {i(vsense) -(C0*exp(C1*TEMP)) } = (-10m,0) (0,4u)(30m,0.430m)
cpd 4 3 8p

*REMARQUE = Poptique (W) = 5 * I(PIN)

* Modèle pour diode laser
.MODEL lasermod D(IS=46.078E-12 N=1.9027 RS=5.5339 CJO=1.0000E-12
+ M=.3333 VJ=.75 ISR=100.00E-12 BV=100 IBV=100.00E-6 TT=5.0000E-9)

* modele pour photodiode
.model dphoto d(is=4.5E-12 Rs=150  N=1.3  XTI=4  Eg=1.11
+ cjo=14p  m=1.96  vj=1.9)

.ends
```

REMARQUE :
le modèle ainsi défini est paramétrable pour son comportement en température. Les valeurs par défauts des paramètres C0 et C1, correspondants à la diode étudiée, pourraient éventuellement être modifiés lors de l'appel du macromodèle.

3.3) UTILISATION DU MODELE SPICE :

Pour utiliser ce modèle SPICE, 2 approches sont possibles :

• si l'on est habitué à conduire une simulation directement à partir de l'édition du fichier circuit (Liste des équipotentielles + directives d'analyse), il suffit d'ajouter la définition du macromodèle ou l'inclure dans une librairie à charger : cette méthode est la plus rapide dans le seul but de la simulation mais nécessite la connaissance du langage Spice.

Exemple de fichier circuit permettant de faire varier Ilaser de 0 à 60 mA par pas de 1 mA (schéma correspondant page suivante) :

** TEST modèle LASERHI* à 27°C

ILaser 0 1 DC 1m
.DC ILaser 0 60m 1m
XLaser 0 1 2 0 LASERHI
R1 0 2 1m
.probe

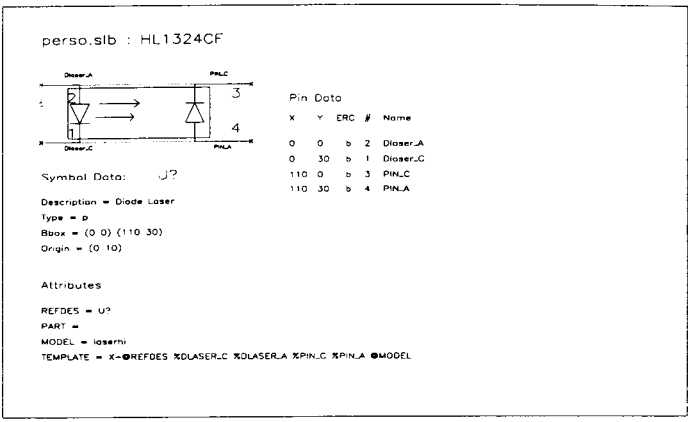
** Insertion du modèle utilisé :*
.subckt .....
....
.ends

.end

• Si l'on travaille à partir d'un logiciel de saisie de schéma, il faut alors créer un symbole du composant et y associer le modèle enregistré dans un fichier texte tel que LASERHI.LIB, à déclarer dans l'environnement du simulateur.
Moyennant la prise en main du logiciel de saisie de schémas et l'utilisation des menus pour configurer l'analyse, la majorité des simulations peuvent être conduites sans connaitre le langage Spice.
La liaison entre symbole et modèle SPICE nécessite de définir certains attributs importants :

=> TEMPLATE (ou ORDER) : ordre dans lequel vont être listées la référence , les broches du symbole (Cathode_Laser Anode_Laser CathodePIN AnodePIN), le nom du modèle de description, et optionnellement des paramètres avec leur valeur par défaut.
=> MODEL : Nom du modèle : LASERHI

La figure suivante présente un exemple de symbole possible :



La présente étude a été conduite avec les outils logiciels de l'environnement DESIGNLAB : produit MICROSIM intégrant la saisie de schéma (SCHEMATICS), la simulation mixte analogique/digitale (PSpice), le grapheur (PROBE), le routage (SPECCTRA) et dont une version d'évaluation gratuite permet de simuler de nombreux circuits utilisés avec les élèves (limitation en nombre de composants et d'équipotentielles mais pas en fonctionnalités).

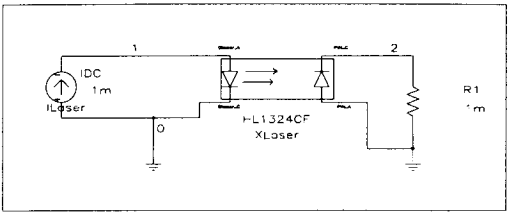
Les versions limitées et complète sont distribuées par la société ALS Design, 92100 BOULOGNE.

Les simulations décrites par la suite sont présentées à partir du schéma et les indications sur les analyses à faire : tous les fichiers circuits correspondants (directement utilisables par le simulateur) sont fournis en annexes.

*** Note : l'auteur tient à la disposition des collègues intéressés une disquette contenant les fichiers de simulation (21 F en timbres poste)**

SCHEMA DE TEST DU MODELE :

Pour vérifier le bon fonctionnement du modèle et l'accord avec les caractéristiques constructeur, on simule le circuit suivant dans lequel on fait varier le courant Laser de 0 à 60 mA par pas de 1 mA pour différentes températures : 5, 25, 60 et 70 °C.



Remarque : la diode PIN est polarisée sous une tension nulle pour le test (R1.IPIN # 0)

RESULTATS :

On produit les caractéristiques correspondant aux figures 5.a et 5.b :

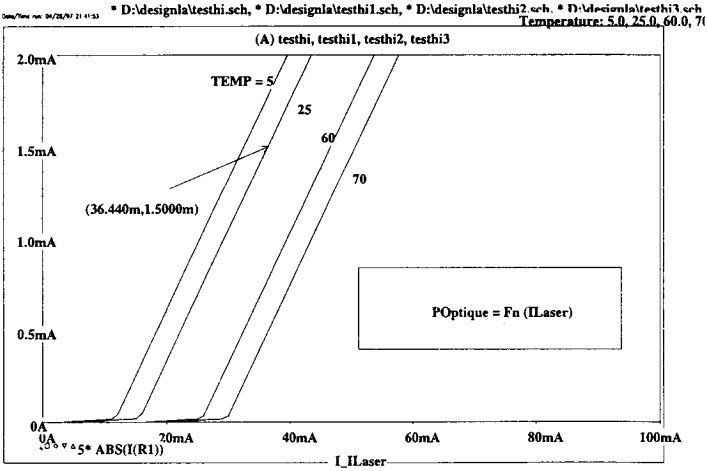


Figure 5.a'

Remarques :

* Le graphe précédent est obtenu en superposant les résultats d'analyse aux différentes températures avec la commande APPEND de Probe (version limitée à une grandeur variable)

* Lorsque l'on fait varier la température d'analyse, ce sont tous les composants qui travaillent à la valeur fixée, mais l'influence sur la diode Laser est largement prépondérante : les résultats sont donc en bon accord avec les caractéristiques constructeur.

En ordonnées, on trace la puissance optique (5*IPIN), les mA étant à interpréter comme des mW.

Les approximations faites sur le calcul de ISeuil et sur le choix d'une pente unique ($\Delta Popt/\Delta ILaser$), expliquent les écarts de quelques % par rapport aux valeurs constructeur.

Caractéristique courant / tension de la diode Laser :

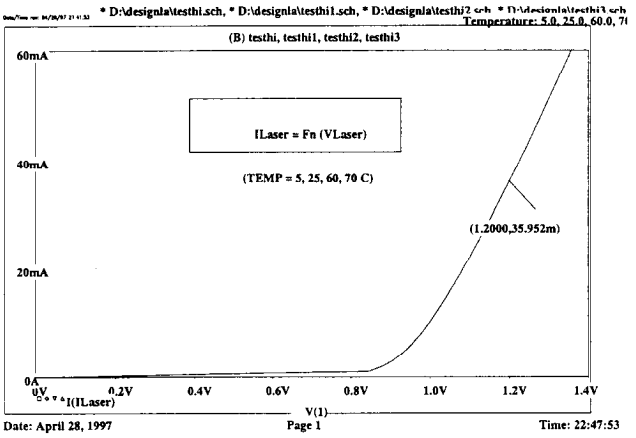


Figure 5.b'

Le modèle lasermod utilisé pour la diode laser, permet d'obtenir une influence de la température insignifiante, conformément à la caractéristique constructeur figure 5.b.

4. ETUDE D'UN CIRCUIT DE REGULATION DE PUISSANCE

L'influence de la température sur la caractéristique d'émission oblige à utiliser un système de régulation qui permet d'agir sur ILaser en fonction :

=> du courant issu de la photodiode PIN qui capte une fraction de la lumière effectivement émise (environ 5 %)

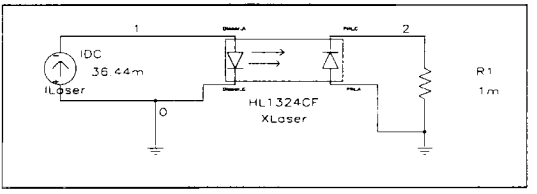
=> du réglage d'un potentiomètre (consigne fixe)

Le but de la simulation est de montrer que la puissance optique varie peu sous l'influence la température et est ajustable via un potentiomètre de réglage.

4.1) Alimentation de la diode Laser par une source de courant

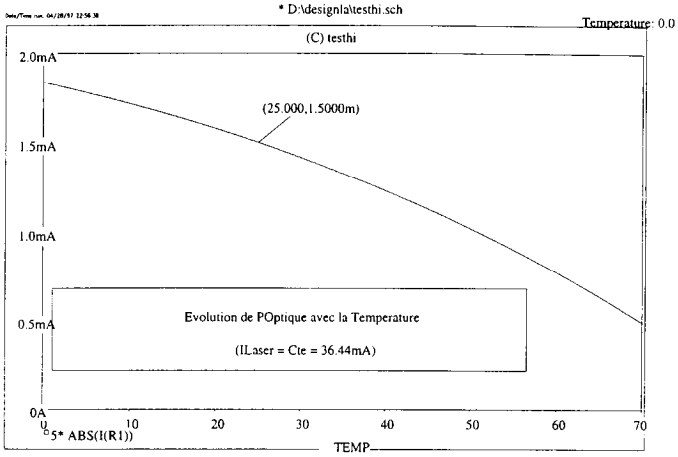
Pour bien montrer la nécessité d'utiliser un système régulé en puissance, on commence par analyser l'effet de la température sur la puissance optique, à courant Laser constant : on fixe ILaser = 36,44mA, à 25 °C on doit obtenir une puissance optique de l'ordre de 1,5mw.

On saisit et on simule le schéma suivant, pour TEMP variant entre 0 et 70°C :

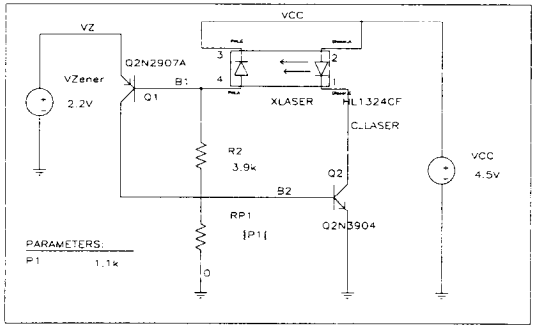


Le graphe qui suit montre les résultats : la puissance optique décroit fortement quand la température augmente.

Un dispositif de régulation de puissance est donc indispensable, complété en pratique par un circuit indépendant de régulation de température (avec cellule Peltier).



4.2) Schéma de régulation



L'analyse théorique (voir ci-après) prévoit une puissance optique :

Poptique = 5 * (VZ-0,7)/(R2+RP1)

AN : Popt. = 1,5 mW (avec P1 = 1,1k)

On effectue une étude en température de 5 à 70 °C et on trace les évolutions de la puissance optique (5*IPIN) et de ILaser.

4.3) Résultats de simulation

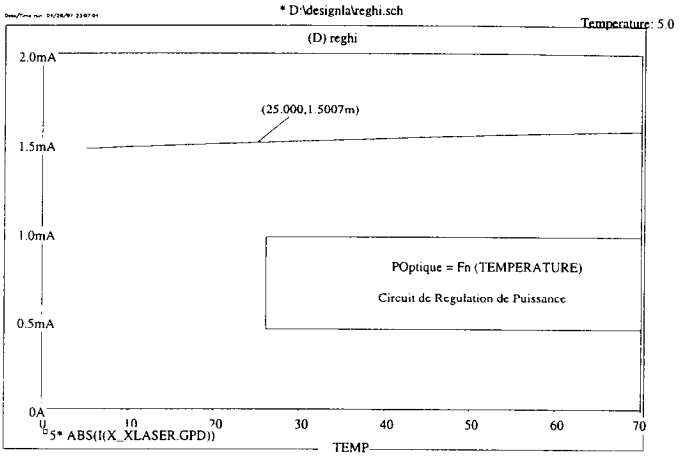


Figure : Poptique = Fn (Température)

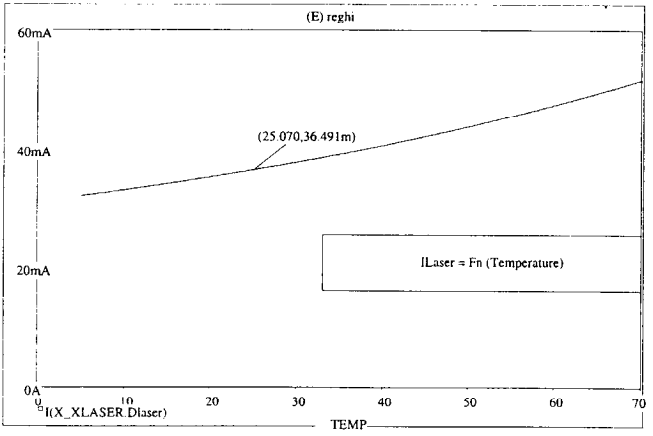


Figure : ILaser = Fn (Température)

Les grandeurs tracées sont :

==> 5*abs(I(GPD)) qui modélise le courant inverse de la photodiode PIN

==> I(DLaser) : courant dans la diode Laser

Le fonctionnement du circuit de régulation est correct : la température augmentant, le courant Laser a augmenté pour maintenir la puissance optique à une valeur à peu près constante autour de 1,5 mW.

On constate cependant une légère augmentation de IPIN : ceci provient du fait que la température agit sur tous les éléments du circuit, entrainant notamment une légère évolution des caractéristiques des transistors Q2 et Q1. La tension VEB1 de Q1 baisse lorsque la température diminue, ce qui entraine une augmentation de Iconsigne (voir ci-après l'analyse théorique), et donc de POptique.

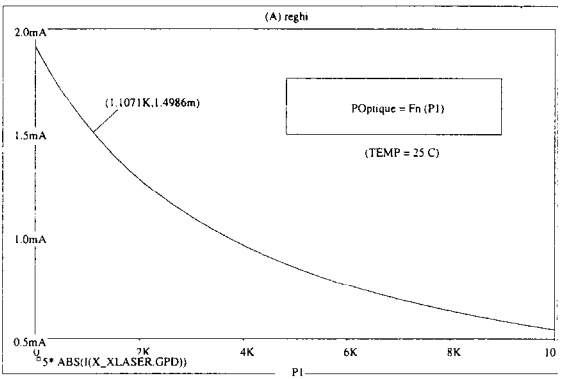
On note donc à ce niveau l'intérêt qu'aurait un simulateur permettant d'imposer des températures d'analyse différentes selon les composants, comme ceci est le cas en pratique.

Une autre solution serait de remplacer Q1 par un transistor présentant une dépendance moindre avec la température : la modélisation de ce transistor "idéal" nécessite de bien analyser le modèle spice d'un transistor bipolaire et/ou, à l'aide d'une version complète du logiciel, d'utiliser le module PARTS (générateur de modèles via des graphes caractéristiques).

réglage de la puissance optique par p1:

L'étude théorique prévoit : POptique = 5 * 1,5/(R2+RP1)

On peut vérifier cette formule en effectuant une analyse paramétrée avec RP1 variant de 0 à 10 kohms : c'est le même schéma que précédemment, que l'on étudie à 25°C.



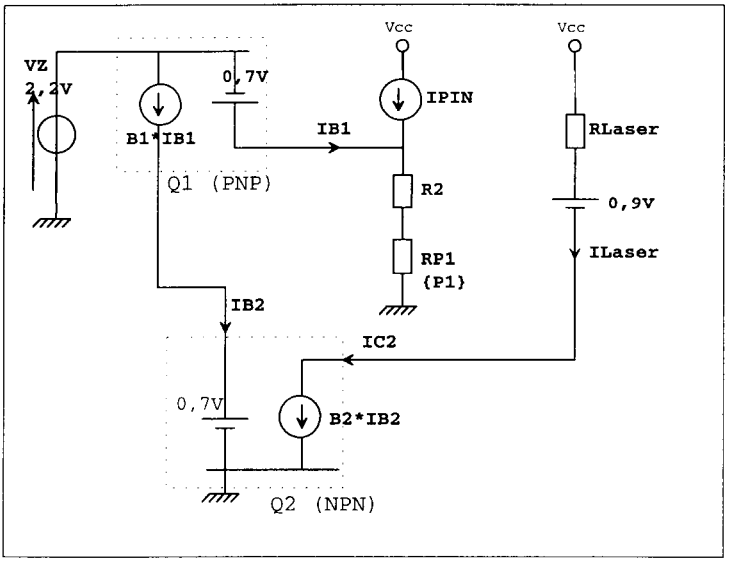
4.4) Justification théorique du fonctionnement :

On effectue une modélisation simplifiée de chaque élément du montage :

- Les transistors Q1 et Q2 par leur schéma équivalent en émetteur commun en négligeant la conductance entre C et E, ainsi que la résistance série rBE (<< R2 +RP1)

- La photodiode PIN par une source de courant : IPIN = Popt / 5
- La diode laser par une source de tension (0,9V ; Rlaser)

Le schéma étudié devient :



D'où les relations :

$$IB1 = \frac{VZ-0,7}{R2+RP1} - IPIN \qquad IB2 = B1*IB1$$

$$(1)\ ILASER = B1*B2*\left(\frac{VZ-0,7}{R2+RP1} - IPIN\right)$$

avec B1 et B2 les Bétas des transistors : B1 = 230 et B2 = 420

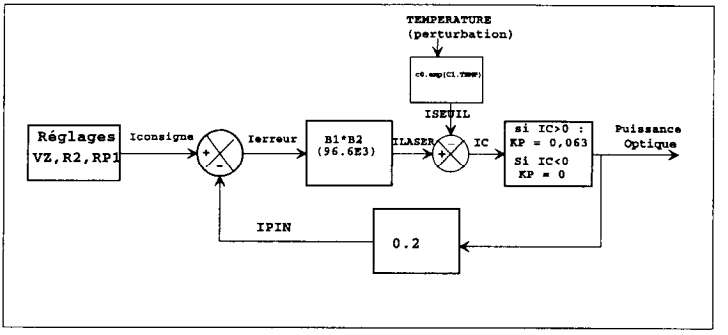
La relation (1) donne : ILASER = 96,6E3 *(Iconsigne - IPIN)

avec : $\text{Iconsigne} = \frac{VZ-0.7}{R2+RP1}$ (2)

Tout se passe en effet comme si l'on imposait au système de régulation une valeur de consigne sur IPIN : le coefficient d'amplification important (facteur proportionnel) fait que IPIN sera très proche de cette valeur réglée par VZ, R2 et RP1.

Si l'on revient à la légère augmentation de POptique constatée lors de la simulation, la relation (2) montre bien que si VEB1 de Q1 diminue (évolution normale quand la température augmente), Iconsigne augmente et ainsi POptique.

On peut présenter la structure simplifiée sous forme d'un schéma-bloc :



Lorsque la régulation fonctionne : **IPIN = Iconsigne** et donc en sortie on a :

Poptique = 5* Iconsigne
soit : **Poptique = 5 * (VZ-0,7)/(R2+RP1)**

En conclusion : VZ, R2 et RP1 règlent la puissance optique de consigne.

En général on fixe VZ par une diode zener, on calcule R2 pour donner une valeur limite de puissance optique possible (valeur maximale : RP1 = 0), et enfin RP1 sert à ajuster la puissance voulue, inférieure à la valeur maxi.

Exemple de calcul : avec VZ = 2.2V

La puissance maximale à ne pas dépasser est PMAX = 2 mW.
IPIN vaut alors : 400 uA = Iconsigne maxi = (VZ- 0,7)/R2
d'où R2 = 1,5/400E-6 = 3750 Ohms
=> valeur pratique : R2 = 3,9k

Soit une puissance optique de sortie souhaitée à 1,5 mW, il faut régler RP1 telle que :
*1,5m = 5*1,5/(3,9k +RP1) => RP1 = 1100 Ohms.*

Le résultat issu de la simulation est : RP1 = 1,125kohm, en accord avec la valeur théorique.

5. CONCLUSION

Cet exemple démontre l'intérêt de la simulation pour valider le fonctionnement de structures posant problème pour l'expérimentation (circuits de commandes non prévus pour les mesures de courant notamment) : il constitue également un sujet incitant à se poser nombre de problèmes liés à la simulation (modélisation , méthode de test, interprétation ...)

Le modèle de diode laser établi (diode laser + photodiode PIN) peut être facilement modifié pour correspondre à la diode utilisée en pratique : il suffira de changer la valeur du couple (E3,I3) dans la définition de la source GPD (sensibilité), et éventuellement les coefficients C0 et C1(comportement en température).

Si la caractéristique POptique = Fn (ILaser) se présente plus sous une forme d'exponentielle, on peut utiliser une définition de GPD du type VALUE plutôt que TABLE, par exemple :
GPD 3 4 value = {I0*exp(K1*(i(vsense)-C0*exp(C1*TEMP)))}

dans laquelle I0 et K1 sont des paramètres à déterminer en fonction du graphe fourni par le constructeur, et à définir par défaut lors de la déclaration du macromodèle :
.subckt laserexp 1 2 3 4 PARAMS: C0=10.88m C1=14.4m I0=??? K1=???

La présente étude peut être complétée par une analyse transitoire, nécessitant alors de réajuster les éléments du modèle qui influent sur le temps de réponse et donc la bande passante (capacité de la diode émettrice, capacité de la photodiode) : pour mener cette étude transitoire il faut envisager la source VZ comme une entrée de la modulation.

ANNEXES

Contenu des différents fichiers circuits permettant une simulation directe, sans utiliser la saisie de schéma :

A1) Caractéristique POptique = Fn (ILaser) à TEMP = 5, 25, 60 et 70 °C

```
* Définition du circuit
ILaser 0 1 DC 1m
XLaser 0 1 2 0 laserhi
R1 0 2 1m

* Définition du modèle de diode laser à écrire ici :
.subckt laserhi ....
.ends
* (ou à écrire dans une librairie et inclure par .lib ...)

*Directives d'analyse :
.DC ILaser 0 60m 1m
.STEP TEMP LIST 5 25 60 70
.probe
.end
```

A2) Caractéristique POptique = Fn (TEMP) pour ILaser = 36.44mA (POptique = 1,5mW à 25°C)

```
* Définition du circuit
ILaser 0 1 DC 34.44m
XLaser 0 1 2 0 laserhi
R1 0 2 1m

* Définition du modèle de diode laser à écrire ici :
.subckt laserhi ....
....
.ends

*Directives d'analyse : TEMP varie de 5 à 70°C par pas de 1°C
.DC TEMP 5 70  1
.probe
.end
```

A3) Etude du circuit de régulation

```
*Circuit de régulation

.lib eval.lib
.param RP1 1.1k

Vzener VZ 0 DC 2.2
Q1 B2 B1 VZ Q2N2907A
R1 B1 P1  3.9k
RP1 P1 0 {RP1}
Q2 C_LASER B2 0 Q2N3904
VCC VCC 0 DC 4.5
XLaser C_LASER VCC VCC B1 laserhi

*Modele de la diode laser laserhi
...

* Directives d'analyse :
.DC TEMP 5 70 1
*ou .DC PARAM RP1 1 10k 100
.probe
.end
```

A4) Bibliographie

Traitant partiellement des diodes lasers :

- Les Fibres optiques - Introduction aux télécommunications par FO
JP NEROU Editions Le Griffon d'Argile (87)
- Les télécommunications par fibres optiques
Irène et Michel JOINDOT et co-auteurs DUNOD
- Technologie des télécoms
Pierre LECOY HERMES

Sur le langage Spice :

- Logiciel de simulation analogique PSpice 5.3
Alain RIVAT DUNOD TECH