

Simulation d'une modulation d'amplitude avec le logiciel PSPICE

par Bruno VELAY
Département Mesures Physiques
IUT - 44600 Saint-Nazaire

PSPICE est un logiciel de simulation électronique. La version utilisée ici est une version d'évaluation libre de droit et disponible auprès d'ALS DESIGN (cf. Annexe 1).

RÉSUMÉ

J'ai choisi d'illustrer deux possibilités du logiciel. Tout d'abord, je vais utiliser le logiciel dans son rôle usuel en simulant un schéma de modulateur à diode (avec ou sans seuil). Le schéma est celui de l'article de J. TABUTEAU. On observera que le principe qui le régit n'est pas si simple. Bien entendu, une démarche réellement expérimentale consisterait à produire physiquement les signaux, les acquérir et les analyser (un oscilloscope numérique couplé à un logiciel tel SandLab conviendrait par exemple).

Ensuite en simulant des signaux élémentaires, on peut utiliser les possibilités de calcul du module d'analyse graphique pour tracer des signaux composites tel que $(1 + I \cos \omega_m t) * \cos \omega_p t$. De même, on pourrait traiter la modulation de fréquence.

Les annexes indiquent comment réaliser ce travail avec le logiciel PSPICE.

1. MODULATION D'AMPLITUDE AVEC UNE DIODE À SEUIL

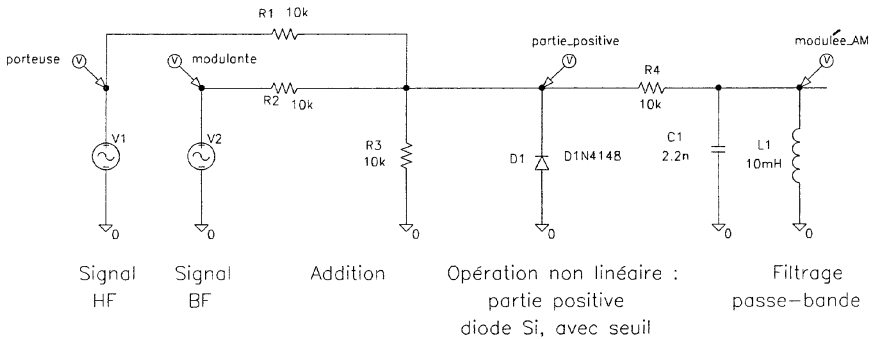


Figure 1

1.1. Le montage comprend quatre étages

a - Les sources de signaux : la porteuse est à $f_p = 33,8 \text{ kHz}$ et 5 V d'amplitude, la modulante est à $f_m = 3 \text{ kHz}$ ($\approx f_p/10$) et 2 V d'amplitude.

b - L'opération d'addition $M \cos \omega_m t + P \cos \omega_p t$ est bien linéaire comme le montre le spectre de V_{somme} , figure 3a : on n'y retrouve que f_m et f_p . Malgré le pont diviseur, il semble que l'analyse spectrale par FFT donne ici des amplitudes un peu faibles.

c - L'opération liée à la diode est non linéaire : elle crée des harmoniques. Tout repose sur la modification du point de repos de la diode sur sa caractéristique courbe. Le spectre figure 3b de $V_{\text{partie positive}}$ contient des groupes de raies centrées sur $2f_p$, $3f_p$ etc. Le seuil de la diode silicium à $0,7 \text{ V}$ est bien visible sur la figure 2b : l'opération «partie positive» n'est pas parfaitement réalisée.

d - Le filtrage des harmoniques surnuméraires par rapport à $f_p - f_m$, f_p et $f_p + f_m$, caractéristiques d'une modulation d'amplitude, est assuré par le filtre passe-bande. Après calcul du filtre (voir figures 4a, 4b), j'ai ajusté la fréquence de la porteuse f_p sur la fréquence centrale f_0 . J'ai choisi une bande passante assez large pour les trois raies utiles (le filtre diminue cependant un peu l'amplitude des deux raies latérales).

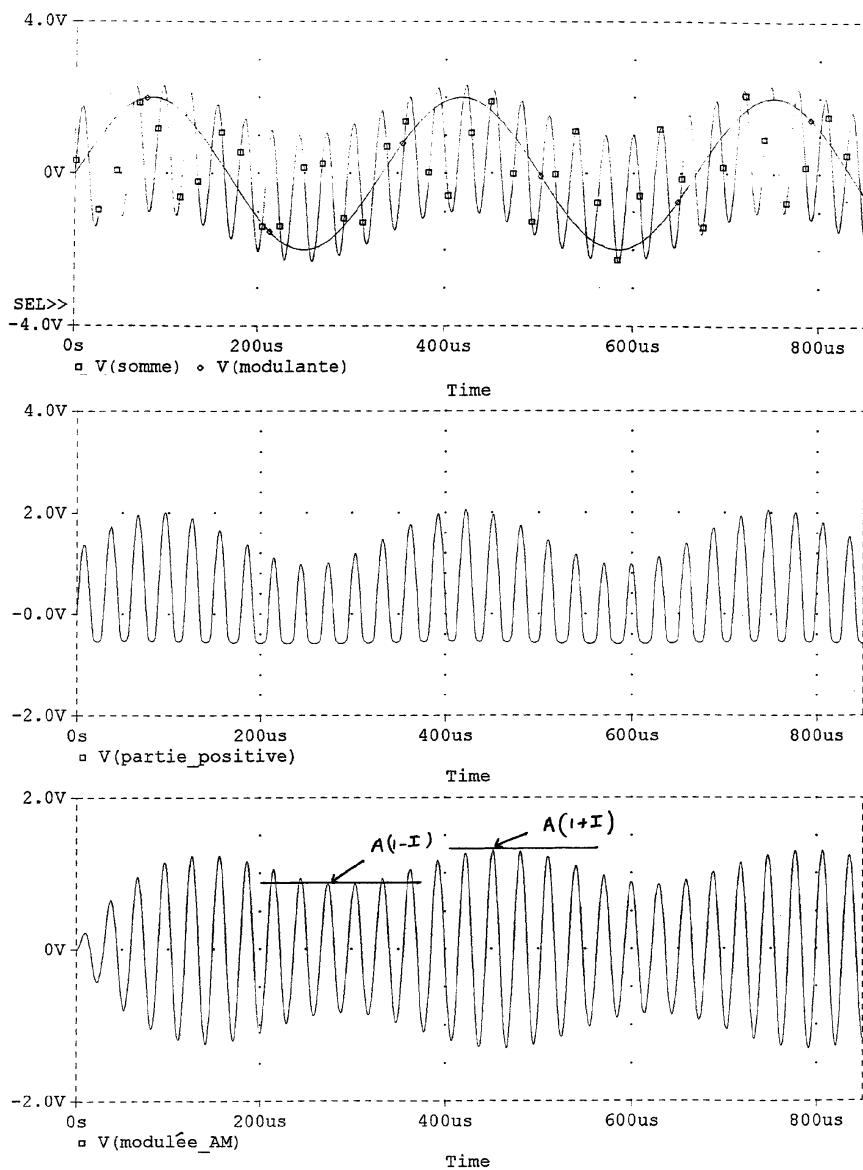


Figure 2

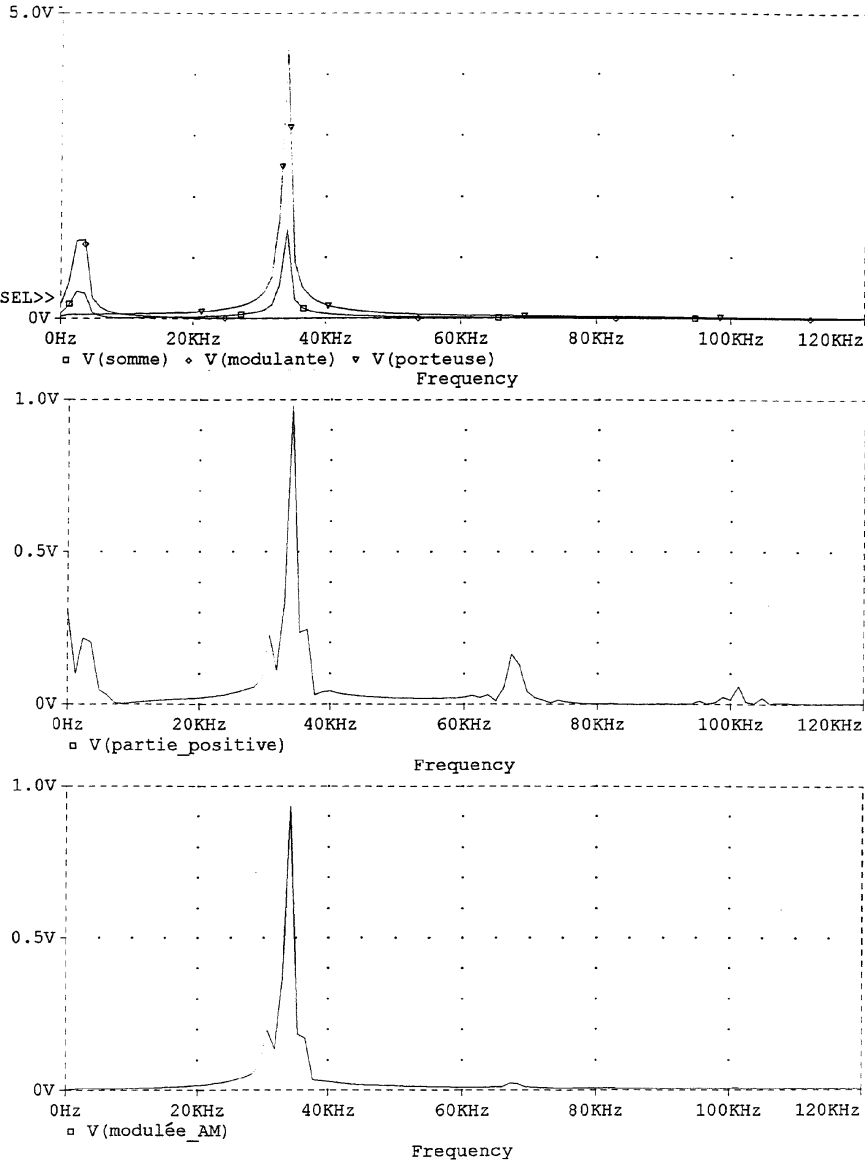


Figure 3

La courbe de réponse du filtre est obtenue par un balayage en fréquence AC sweep.

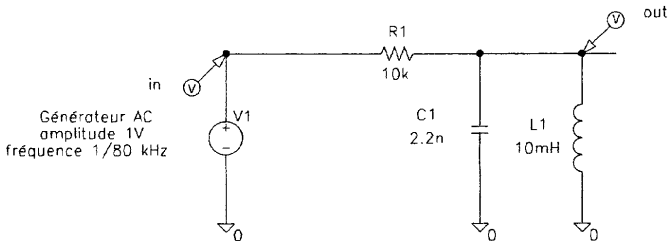


Figure 4a : VSRC AC = 1

- Analysis / Setup / AC sweep /
 - linear,
 - 10 000 points,
 - start freq : 1000,
 - end freq : 80 000.
- Simulate.

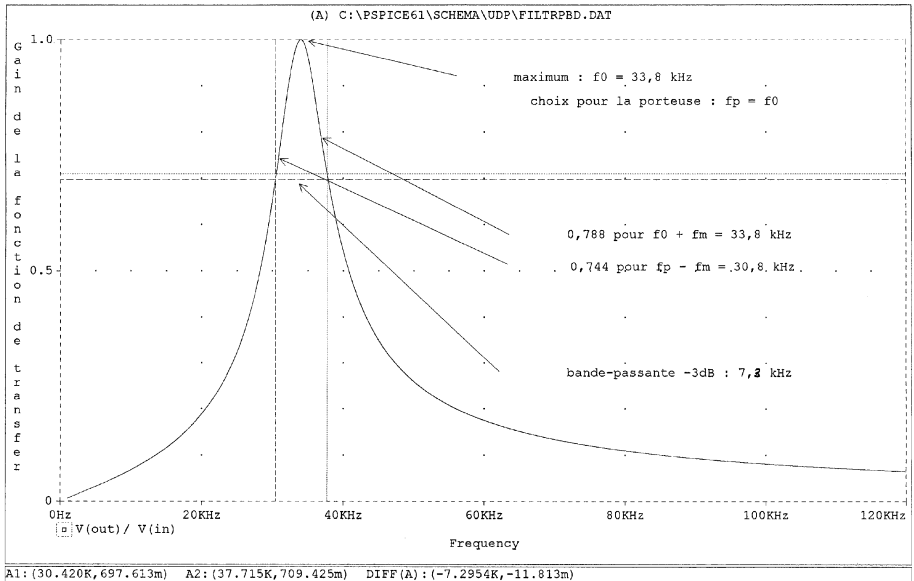


Figure 4b

1.2. Résultats

a - Pour le signal modulé figure 2c, on trouve un taux de modulation de $I = 0,123$.

$$\text{En effet on a : } \frac{U_{\max}}{U_{\min}} = \frac{A}{A} \frac{(1+I)}{1-I} = \eta = 1,28$$

$$I = \frac{\eta - 1}{\eta + 1} = 0,123.$$

b - L'écart relatif théorique entre les amplitudes des harmoniques f_p et $f_p + f_m$, $f_p - f_m$ est $\frac{m}{2} = 0,061$.

c - Les curseurs de mesures permettent d'obtenir :

$$f_p = 34,1 \text{ kHz} \quad A_p : 0,927 \text{ V}$$

$$f_p + f_m = 36,4 \text{ kHz} \quad A_p + m : 0,172 \text{ V} \quad \text{rapport } \frac{0,172}{0,927} = 0,185$$

$$f_p - f_m = 30,4 \text{ kHz} \quad A_p - m : 0,193 \text{ V} \quad \text{rapport } \frac{0,193}{0,927} = 0,208$$

le schéma et sa simulation donnent donc des harmoniques latérales bien placées mais trois fois trop intenses.

1.3. Conclusion

Les signaux obtenus ont une allure correcte. Les spectres sont valables qualitativement mais les amplitudes sont trop grandes. Cela est partiellement du à l'effet de seuil de la diode Silicium 1n 4148.

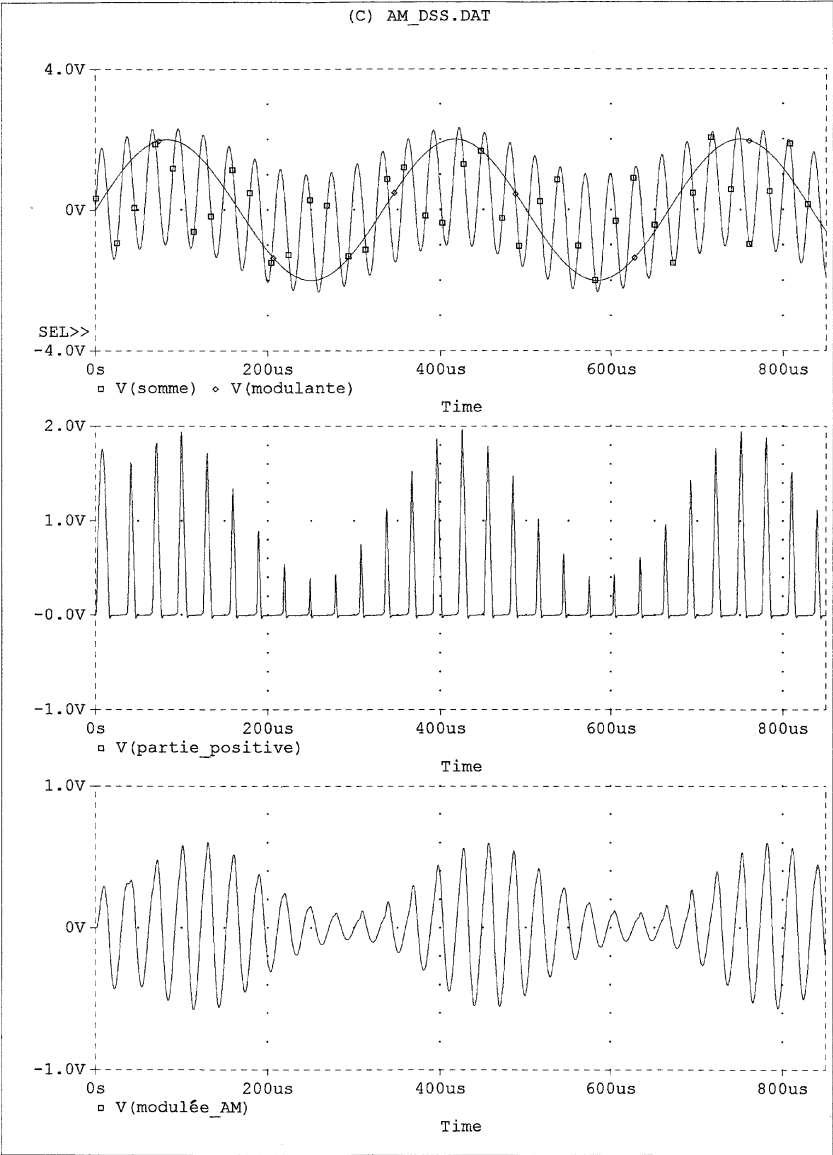


Figure 6

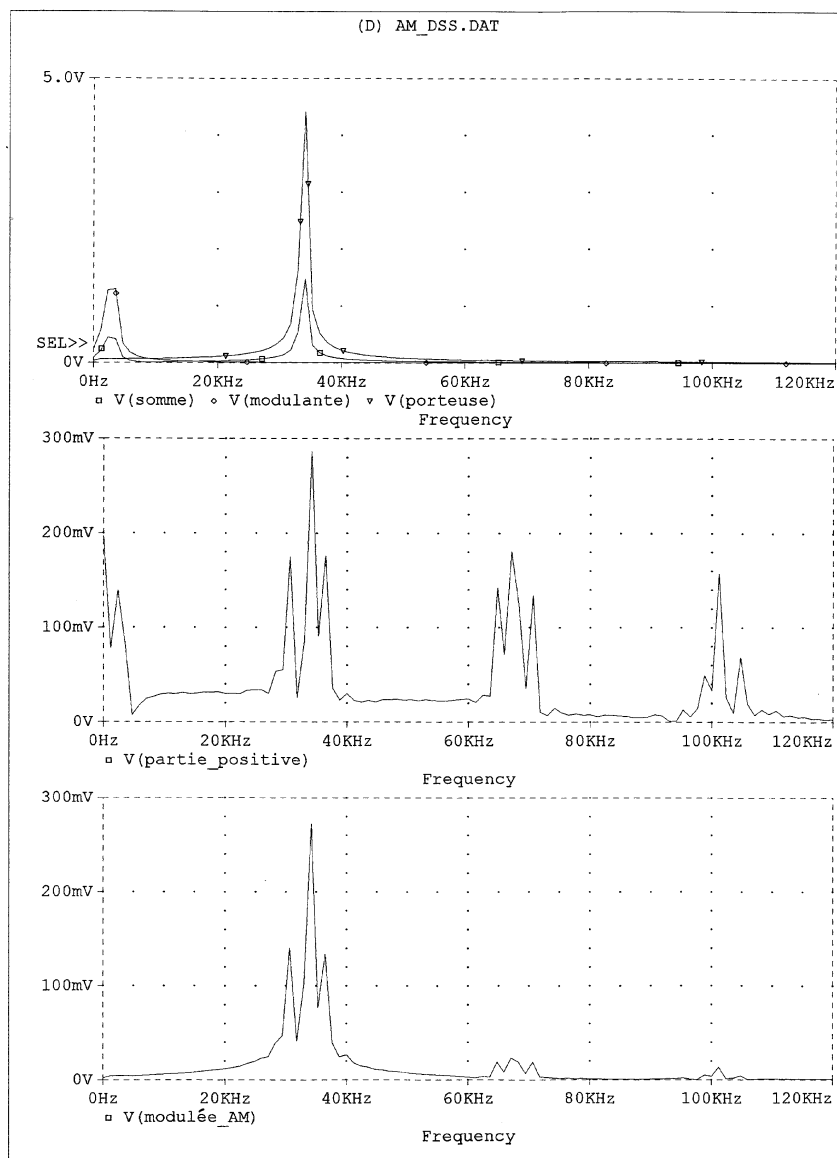


Figure 7

R_6 assure le rôle de la charge pour la diode sans seuil. Le suiveur U_2 traduit l'effet de la diode en variation de potentiel.

Remarque : V_{CC} et $-V_{CC}$ sont les «labels» de deux variables **globales** simplifiant le schéma (**Global** dans PORT.SLB cf. Annexe 1).

2.2. Résultats

a - On constate sur la figure 6b que l'opération «partie positive» est maintenant correctement réalisée.

b - On constate sur la figure 6c que la modulation est plus prononcée :

$$\frac{U_{\max}}{U_{\min}} = \eta = 4,17 \quad \text{d'où} \quad I = \frac{\eta - 1}{\eta + 1} = 0,61.$$

c - L'écart relatif théorique entre les amplitudes du spectre de $V_{\text{modulée}} - \text{AM}$ est $\frac{A_{p+f}}{A_p} = \frac{m}{2} = 0,305$.

d - Les curseurs utilisés sur le spectre figure 7c indiquent :

$$f_p = 34,0 \text{ kHz} \quad A_p : 270 \text{ mV}$$

$$f_p + f_m = 36,8 \text{ kHz} \quad A_p + m : 130 \text{ mV} \quad \text{rapport } \frac{130}{270} = 0,48$$

$$f_p - f_m = 30,8 \text{ kHz} \quad A_p - m : 135 \text{ V} \quad \text{rapport } \frac{135}{270} = 0,50$$

La vérification numérique est améliorée puisque les rapports ne diffèrent plus que de 66 % (au lieu de 300 % en A).

e - On note sur la figure 7b le très fort effet non linéaire en observant les raies centrées sur $2f_p$, $3f_p$ etc.

Cela sous-entend que le calcul basé sur un développement au deuxième ordre ne suffit pas. En analysant le spectre d'harmoniques créé par la diode (Annexe 2) j'ai calculé les coefficients numériques A B et C du modèle exposé par J. TABUTEAU. Le calcul du taux de modulation qui en découle rend un résultat huit fois trop grand. En développant au quatrième ordre ou plus, le calcul devient franchement trop lourd. PSPICE le fait en quelque sorte pour vous.

f - On peut enfin noter sur la figure 7c que le filtre passe-bande, bien que calé au plus juste ($f_p + f_m$ et $f_p - f_m$ sont à peine dans la bande passante), coupe imparfaitement les harmoniques vers $2f_p$, $3f_p$. Cela explique partiellement les écarts numériques du quatrième). Il faudrait employer un filtre à flancs plus raides.

2.3. Conclusion

L'effet lié au seuil de la diode semble important. Expérimentalement on choisira de préférence une diode signal au Germanium pour moduler ou démoduler (figures 6 et 7).

3. CALCUL DIRECT DE MODULATION

A l'aide de ce schéma simplissime, on crée des signaux d'amplitude 1 V et de fréquence 1 kHz, 10 kHz.

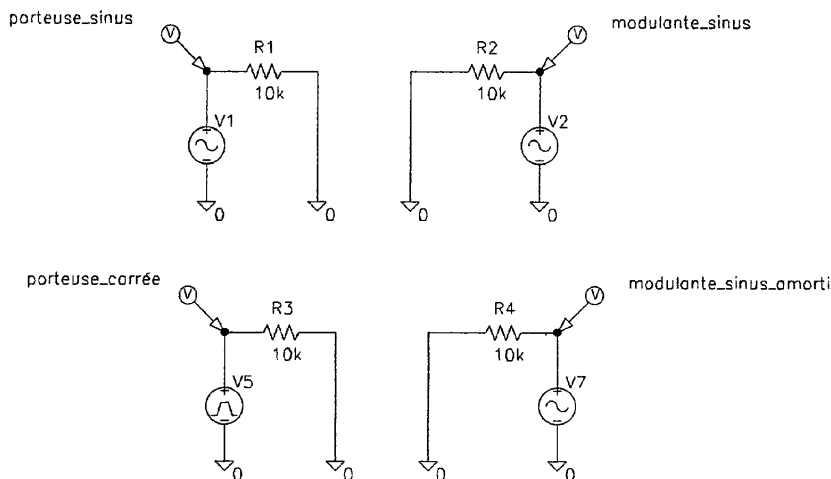


Figure 8

En lançant l'analyse graphique PROBE, on choisit les signaux à tracer : **Trace \ Add**.

On répond à la question **Trace Command** par des expressions mathématiques à base de signaux simples : les figures 9 et 10 donnent un échantillon de modulations d'amplitude pour $I = 0,1$; $0,5$; 1 et 2 . (On notera la surmodulation).

Évidemment les spectres sont parfaits !

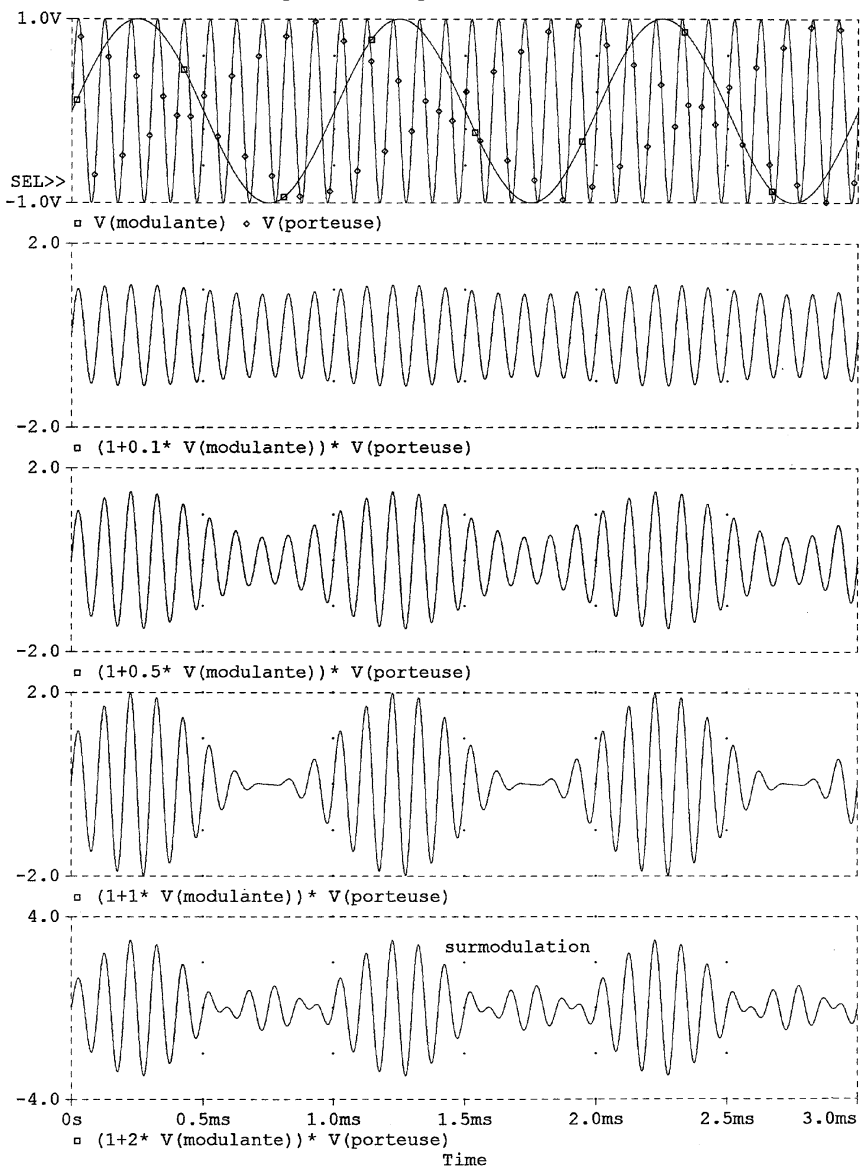


Figure 9

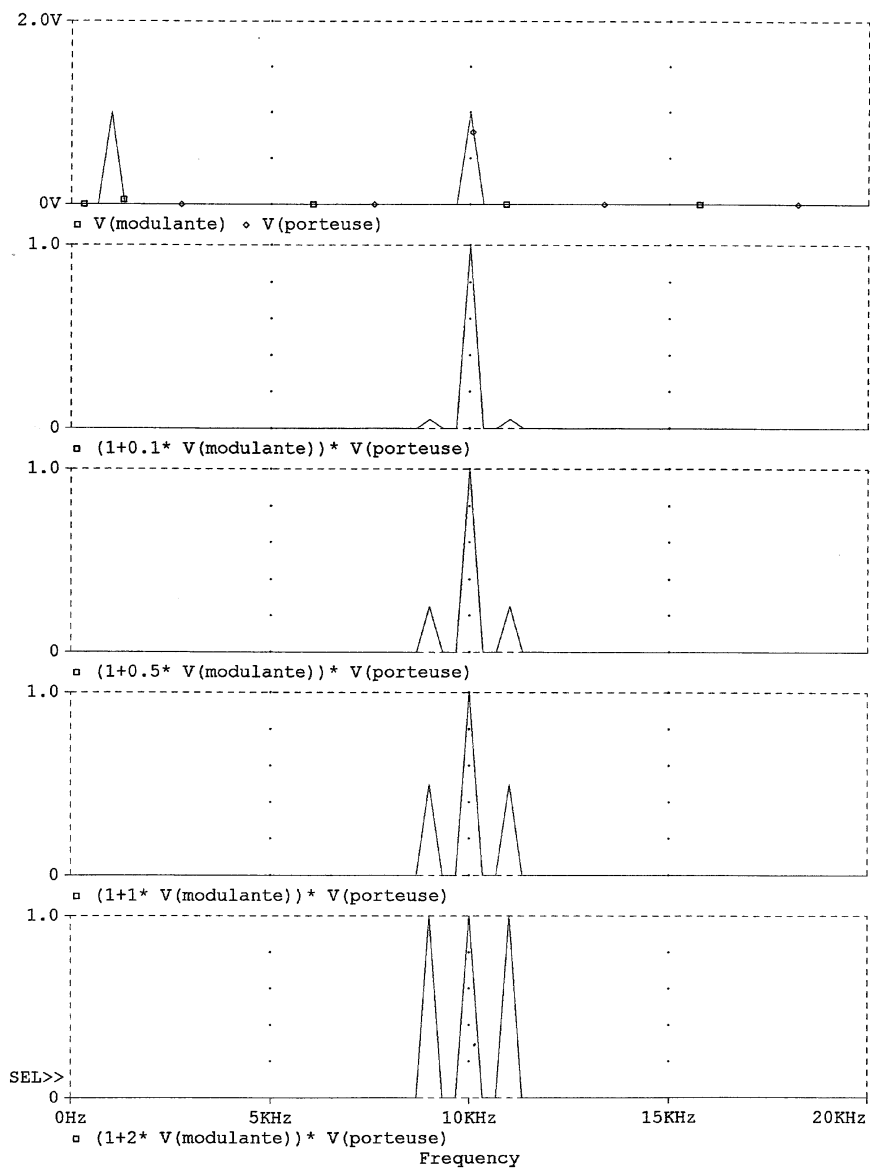


Figure 10

Il n'est pas difficile de moduler ensuite ce que l'on veut, même si c'est fantaisiste ou peu physique : en figure 11, on observe des porteuses sinus ou carré, mais aussi une modulante amortie !

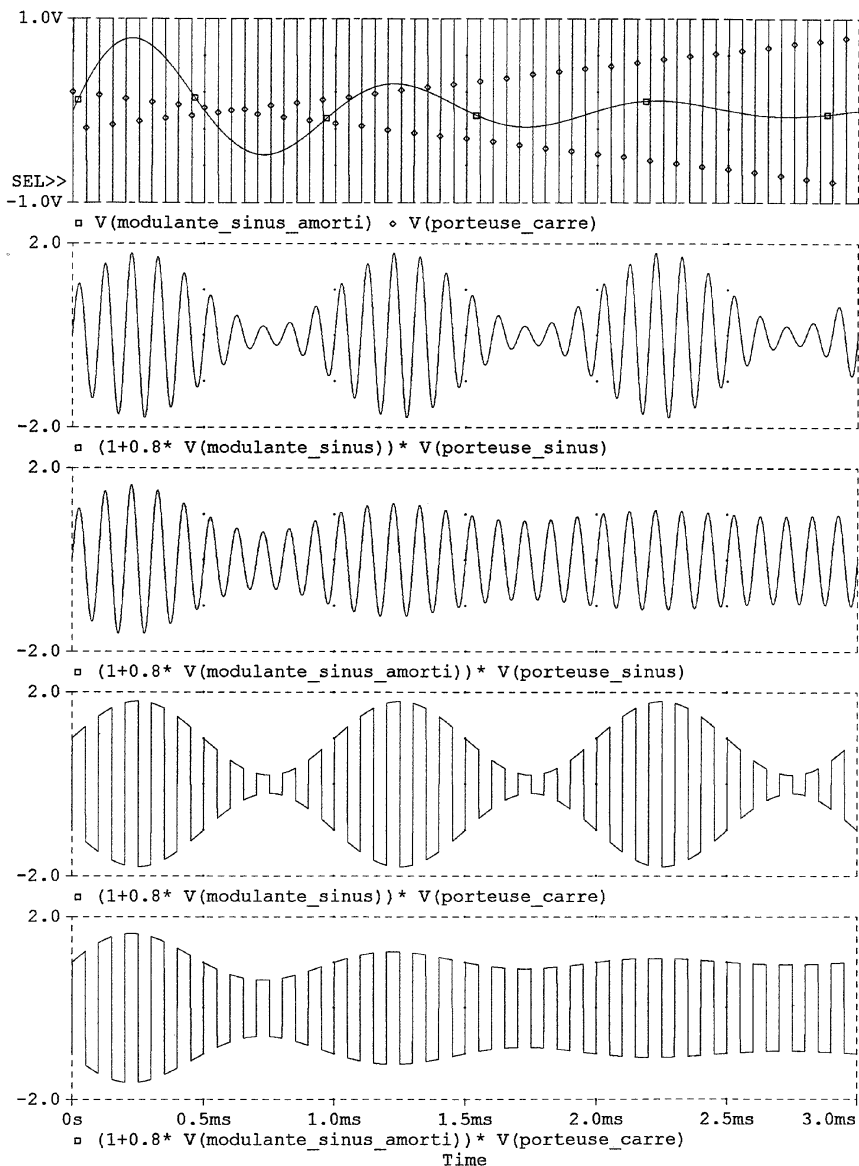


Figure 11

On peut choisir des sources de formes diverses. Le choix est infini avec PWL qui permet de définir par morceaux n'importe quelle forme.

Avec SFFM, on peut aussi moduler en fréquence. Je vous laisse le plaisir de moduler en amplitude un signal déjà modulé en fréquence.

Annexe 1

Pour se servir de PSPICE

1. VERSION EMPLOYÉE

Il s'agit de la version d'évaluation gratuite et libre de recopie distribuée par ALS Design : PSPICE 6.1 windows (les indications données ici sont valables pour les versions antérieures sous windows).

La version offre la majeure partie des possibilités mais limite les schémas à environ trois A.O., vingt transistors, cinquante composants. Il y a de quoi faire cependant !

La version sous windows est très souple d'emploi par son éditeur de schéma, l'usage de la souris, les réglages simples, l'impression.

Pour tout renseignement :

ALS Desing - 38, rue Fessart - 92100 BOULOGNE - Tél. : (1) 46.04.30.47.

2. RÉALISATION DES SCHÉMAS . SCH

L'éditeur de schéma intégré SCHEMATICS permet d'obtenir rapidement le schéma désiré, principalement à la souris. Expérimenter l'effet des click droit et gauche.

a - File \ New

**b - Save as ** par précaution.

c - Draw \ Get new part... choix des composants

Browse permet le choix de la librairie utile . SLB,

– R, L, C sont dans ANALOG.SLB,

– la diode 1N 4148 et l'A.O. 741 sont dans EVAL.SLB,

– la masse analogique AGND est dans PORT.SLB. En employant GLOBAL (avec un label) on peut définir des points équipotentiels. Exemple : + VCC,

– les sources de tensions VSIN et VSCR sont dans SOURCE.SLB.

d - Positionner les composants à la souris (clicker / tirer) les relier par des fils : **Draw \ Wire**. Le tracé s'appuie sur le maillage de point (Grid) que l'on fait apparaître ou disparaître par **Option \ display option \ Grid on / off**.

e - Déclarer les paramètres des sources. VSIN est à fréquence fixe, VSRC voit sa fréquence changer lors d'un balayage AC sweep déclaré dans le menu **Analysis \ Setup**.

Exemple : V1 = VSIN VOFF = 0 (offset : décalage) VAMP = 5 (amplitude 5 V) FREQ = 33.8 k.

f - Choisir les paramètres des composants en cliquant dessus.

Attention : Les notations suivantes doivent être impérativement respectées :

m : milli mais MEG : méga,

k : kilo, u : micro ; n : nano.

g - Marker \ Mark Voltage Label + le nom choisi, permet de définir des points facilement identifiables à l'analyse.

L'option **Spécial** est riche de possibilités.

3. PARAMÉTRAGE DE L'ANALYSE

ANALYSIS \ SETUP

a - Le mode **Transient** permet de représenter $u(t)$ ainsi que son spectre (choix dans le module Probe) choix typique pour les graphes présentés :

Print step = 1 us (1000 ns) Final time : 0,85 ms,

no print delay = Step Ceiling : 1 us

L'option **Fourier analysis** donne dans le troisième fichier . OUT, un tableau des coefficients d'harmoniques ainsi que le taux de distorsion. Il est consultable par le menu **Analysis \ Output** (voir Annexe 2).

b - Le mode **AC Sweep** correspond à une analyse en fréquence de type Bode. La réponse du filtre passe-bande a été obtenue avec :

Type : linear Total points : 10 000 Start freq : 10 End freq : 120 k.

4. LA SIMULATION

Une fois, l'analyse paramétrée (on peut cocher plusieurs modes, mais c'est plus long en calcul) on lance la simulation **Analysis \ Simulante** (F11). Cela déclenche :

- la fabrication d'une «net-list» . CIR,
- la création d'un fichier de données . DAT,
- le lancement du module d'analyse graphique PROBE qui exploite ces fichiers . DAT.

Le choix des variables graphées se fait par **Probe Setup** ou dans Probe directement.

Si la simulation a été faite avant, **Analysis \ Run probe** lance directement le graphisme.

Les erreurs éventuelles de schéma ou de paramétrage sont listées, le cas échéant, dans . OUT, disponible par \ **Output**.

Attention : Un nombre points trop grand, un pas d'incrémentations trop petit, et le temps de calcul devient très long, trop long ! Suivre la progression indiquée dans la fenêtre PSpice

Cancel = arrêter, est utile parfois...

5. L'ANALYSE GRAPHIQUE : PROBE

a - Trace \ Add permet de choisir le signal à tracer. On peut choisir dans la liste proposée, y compris les grandeurs marquées. Un marquage **Special** permet de tracer directement des phases, des amplitudes en dB etc.

La ligne «Trace Command» permet d'indiquer son choix.

On peut aussi choisir une expression construite à partir des grandeurs affichées et d'opérateurs.

Outre les quatre opérations $+$ $-$ $/$ $*$, on peut employer :

- ABS (x) valeur absolue,
- SQRT (x) racine carrée de x,
- PWR (x, y) $|x|^y$ puissance y,
- EXP (x), LOG (x), LOG10 (x),
- M (x) amplitude, DB (x) amplitude en dB,
- P (x) phase en degré,
- R (x), IMG (x) partie réelle et imaginaire,
- G (x) délai de groupe (en s),
- SIN (x), COS (x), TAN (x), ATAN (x),
- d(x), s(x), dérivée, intégrale de x,
- AVG (x), RMS (x) valeur moyenne et valeur efficace,
- MIN(x), MAX(x) minimum et maximum de la partie réelle.

Cette commande est extrêmement puissante !

Elle permet aussi d'utiliser Spice comme grapheur. Voir la partie 3 de l'article.

b - PLOT

Les choix proposés permettent de :

- paramétrer l'axe X et Y, de créer de 1 à 3 axe Y,
- choisir les bornes d'intervalle, le type d'échelle, le titre, les variables représentées, une analyse spectrale (cocher Fourier en **X setting**),
- obtenir plusieurs graphes sur la même page, en choisir les variables distinctement (**Add, delete, Unsync**),
- choisir le mode d'analyse AC / DC / Transient si la simulation a été faite.

c - View concerne la mise en page.

d - Tool permet d'obtenir des curseurs de mesures (**Cursors**) et d'annoter le graphe (**Label**).

e - Windows permet d'obtenir plusieurs pages graphiques distinctes pour la même simulation. C'est très pratique pour imprimer.

f - L'impression :

- **File \ Page setup** : configure la page (taille, position, grandeur indiquée),
- **File \ Print** : le délai d'impression augmente avec la taille du fichier et le nombre de points calculés !

Pour plus d'information, consulter : «*La simulation électronique avec SPICE*» par S. GAZAIX, dans ce numéro p. 373.

Annexe 2

Analyse de Fourier

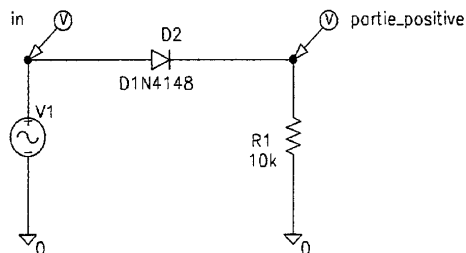


Figure 12 : Opération non linéaire : partie positive

A l'aide de ce schéma très simple, j'ai simulé le redressement mono alternance à diode.

L'analyse temporelle se fait par Transient.

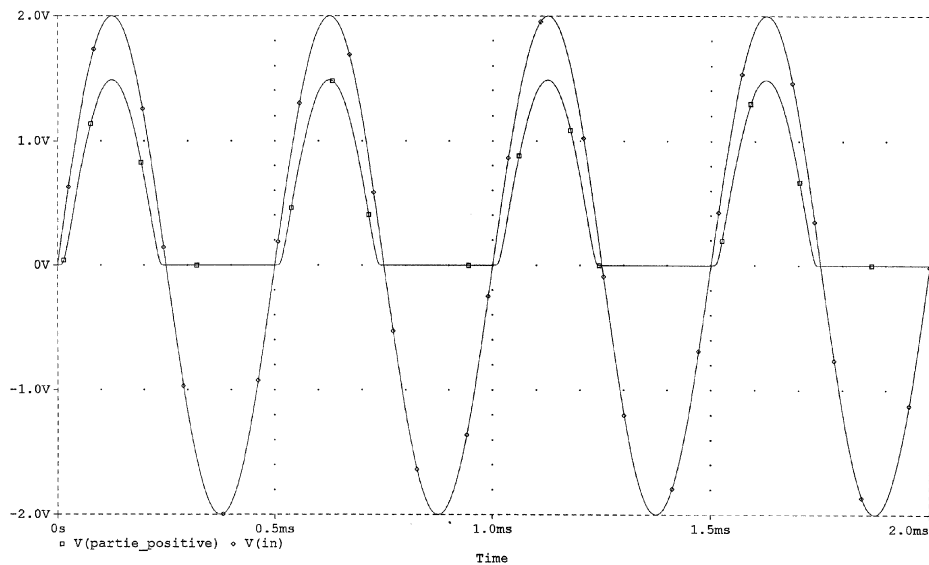


Figure 13

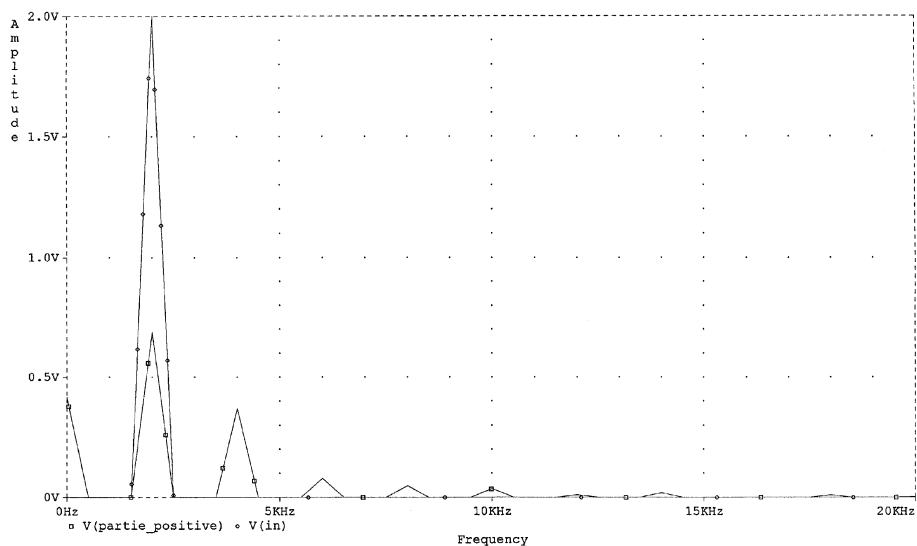


Figure 14 : Analyse spectrale par FFT.

L'option Fourier Analysis est cochée :

- Center frequency : 2 k,
- Number of harmonics : 10,
- Output vars : V(d2 : 2).

En éditant le fichier . OUT (**Analysis \ examine Output**), on obtient le tableau suivant :

<i>DC Component = 4.140004E-01</i>					
Harmonic n°	Frequency (Hz)	Fourier component	Normalized component	Phase (DEG)	Normalized PHASE
1	2.000E+03	6.883E-01	1.000E+00	4.311E-02	0.000E+00
2	4.000E+03	3.691E-01	5.363E-01	– 9.004E+01	– 9.008E+01
3	6.000E+03	7.838E-02	1.139E-01	1.799E+02	1.798E+02
4	8.000E+03	4.915E-02	7.141E-02	– 9.010E+01	– 9.014E+01
5	1.000E+04	3.609E-02	5.244E-02	1.798E+02	1.798E+02
6	1.200E+04	1.001E-02	1.454E-02	– 9.014E+01	– 9.018E+01
7	1.400E+04	1.911E-02	2.776E-02	1.797E+02	1.797E+02
8	1.600E+04	1.151E-05	1.672E-05	4.999E+01	4.994E+01
9	1.800E+04	1.044E-02	1.517E-02	1.796E+02	1.796E+02
10	2.000E+04	2.827E-03	4.107E-03	8.950E+01	8.946E+01
Total harmonic distortion : 5.564805E+01 percent					

Il est bien sûr compatible avec le spectre. Le taux de distorsion harmonique de 56 % est bien la marque d'une opération fortement non linéaire.

Remarque : Le taux de distorsion harmonique TDH est le rapport de la valeur efficace des harmoniques de rang ≥ 2 par la valeur efficace du fondamental.

Annexe 3

Couleurs et presse-papier

Il est possible de changer les couleurs par défaut de l'affichage de PROBE. Après l'avoir sauvegardé, ouvrir C:\windows\MSIN.INI et modifier comme proposé avec un éditeur de texte.

Relancer windows pour prendre en compte les modifications.

L'exportation d'un graphique par le presse-papier (clip-board) vers un traitement de texte devient utile (fond blanc, traces noires).

```
;choix de couleurs modifié
[PROBE DISPLAY COLORS]
NUMTRACECOLORS=12
BACKGROUND=brightwhite
FOREGROUND=black
TRACE_1=brightred
TRACE_2=brightblue
TRACE_3=brightmagenta
TRACE_4=brightcyan
TRACE_5=purple
TRACE_6=mustard
TRACE_7=brightgreen
TRACE_8=PINK
TRACE_9=LIGHTGREEN
TRACE_10=DARKPINK
TRACE_11=LIGHTBLUE
TRACE_12=brightyellow

choix de couleurs initial
;[PROBE DISPLAY COLORS]
;NUMTRACECOLORS=6
;BACKGROUND=BLACK
;FOREGROUND=WHITE
;TRACE_1=BRIGHTGREEN
;TRACE_2=BRIGHTRED
;TRACE_3=BRIGHTBLUE
;TRACE_4=BRIGHTYELLOW
;TRACE_5=BRIGHTMAGENTA
;TRACE_6=BRIGHTCYAN
;TRACE_7=MUSTARD
;TRACE_8=PINK
;TRACE_9=LIGHTGREEN
;TRACE_10=DARKPINK
;TRACE_11=LIGHTBLUE
;TRACE_12=PURPLE
; This is set up for a VGA. If you are using a display that can show
; more than 16 colors simultaneously, change NUMTRACECOLORS to 12.
; You will probably have to experiment with the trace colors to determine
; which ones look good on your display.
```