

La simulation électronique avec SPICE

par Serge GAZAIX
Lycée Kléber - 67000 Strasbourg

RÉSUMÉ

Les ingénieurs responsables de la conception d'un nouveau circuit ont systématiquement recours à la simulation *avant* toute réalisation matérielle. Nous présentons ici le programme le plus utilisé en matière de simulation de circuits électroniques, avec quelques applications exploitables dans les lycées.

1. PRÉSENTATION DU SYSTÈME SPICE

1.1. Généralités

SPICE (simulation program with integrated circuits emphasis) a été développé à l'université de Berkeley dans les années 70, initialement en langage Fortran.

Les versions actuelles utilisent en général le même «noyau», et diffèrent surtout par l'interface utilisateur : menus déroulants, saisie du schéma, réglages des paramètres de la simulation, interactivité, visualisation des résultats des calculs au cours de leur déroulement...

1.2. Principe

a - Saisie du schéma

La première opération consiste à saisir le schéma du dispositif ; les programmes commerciaux proposent en général un module de saisie graphique. Sinon il faut utiliser un éditeur compatible SPICE comme ORCAD. L'utilisateur dispose pour cette saisie de bibliothèques de composants et de sources prédéfinies. Sous Windows, il n'a pas besoin de mémoriser des touches de fonction : tout se fait à la souris et avec des menus déroulants. Il peut aussi définir des conditions initiales (comme la tension aux bornes d'un condensateur à $t = 0$) et choisir la ou les sources (toutes les formes de signal sont possibles : trains d'ondes, impulsions de temps de montée réglables, modulation de fréquence...).

Les caractéristiques de tous les composants électroniques sont stockées dans des fichiers par les fabricants (une dizaine de paramètres pour une simple diode).

Une fois le schéma complété, il est transcrit sous forme d'un fichier CIRCUIT.CIR aux normes SPICE ; ce fichier de type texte peut être lu et modifié avec un éditeur de texte standard, et ne dépend donc pas de l'environnement graphique utilisé (DOS, WINDOWS, UNIX, MACINTOSH...).

La description d'un réseau par SPICE consiste à numéroté toutes les connexions, en spécifiant les dipôles présents entre deux nœuds. Il est en principe possible d'écrire directement le fichier CIRCUIT.CIR avec un traitement de texte, sans passer par un éditeur de schémas, mais c'est un travail extrêmement fastidieux, à déconseiller !

b - Simulation

L'utilisateur peut choisir le type d'analyse à effectuer :

- étude en régime transitoire, analyse spectrale,
- mode sinusoïdal établi ; recherche de fonction de transfert, des déphasages, amplitudes,
- recherche de point de fonctionnement en continu.

Il lance alors la simulation, dont les résultats sont stockés dans un fichier CIRCUIT.DAT.

c - Exploitation de la simulation

Un module spécial (PROBE) est utilisé pour traduire le fichier résultat CIRCUIT.DAT sous forme de graphiques. On peut obtenir en couleur les tracés de toutes les intensités, potentiel, d.d.p. désirées, ou des expressions de ces grandeurs (dont module et phase).

2. UN EXEMPLE TRÈS SIMPLE

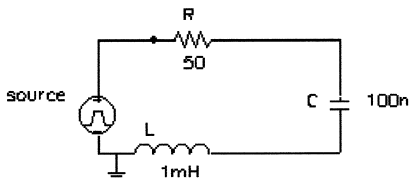


Figure 1

2.1. Schéma

La source est définie comme :

- un générateur sinusoïdal d'amplitude 2 V pour l'étude en fréquence,
- un générateur de tension échelon (bascule de 0 à 10 V) pour l'étude en transitoire.

Une fois le schéma saisi avec le module d'édition de schéma, il faut le transcrire sous forme d'un fichier texte, qui se présente de la manière suivante :

* Schematics Netlist *

R_R \$N_0003 \$N_0002 50

V_source \$N_0003 0 dc 1 ac 2

+PULSE 0 10 10u 0u 2ms 2m 4m

L_L 0 \$N_0005 1mH

C_C \$N_0005 \$N_0002 100n

Chaque composant est spécifié, ainsi que les nœuds auxquels il est relié. On voit l'intérêt qu'il y a à utiliser un éditeur graphique de schéma...

2.2. Étude fréquentielle

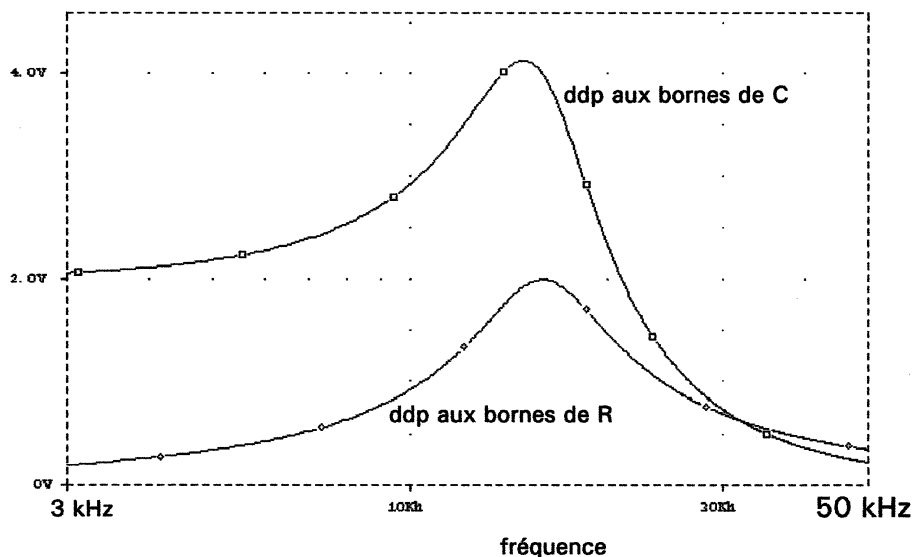


Figure 2

L'utilisateur choisit la plage de fréquence, le pas d'incrémentation et le mode de balayage (linéaire ou logarithmique). Il peut aussi tracer un réseau de courbes, en incrémentant la valeur d'un paramètre (R par exemple) avec un pas réglable.

2.3. Étude de la réponse à une tension échelon

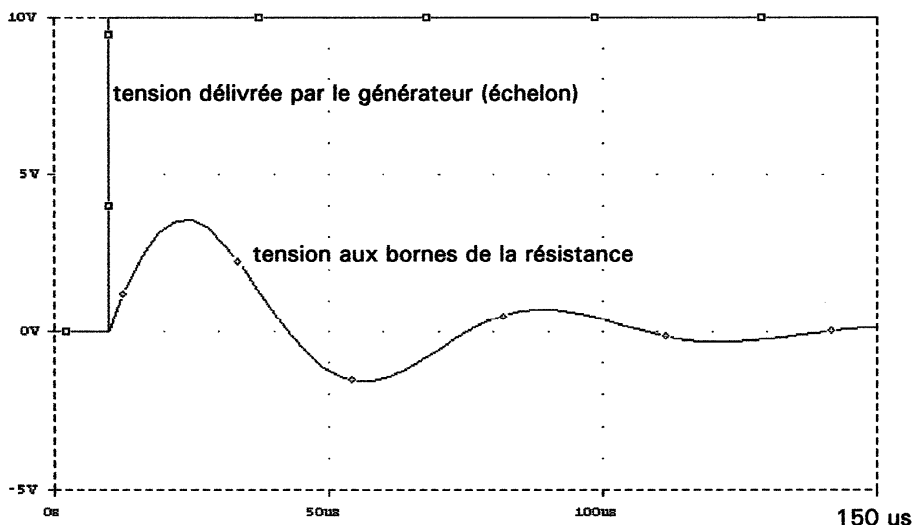


Figure 3

Le paramètre critique est l'intervalle de temps entre deux points : il doit être faible pour avoir une bonne précision, mais attention au temps de calcul... ! Signalons à ce propos que le processeur arithmétique est bien utile avec SPICE.

2.4. Établissement des oscillations

Les lecteurs critiques trouveront que les courbes présentées jusqu'ici peuvent s'obtenir à l'oscilloscope pour moins cher ! Voici un exemple de simulation dont la réalisation expérimentale nécessite un générateur de trains d'onde (rare en lycée) ou un oscilloscope numérique. Il s'agit du même circuit qu'aux paragraphes précédents, avec le générateur qui démarre à $t = 40 \mu s$.

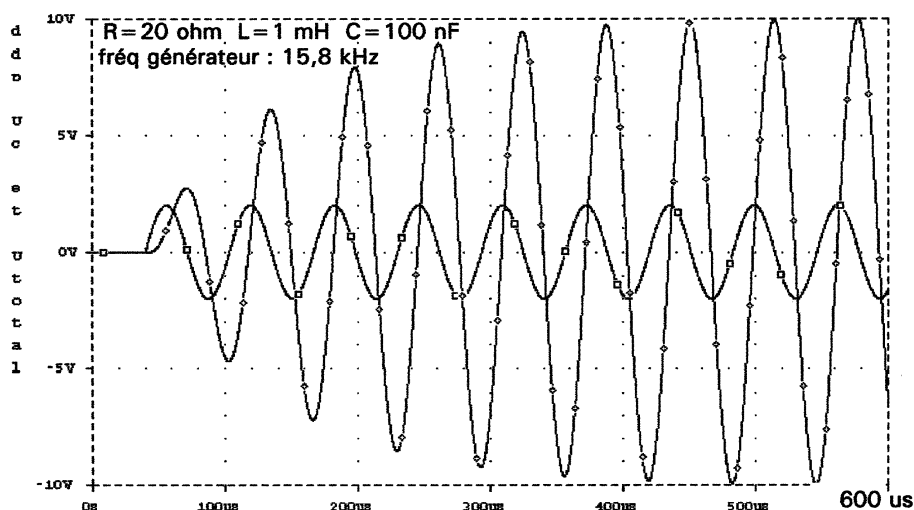


Figure 4 : losanges : ddp aux bornes du condensateur,
carrés : tension délivrée par le générateur.

Fréquence du générateur : 15,8 kHz (proche de la fréquence de résonance), $R = 20 \, \Omega$, $L = 1 \, \text{mH}$, $C = 100 \, \text{nF}$.

3. UN EXEMPLE MOINS ÉLÉMENTAIRE

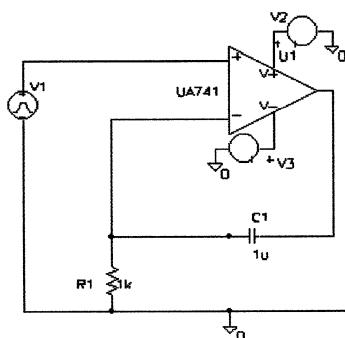


Figure 5

Il s'agit d'un exercice classique utilisant l'amplificateur opérationnel ; l'A.O est supposé idéal, mais pas forcément en mode linéaire. A $t = 10 \, \text{ms}$, la tension d'entrée bascule de $+10 \, \text{V}$ à $-10 \, \text{V}$.

L'étude analytique de ce montage ne présente pas de difficultés insurmontables, à condition de préciser clairement les hypothèses faites (mode linéaire ou saturé) et de les vérifier a posteriori. Le résultat de la simulation est présente figure 6. On constate que l'A.O est en mode linéaire de $t = 10$ ms et $t = 12$ ms.

Ce montage est facile à réaliser et à analyser avec le matériel usuel de T.P.

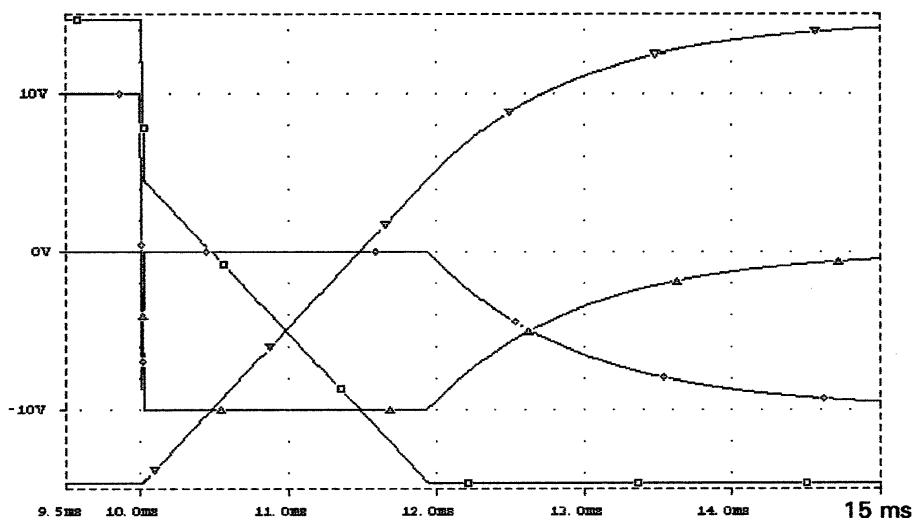


Figure 6 : carrés : tension de sortie de l'A.O.,
 losanges : tension « ϵ » entre les entrées E_+ et E_- de l'A.O.,
 triangles pointe en bas : tension aux bornes du condensateur,
 triangles pointe en haut : tension aux bornes de la résistance R_1 .

L'apport du simulateur est ici de :

- 1 - Pouvoir présenter plusieurs tensions (ou intensités) sans se préoccuper du problème de la masse commune.
- 2 - Le graphe est beaucoup plus facilement exploitable qu'un écran d'oscilloscope. En pratique, on peut commencer par effectuer les calculs, puis visualiser les résultats au rétroprojecteur (ce qui est quand même plus efficace que de «montrer» un écran d'oscilloscope de dix centimètres de côté, si tant est que l'on dispose d'un oscilloscope dans la salle de cours...).

4. UN CAS OÙ LE SIMULATEUR EST IRREMPLAÇABLE

Il s'agit ici de donner une idée de la démarche des concepteurs de circuits intégrés. Le schéma présenté figure 7 est celui, classique, de l'amplificateur opérationnel μA 741. A partir de ce schéma, SPICE peut calculer toutes les caractéristiques utiles du circuit, sans faire les approximations usuelles comme : impédance d'entrée nulle, gain en mode différentiel infini, temps de montée nul,... La température est prise en compte au niveau de chaque jonction, de même que les capacités parasites des jonctions.

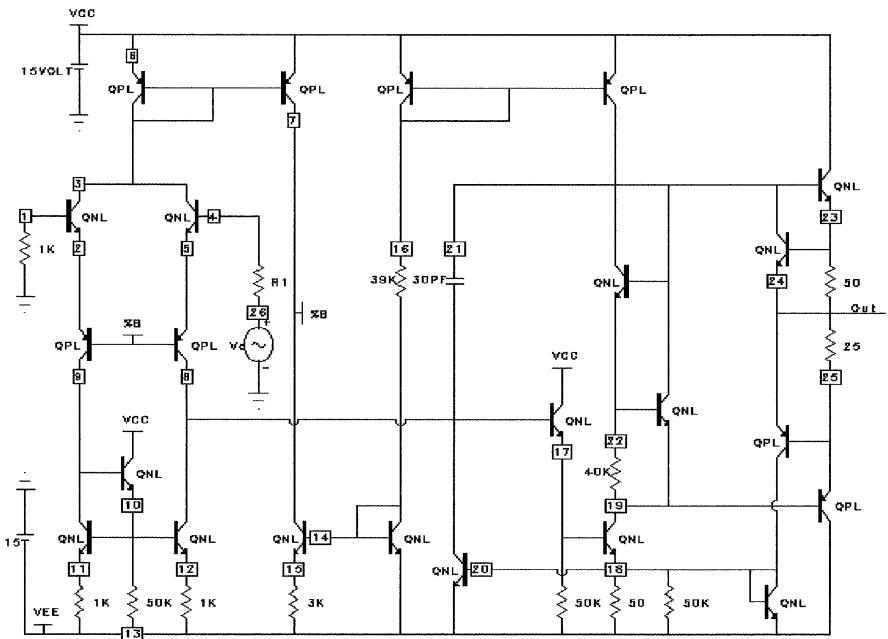


Figure 7

La modification d'un paramètre du circuit peut être étudiée immédiatement, sans passer par l'étape lente et coûteuse de la réalisation d'un nouveau prototype.

Il est même possible de prendre en compte l'inévitable dispersion sur la valeur des résistances intégrées : SPICE propose un mode «Monte Carlo» dans lequel on peut spécifier, pour un composant donné, la

valeur moyenne et l'écart-type. Le programme effectue alors N simulations, avec à chaque fois un tirage au sort de la valeur du composant. Le fichier résultat contient alors un histogramme pour chaque caractéristique du circuit. Cette étude statistique est totalement impensable sans simulateur ; elle est pourtant cruciale, quand on sait que la réalisation d'un prototype de circuit intégré se chiffre en kilofrancs !

Nous proposons ici (figure 8) l'étude du gain en boucle ouverte, qui est une mesure très délicate à effectuer dans un lycée, en raison de la très faible valeur de la tension d'entrée et des inévitables parasites ; La figure 9 présente la même étude, avec la résistance R1 qui fluctue autour de sa valeur nominale de 1 k Ω ; cent quarante tirages de R1 sont réalisés, avec une dispersion de 50 %, suivant une loi de distribution gaussienne. La figure 10 présente l'histogramme des valeurs du gain en très basse fréquence (10 Hz).

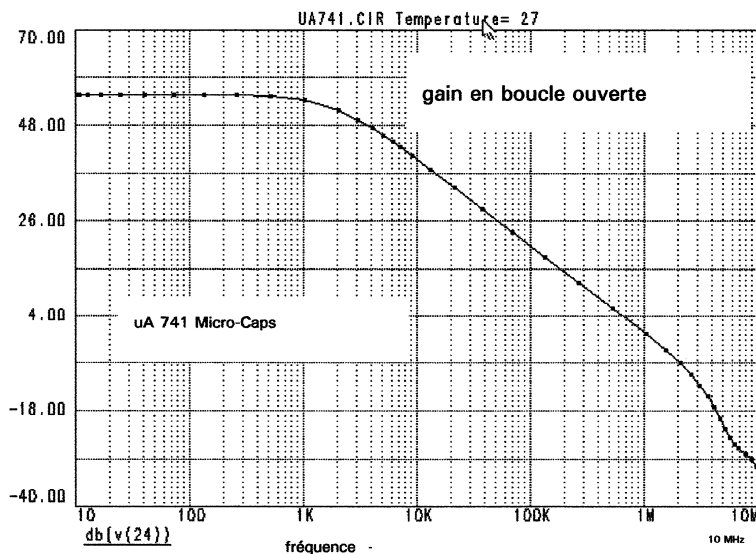


Figure 8

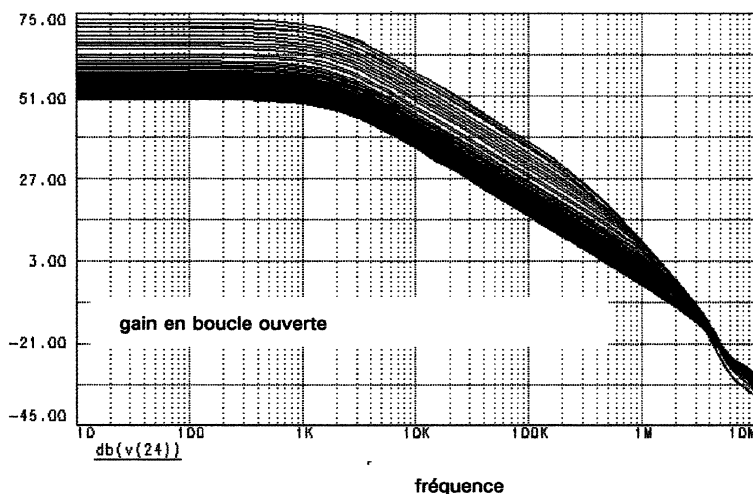


Figure 9

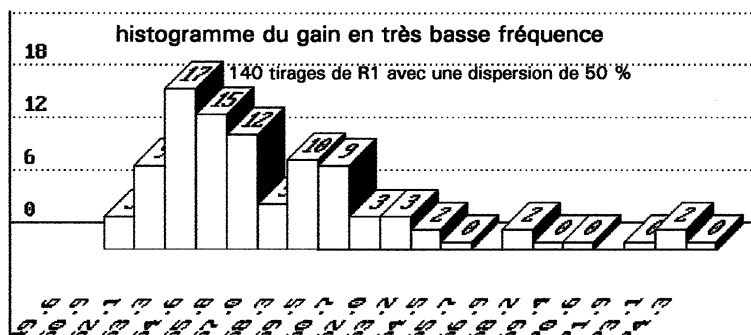


Figure 10 : Histogramme du gain en très basse fréquence.

5. CONCLUSION : QUE FAIRE AVEC UN SIMULATEUR

Il est clair qu'il ne s'agit pas de remplacer les séances de T.P. !
Voici les applications qu'on peut envisager :

1 - Vérifier le principe d'un T.P. d'électronique avant de réaliser une maquette avec circuit imprimé (opération souvent problématique dans un lycée). On peut vérifier que le schéma est exempt d'erreur de principe, ajuster les valeurs des composants au simulateur, et même simuler des défauts, en rajoutant des résistances de fuite par exemple.

Signalons qu'un module additionnel permet souvent de générer le tracé des pistes du circuit imprimé à partir du schéma de principe.

2 - Présenter plus clairement qu'à l'oscilloscope les paramètres d'un circuit ; en effet, SPICE permet de visualiser toutes les intensités et toutes les tensions sans se soucier des problèmes de masse commune ; le graphique obtenu est plus lisible et plus facilement exploitable que l'écran d'un oscilloscope.

3 - Réaliser une «expérience» impossible à réaliser au lycée, par manque de matériel ou du fait que le temps manque pour réaliser le circuit imprimé. C'est particulièrement utile pour les montages haute fréquence (fréquence supérieure au MHz), où il est exclu de réaliser un câblage avec des fils «volants» ; la réalisation effective du montage nécessite obligatoirement la fabrication d'une maquette, avec un plan de masse soigné, des blindages...

4 - En séance de cours, illustrer rapidement un exercice ou problème.

5 - En séance d'exercices, s'il y a des PC disponibles en nombre suffisant, réaliser un travail mixte : recherche «à la main» et simulation des résultats.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Alain RIVAT : *Logiciel de simulation analogique PSPICE 5.30*, avec disquette d'exemples : environ 300 F., Dunod éditeur.
- [2] Paul TUINENGA : *Guide pour l'analyse et la simulation avec PSPICE*, Masson éditeur.
- [3] Articles mensuels dans la revue Électronique Radio-Plans (revue à conseiller de toute façon à tout professeur souhaitant acquérir un peu de culture électronique).

Annexe

Quelques versions de SPICE disponible en France

Nous ne présentons que des versions munies d'éditeur de schéma, car la saisie en mode texte du fichier ASCII décrivant un circuit est vraiment trop fastidieuse. Inconvénient : un schéma saisi avec une version ne sera pas lu par une autre, alors que la norme Spice prévoit que les fichiers texte décrivant un circuit sont compatibles. Certaines versions permettent en principe de convertir le fichier graphique (dépendant de la version) en un fichier texte aux normes SPICE. Nos essais nous ont montré que la compatibilité n'est pas toujours totale : en particulier, les bibliothèques de composants ne sont pas organisées de la même façon dans toutes les versions. Autrement dit, il vaut mieux se limiter à une version.

Les bibliothèques de composants fournies avec ces logiciels suffisent pour un usage courant ; des bibliothèques complémentaires sont en général disponibles, pour des composants plus rares.

PSPICE distribué par ALS-DESIGN

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

Il s'agit de la version Dos ou Windows de PSPICE de MICROSIM, disponible pour PC, Mac, station Unix, etc. Les six premières figures présentées ci-dessus ont été réalisées avec une version d'évaluation.

Ce logiciel est livré avec un module intégré de saisie de schéma et une bibliothèque largement suffisante de composants (transistors usuels, μA 741, bobines, sources de tension et de courants, ...).

Il existe une version d'évaluation (Dos ou Windows) limitée à dix transistors, soixante-quatre nœuds et deux amplificateurs opérationnels pour 150 F TTC. Cette version possède un module de saisie de schémas, et permet de se faire une idée précise des possibilités du logiciel.

ALS-DESIGN propose des tarifs éducation pour les versions professionnelles ; les tarifs vont de 4 900 F TTC (version Dos) à 13 900 F TTC pour une version Windows. Les clients «éducation» bénéficient du même support technique que les clients «industriels».

SPICEAGE pour Windows vendu par Multipower

22, rue Baudot - 91120 PALAISEAU - Tél. : (1) 69.30.13.79.

Logiciel professionnel bien conçu, parfaitement adapté à Windows, très convivial avec de très belles courbes et sorties sur imprimantes ainsi qu'une bonne aide en ligne.

Un défaut : pas de module intégré de saisie de schémas ; donc, il faut saisir le fichier circuit.cir en mode texte ou utiliser un éditeur de schémas compatible Spice.

L'éditeur de schémas GESECA est vendu 1 950 F HT par Multipower.
Prix normal : 3 950 F HT.

B2SPICE pour Windows distribué par Telindel

B.P. 28 - 83951 LA GARDE Cedex - Tél. : 94.21.32.07.

B2SPICE possède un éditeur de schémas intégré, des bibliothèques de composants usuels ainsi que la sortie sur imprimante.

Prix : 1 900 F TTC.

Electronic Workbench (Telindel)

Il s'agit d'un logiciel Dos, entièrement francisé, assurant la saisie de schéma, ainsi que la simulation analogique et logique.

L'originalité de ce logiciel réside dans le fait que les résultats des simulations sont affichés sur des appareils de mesure qui apparaissent à l'écran (oscilloscope, voltmètre, ...), d'où l'intérêt pédagogique. Une disquette de démonstration est disponible.

Prix : 2 500 F HT (un poste) 8 500 F HT (dix postes).

The student edition of MICRO-CAPS IV

Livre plus disquette. Auteur : Martin S. RODEN (en anglais).
Éditeur : the Benjamin/Cummings Publishing company (distribué également par Mc Graw-Hill semble-t-il).

Prix : 400 F environ (trouver un libraire capable de commander à l'étranger).

Version Dos complète (limité à cinquante nœuds, ce qui est suffisant), avec un manuel précis.

L'étude du gain en boucle ouverte du μA 741 a été réalisée avec cette version.

Configuration minimale vraiment minimale : 80286, DOS 3.3 ou plus, 640 Koctets, souris, disque dur avec 2 Moctets libres.

C'est la version qui peut tourner dans un labo d'informatique de Lycée, ou sur le PC au fond de la salle de T.P...

ICAP distribué par EXCEM

*12, chemin des Hauts de Clairefontaine - 78580 MAULE -
Tél. : (1) 34.75.13.65.*

Très beau logiciel, très complet et convivial. L'utilisateur dispose d'un véritable «oscilloscope logiciel» pour visualiser les potentiels et intensités désirés. La disquette de démo vaut la peine (100 F).

Prix : 22 950 F HT pour la version professionnelle.
6 500 F HT pour la version ICAP4 light (limitée à cinq cents composants, avec des possibilités de visualisation plus limitée que dans la version professionnelle.