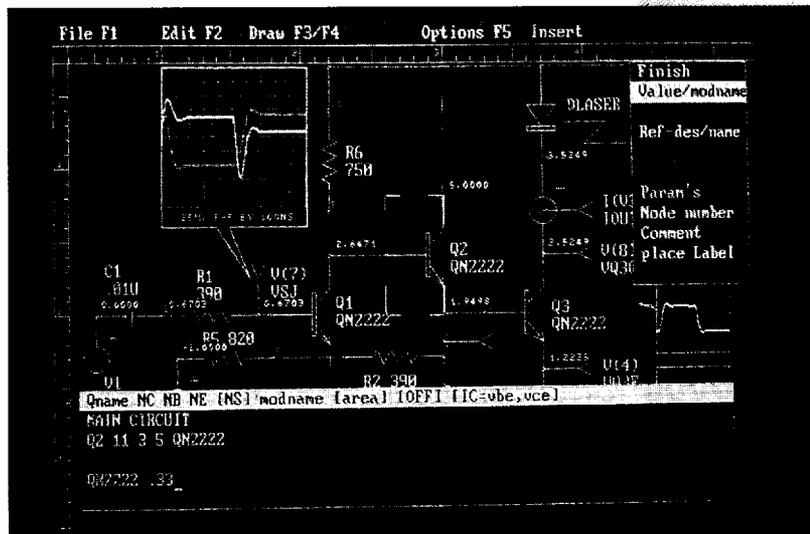


# MODÉLISATION ET SIMULATION DES CIRCUITS A TUBES AVEC ISSPICE3

Tous les concepteurs de circuits audio ou de circuits haute tension qui nécessitent l'emploi de tubes électroniques ont pu déplorer jusqu'à présent l'absence de modèles sérieux de tubes dans les simulateurs de circuits électroniques.



Pour satisfaire ses propres besoins lors du développement et des évolutions de ses amplificateurs haute tension et aussi pour aider les utilisateurs de simulation électronique, EXCEM a créé des modèles compatibles avec le simulateur d'Intusoft basé sur la version SPICE 3E.2 de l'université de Berkeley, l'un des standards du marché (voir encadré 1). Dans cet article, nous ne chercherons pas à justifier en détail nos modèles, mais plutôt les présenter.

Les détenteurs du logiciel ICAP/4 d'Intusoft, pourront reprendre ou s'inspirer de nos modèles. Ils pourront surtout s'inspirer de notre approche pour créer des modèles correspondant à leurs besoins. Il suffit pour cela d'avoir un simple éditeur de texte (ou le PreSpice d'Intusoft) et de respecter les règles de syntaxe du noyau de calcul SPICE 3E.2. Ils pourront éventuellement modifier les paramètres de leurs composants et par exemple négliger certains effets selon le domaine d'utilisation de leur circuit. Pour ceux qui préfèrent les bibliothèques toutes faites, celle dont nous parlons ici sera bientôt complétée (et les nouveaux modèles testés), et pourra être commercialisée. Les modèles décrits ici représentent la

triode 12AU7 et une pentode. Ces composants ont été utilisés dans des montages simples d'amplificateurs, les courbes résultant de la simulation rendant très bien compte du comportement de ces tubes.

## Utilisation de la triode dans un montage amplificateur

Jusqu'à présent les rares modèles de triode existants exploitaient seulement une loi fondamentale pour rendre compte de la variation du courant d'anode  $I_A$  en fonction des tensions

d'anode  $V_A$  et de grille  $V_G$  : où  $K$  est la pervéance et  $\mu$  le coefficient d'amplification.

$$I_A = K \left( V_G + \frac{V_A}{\mu} \right)^{1,5}$$

Cette loi implique que le courant d'anode croît indéfiniment avec la tension d'anode. Or les utilisateurs de triode savent bien qu'une telle loi n'est pas réaliste. A forts courants (impulsionnels !), ou lorsque le tube est « pompé », il se produit une saturation de sorte que la valeur du courant atteint une valeur plafond caractéristique de la triode et indépendante de la tension d'anode.

La figure 1 donne un extrait de notre bibliothèque Extubes.Lib contenant le modèle de tubes. Un des sous-circuits décrivant la triode 12AU7 apparaît en haut de la figure. Il comporte lui-même un sous-circuit X1 et un sous-circuit X2. Le sous-circuit X1 dont le nom est TRIO1 est présenté en bas de la figure et comporte un ensemble d'équations utilisant la syntaxe des B-éléments de la version IsSpice3 de Berkeley, enrichie par la syntaxe IF-The-nelse, propre au IsSpice3 d'Intusoft (voir encadré 2). Le circuit TRIO1 décrit les phénomènes électroniques dans la triode. Le sous-circuit 12AU7 comporte également un sous-circuit X2 dont le nom est Heat1 qui correspond aux phénomènes thermiques au niveau du filament et de la cathode de triode. Ce sous-circuit n'apparaît pas dans la figure 1. A titre d'exemple, on peut détailler un peu la constitution du sous-circuit Trio1. Ce sous-circuit Trio1 est connecté aux nœuds anode, grille et cathode de la triode 12AU7, un quatrième nœud (le nœud 10) recevant le courant de saturation créé par le sous-circuit Heat1, le courant de saturation de la triode étant déterminé par la température de la cathode.

D'autre part il était intéressant de modéliser les différences de concavité des courbes  $I_A$  en fonction de  $V_A$  pour différentes valeurs de la tension de grille qui ne sont pas rendues par (1). Dans ce but, le modèle créé fait intervenir des corrections pour les coefficients K et  $\mu$  lorsque  $V_G$  est très négative. Ces corrections apparaissent dans le circuit Trio1, où l'on trouve les B-éléments B1 et B2 qui décrivent la variation de la pervéance K et du facteur d'amplification  $\mu$ . Les nouvelles pervéances et coefficients d'amplification apparaissent donc aux nœuds 15 et 16. Ces données sont ensuite utilisées dans les B-éléments B4 et B6 qui décrivent la loi (1). Le B-élément B7 prend en compte la loi de saturation que l'on observe lorsque le courant de cathode est très intense, comme évoqué plus haut. Les B-éléments B8, B9, et B10 décrivent une loi d'évolution du courant de grille lorsque la grille est positive par rapport à la cathode. Ce courant de grille dépend à la fois de la tension grille-cathode et de la tension anode-cathode. Les B-éléments B15 et B16 utilisent les résultats précédents, pour déterminer les courants dans le tube.

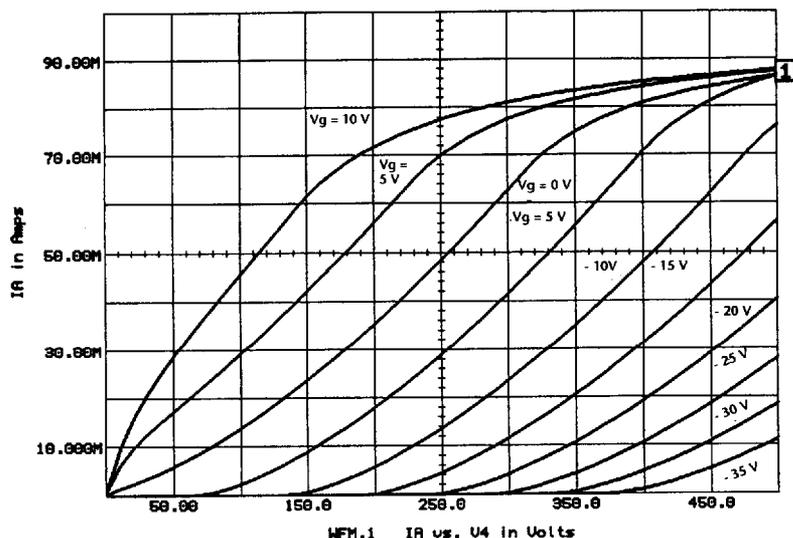
La figure 2 montre le réseau de courbes que l'on obtient pour la triode 12AU7 correspondant à la figure 1. On notera le comportement correct pour les tensions de grille négatives, comme pour les tensions de grille positives. La valeur du courant de saturation (environ 100 mA) pour les courants de tension et de chauffage nominaux a été fixée arbitrairement, cette valeur dépendant en réalité de la fabrication et du vieillissement du tube. Le courant de saturation  $I_{sat}$  dépend de la tension et du courant de chauffage. Le modèle correspondant est basé sur des considérations thermiques et sur la loi de Richardson-Duschman. On notera qu'il est néanmoins possible (et facile) de supprimer cet effet, qui consomme malgré tout du temps de calcul, en

```

*****
.SUBCKT 12AU7_1 1 2 3 4 5
* Anode Grid Cathode F F'
* COPYRIGHT EXCEM, 1993
*
* This is a model for 12AU7, without parameter fitting, with heater model.
*
X1 1 2 3 10 TRIO1 (SFG=0.7 VBIG=-0.9 VBIA=-1.3 MU=17 RNU=0.5 VMU=-20
+ SFMU=1.6 K=827E-6 RK=0.08 VK=-20 SFK=1.6 SIGMAG=0.05 ALPHAG=5.2 SFG=3.5)
*
X2 4 5 10 HEAT1 (CINM=0.15 VNOM=6.3 LAMBDA=1 RCOOL=3 TCYE=10 TNOM=1150
+ INITY=100 W=2.045 ISAT=0.099)
*
C2 1 2 1.5P
C3 3 1 0.5P
C4 2 3 1.6P
C5 3 4 4P
C6 3 5 4P
*
.ENDS
*****
.SUBCKT TRIO1 A G C ISAT
*
* COPYRIGHT EXCEM, 1993
*
* forward and reverse condition are treated in this triode model
* as well as saturation.
* the model describes only the static behaviour of the triode, and
* neglects secondary emission (that would occur at high VG and low VA).
*
* THE TRIODE'S 14 PARAMETERS ARE:
*
* SFG shape factor of the saturation law.
* VBIG contact potential of the grid
* (the voltage above which current grid may start to flow).
* VBIA contact potential of the anode.
* MU amplification factor at slightly negative grid voltage.
* RNU reduction factor for MU at very negative grid voltage.
* VMU grid voltage for mid-range MU (negative).
* SFMU shape factor for MU reduction law.
* K pervéance at slightly negative grid voltage.
* RK pervéance reduction factor at very negative grid voltage.
* VK grid voltage for mid-range pervéance (negative).
* SFK shape factor for pervéance reduction law.
* SIGMAG effective cross-section of the grid relative to the anode.
* ALPHAG grid current amplification factor.
* SFG shape factor of the grid current law.
*
B1 15 0 V=V(G)-V(C)<-1P ?
+ (K)*((1+CRIC)*((V(G)-V(C))/CVK))^(SFK))/((1+((V(G)-V(C))/CVK))^(SFK)) : C0
B2 16 0 V=V(G)-V(C)<-1P ? (MU)*((1+RNU)*((V(G)-V(C))/VMU))^(SFMU)
+ /((1+((V(G)-V(C))/VMU))^(SFMU)) : C0U
B4 9 0 V=V(G)-V(C)-(VBIG)+(V(A)-V(C)-(VBIA))/((V(16)+10)
B6 10 0 V=V(9)>0 ? V(15)*V(9)^1.5/((V(ISAT)+1P) : 0
B7 12 0 V=V(10)<(SFG) ? V(10)*((V(ISAT)+1P) :
+ (V(ISAT)+1P)*((SFG)+(V(10)-(SFG))*((1-SFG)/((1-2*SFG)+V(10))))
B8 14 0 V=V(A)-V(C)>(VBIA+0.1H) ? (V(A)-V(C)-(VBIA))/ALPHAG : 2P
B9 28 0 V=V(G)-V(C)>(VBIG+0.1H) ? V(14)>1P ? ((V(G)-V(C)-(VBIG)
+ (SIGMAG*(1/SFG))*V(14))/((V(G)-V(C)-(VBIG)+V(14)))^(SFG) : 0
B10 8 0 V=V(G)-V(C)<0 ?
+ V(28)*((VBIG+10U)+(V(C)-V(G)))/(VBIG+10U) : V(28)
B15 G C I=V(B)*V(12)
B17 A C I=(1-V(B))*V(12)
*
.ENDS
*****

```

■ Figure 1 : extrait de la bibliothèque «tubes» Excem.



■ Figure 2 : réseau de courbes obtenues pour la 12AU7 selon le modèle de la figure 1.

remplaçant dans le sous-circuit 12AU7, le filament (Heat1) par une résistance et une source de tension délivrant  $I_{sat}$ . Finalement la simulation rend compte de façon assez précise du comportement réel de la triode.

La **figure 3** montre un schéma d'amplificateur utilisant à la fois un transistor MOS et une double triode, utilisés en étage cascode, de façon à obtenir, sur une impédance élevée, un très fort gain en tension, un taux de contre-réaction élevé, et une bonne caractéristique en fréquence.

La **figure 4** montre, pour cet amplificateur, la tension de sortie (courbe 2), pour une tension d'entrée donnée sur la courbe 1. Cette simulation est une simulation non linéaire, faisant entrer en ligne de compte tous les phénomènes dont nous avons parlé dans la triode. Le modèle pour le MOS est lui-même un sous-circuit sophistiqué, approprié à la description des MOS de puissance, tel qu'il est disponible dans la bibliothèque fournie par Intusoft. On note que, à la fréquence considérée, de 100 kHz pour le signal d'entrée, avec une amplitude crête-à-crête de 1 V, on obtient en sortie une amplitude crête à crête de 260 Volts environ. La courbe de la **figure 5** donne la réponse en fréquence pour des petits signaux, de cet amplificateur.

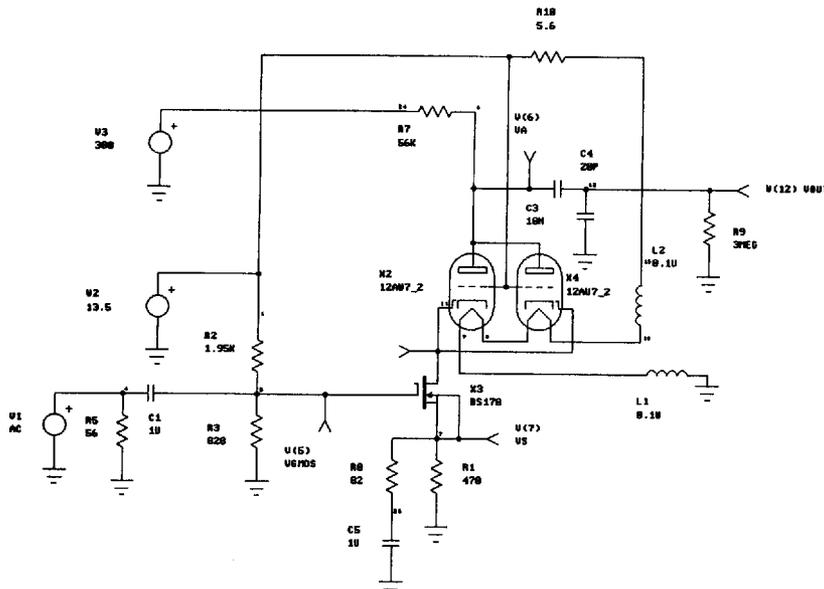


Figure 3 : un schéma d'amplificateur cascode utilisant une double triode, saisi sous Spicenet.

## Utilisation de la pentode dans un montage amplificateur

Les utilisateurs de pentodes étaient encore plus démunis que les utilisateurs de triodes puisqu'il n'existait aucun modèle crédible, même rudimentaire, pour ce type de tube.

Nous avons donc créé un modèle pour la pentode, qui reprend le principe du modèle de triode en tenant compte des spécificités dues à la présence de plusieurs grilles et de leur interaction. Comme celui-ci est beaucoup plus compliqué que celui correspondant à la triode, nous ne le décrirons pas ici en détail. Ce modèle prend en compte la loi du courant de  $C_2$ , les effets de la

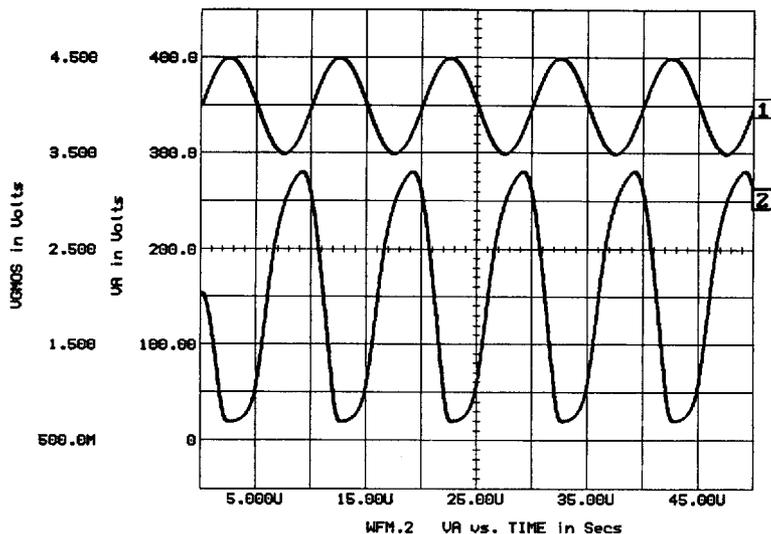


Figure 4 : tension de sortie de l'ampli de la figure 3 en (2) obtenue pour l'excitation (1).

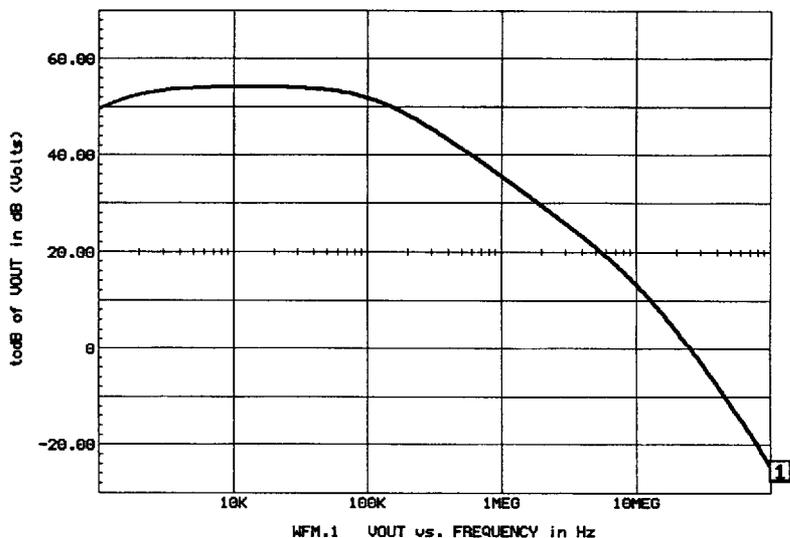
tension de  $G_2$  sur le courant d'anode et le courant de  $G_1$ , etc. Même les effets de cathode virtuelle (réduction rapide du courant de cathode lorsque  $V_a$  descend en dessous de 40 V) ont pu être décrits.

La figure 6 montre un exemple de réseau de courbes (courant d'anode en fonction de tension d'anode pour différentes tensions de grilles), que l'on obtient avec notre modèle pour une pentode.

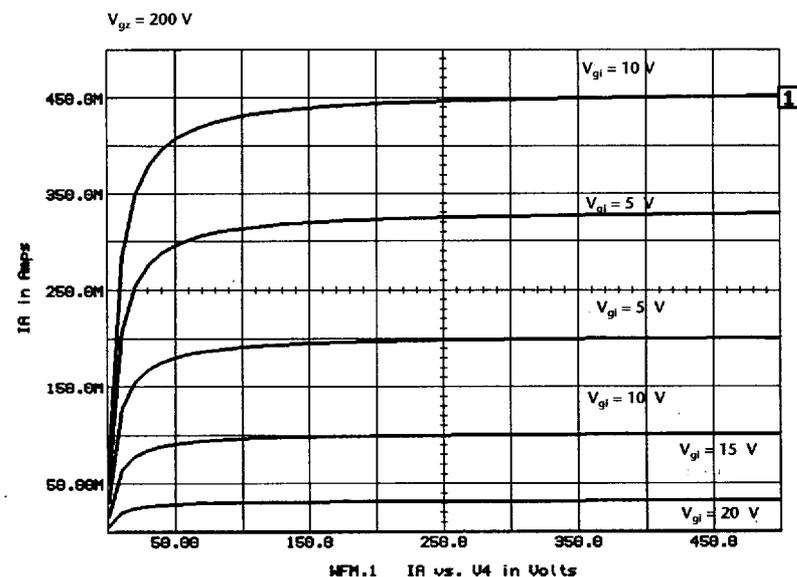
La figure 7 montre l'utilisation de cette pentode dans un schéma similaire à celui apparaissant sur la figure 3.

Sur la figure 8, on voit que la réponse de cet amplificateur à une sinusoïde à 100 kHz d'amplitude 1,6 Volts crête-à-crête donne en sortie une amplitude d'environ 430 volts crête à crête. On note comme dans le cas de l'amplificateur à triode, la légère distorsion qui apparaît à ce niveau, toutefois avec des caractéristiques un peu différentes. La courbe 1 est le signal d'entrée, et la courbe 2, le signal de sortie.

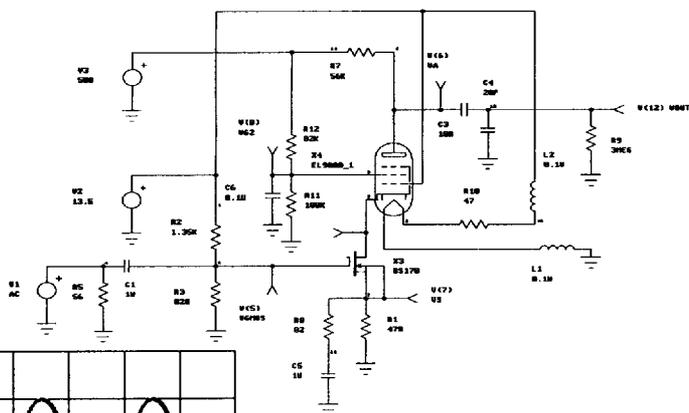
La figure 9 montre sur la courbe 1 le signal sur la cathode de la pentode et sur la courbe 2 le signal sur la grille  $G_2$  de la pentode. On notera la forme très non-linéaire sur la tension de cathode. C'est grâce à la contre-réaction qui crée cette forme, particulière, que le signal de sortie est à peu près linéaire ! La courbe de la figure 10, enfin, donne la réponse en fréquence de l'amplificateur avec une pentode. On peut noter que les circuits des figures 3 et 7 sont assez semblables à celui de l'amplificateur Amp1 conçu et fabriqué par Excem, qui est un amplificateur utilisant une tétrode à faisceau dirigé alimenté en 1000 à 1200 V continus et pouvant délivrer un signal crête-à-crête en sortie d'environ 960 volts.



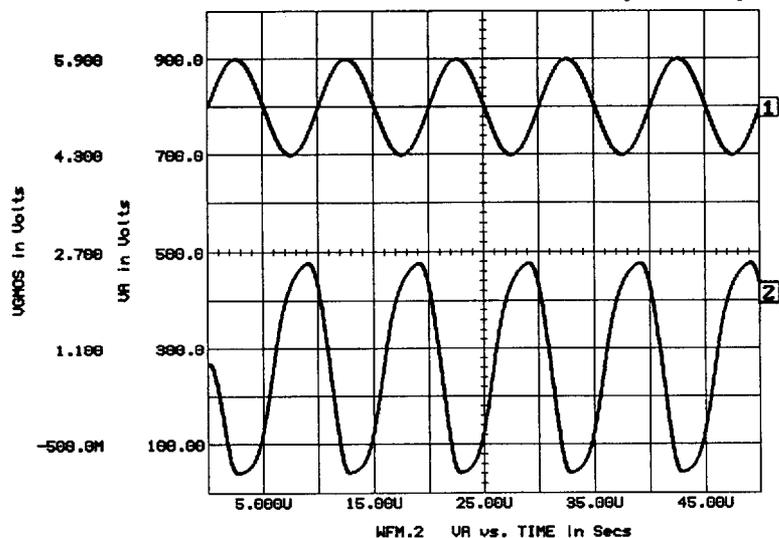
■ Figure 5 : réponse en petits signaux de l'ampli de la figure 3.



■ Figure 6 : réseau de courbes du modèle de pentode.



■ Figure 7 : amplificateur à pentode saisi sous Spicenet.



■ Figure 8 : réponse (2) de l'amplificateur à pentode de la figure 7 pour l'excitation sinusoïdale (1).

## Conclusion

Ces travaux permettent d'étendre encore les possibilités des simulateurs dérivés du SPICE de Berkeley. Les concepteurs bénéficieront ainsi pour les tubes du même confort de conception que pour leurs études (plus fréquentes !) de circuits 100 % à «l'état solide» !

**F. Broyde  
EXCEM**

### Encadré 1

Pour ceux qui ne connaissent pas le logiciel d'Intusoft, nous rappelons comment l'on peut mener une simulation :

Le simulateur électronique ICAP/4 d'Intusoft est un ensemble intégré se composant de plusieurs modules s'utilisant successivement pour mener à bien une simulation.

SPICENET permet de dessiner à l'écran le schéma électronique dans un environnement convivial, offrant l'accès à une très large bibliothèque de composants, contenue dans PRESPICE.

La variation des sources de courant et de tension (que l'on peut gérer sous l'environnement de SpiceNet) conditionne le comportement du circuit au cours de l'analyse. Il est ainsi possible de simuler entre autres des variations temporelles ou continues, dans différentes conditions de polarisation. Les paramètres (courant, tension) dont on souhaite observer l'évolution sont également déterminés dans l'environnement de SpiceNet. La netlist résultante est un fichier. CIR (format Spice), qui est un texte comportant une description nodale du circuit et d'autres instructions Spice, à partir duquel le noyau de calcul ISSPICE3, basé sur la version 3E.2 de l'université de Berkeley, effectue la simulation.

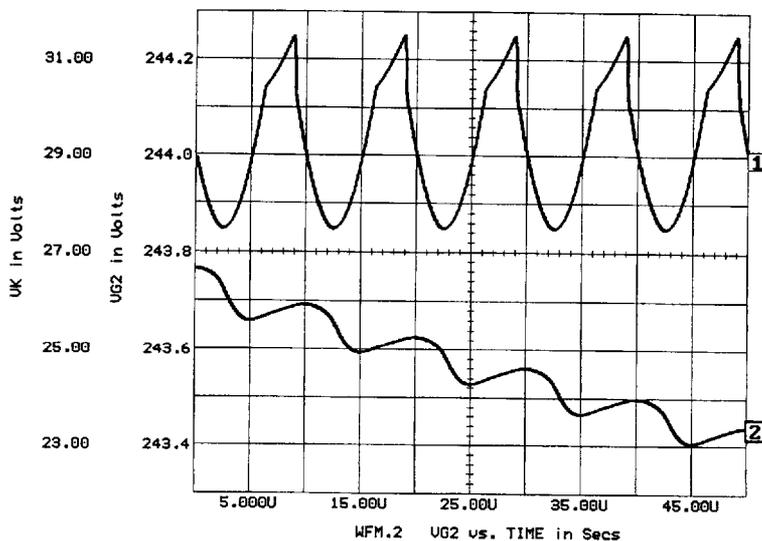
On peut visualiser alors les résultats de la simulation, fichiers. Out au format Spice, à l'aide d'INTUSCOPE.

### Encadré 2

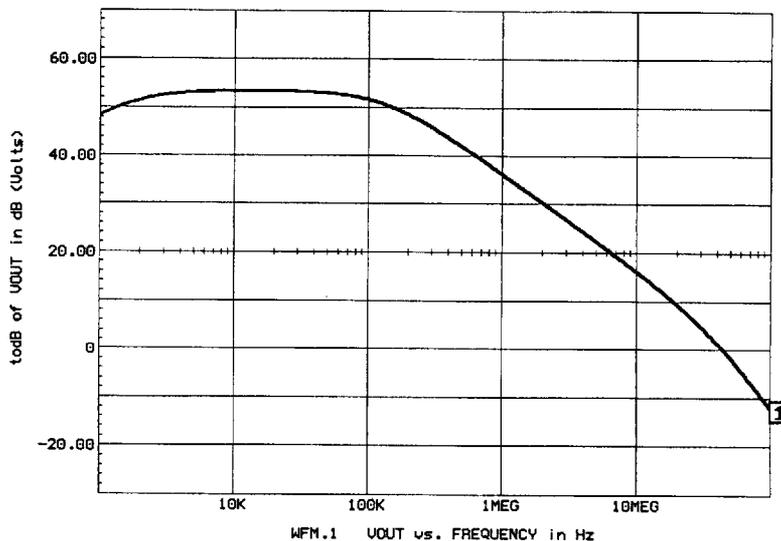
Le noyau de calcul IsSpice3 d'Intusoft contient des possibilités de syntaxe étendues, et notamment :

Les B-éléments : ce sont des sources de tension ou de courant définies par une fonction mathématique d'une autre source de courant ou de tension.

Les instructions If-Then-Else permettent d'introduire des conditions booléennes lors de la simulation.



■ Figure 9 : tensions cathode et grille G2 de la pentode pour le circuit de la figure 7.



■ Figure 10 : réponse en fréquence de l'amplificateur à pentode.