

LE SIMULATEUR **LTspice IV**

Manuel, méthodes et applications

Gilles Brocard

Ingénieur et formateur en électronique

Préface de Mike Engelhardt

2^e édition

DUNOD

Cet ouvrage a été traduit et publié en anglais sous le titre
The LTspice IV Simulator ; Manual, methods and applications

Une traduction en allemand est également disponible.

Vous pouvez vous les procurer en vous connectant
sur le site de la société Würth Elektronik à l'adresse suivante :
www.we-online.com/ltspace-book

Illustration de couverture : Gilles Brocard

Toutes les marques citées dans cet ouvrage sont des
marques déposées par leurs propriétaires respectifs.

Le pictogramme qui figure ci-contre mérite une explication. Son objet est d'alerter le lecteur sur la menace que représente pour l'avenir de l'écrit, particulièrement dans le domaine de l'édition technique et universitaire, le développement massif du photocopillage. Le Code de la propriété intellectuelle du 1^{er} juillet 1992 interdit en effet expressément la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Or, cette pratique s'est généralisée dans les établissements		d'enseignement supérieur, provoquant une baisse brutale des achats de livres et de revues, au point que la possibilité même pour les auteurs de créer des œuvres nouvelles et de les faire éditer correctement est aujourd'hui menacée. Nous rappelons donc que toute reproduction, partielle ou totale, de la présente publication est interdite sans autorisation de l'auteur, de son éditeur ou du Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).
--	---	--

© Dunod, Paris, 2011, 2013
ISBN 978-2-10-059139-8

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2° et 3° a), d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

PRÉFACE

Préface de la première édition

It is an honor to write a preface for Gilles Brocard. I appreciate his work writing this book and hope you benefit from his labors.

LTspice has been fun to write. It let me implement a number of numerical methods that make LTspice better than traditional SPICE programs : a new numerical integration method, node reduction, a native circuit element that behaves like a power MOSFET, and new time step size control to name a few.

The biggest recent advance in LTspice was when it went multi-threaded in 2008. We found it easy to distribute the computations over multiple cores but challenging to make the simulation actually run faster. The problem was that the LTspice object code had been so optimized (much had already been implemented in optimized assembly language) that it didn't take very many microseconds per timestep and that was a short time compared to how well one can synchronize multiple threads. That's when we developed a means to dynamically adjust each thread's cache size to stochastically cool the threads to keep the work load spread evenly. Another important technique introduced at that time was code generation that generates an assembly listing optimized for your circuit. Then that code is assembled and linked by LTspice for execution. This self-authoring code is generated typically every few seconds during the simulation to help your circuit execute close to the theoretical flop limit of a modern CPU. That's why LTspice IV is fast.

But all this is for a purpose. I believe SPICE has impacted mankind more than any other simulator. Writing a better SPICE is important. LTspice offers you the ability to rapidly prototype your designs so that you understand them better and even develop intuition.

Mike ENGELHARDT
Manager of Simulation Development
Linear Technology Corporation
Avril 2011

Table des matières

Préface	V
Avant-propos	XXV
Chapitre 1 – Présentation de LTspice IV et historique	1
1.1 Réalisation d’une simulation avec LTspice IV	1
1.1.1 <i>Trois étapes élémentaires</i>	1
1.1.2 <i>Analyse des résultats</i>	3
1.2 Petite histoire de LTspice IV	3
1.2.1 <i>CANCER – 1969 à 1971</i>	3
1.2.2 <i>SPICE1 – 1972 à 1974</i>	4
1.2.3 <i>SPICE2 – 1975 à 1983</i>	4
1.2.4 <i>SPICE3 – 1984 à 1990</i>	5
1.2.5 <i>Naissance de LTspice - 1990-2007</i>	5
1.2.6 <i>Version LTspice IV depuis fin 2008</i>	6
1.3 Quels sont les principaux avantages de LTspice IV ?.....	7
1.4 Ce que LTspice IV sait faire	8
1.5 Ce que LTspice IV ne sait pas faire	10
1.6 Conclusion	11

Chapitre 2 – Fichiers fournis avec LTspice IV	13
2.1 Installation de LTspice IV	13
2.1.1 Configuration informatique requise	13
2.1.2 Téléchargement de LTspice IV	13
2.2 Comment fonctionne LTspice IV	15
2.3 Les éditeurs de LTspice IV	16
2.4 Les fichiers d'accompagnement	17
2.4.1 Les modèles, sous-circuits, macromodèles et bibliothèques de composants ...	18
2.4.2 Les exemples d'applications	18
2.5 Extensions des fichiers LTspice IV	24
Chapitre 3 – Fonctionnement et premier exemple	29
3.1 Première utilisation de LTspice IV	29
3.2 Fonctionnement de LTspice IV	30
3.3 Les menus de la phase de démarrage de LTspice IV	31
3.3.1 Menu File (Fichier)	32
3.3.2 Menu View (Affichage)	32
3.3.3 Menu Tools (Outils)	33
3.3.4 Menu Help (Aide) : commun à toutes les étapes de l'utilisation de LTspice IV	33
3.3.5 Le menu contextuel de la page de démarrage	34
3.4 Un exemple détaillé étape par étape	35
3.4.1 La saisie du schéma	37
3.4.2 La saisie des paramètres des composants	45
3.4.3 La saisie des paramètres de la simulation	51
3.4.4 Premières mesures fréquentielles	53
3.4.5 Mesures temporelles	54
3.4.6 Mesures de FFT	57
3.4.7 Mesures de la distorsion harmonique	58
3.4.8 Amplitudes maximales avant écrêtage	60
3.4.9 Agrandissements d'une partie de la courbe pour faire apparaître un défaut	63
3.4.10 Pour conclure cette première approche	65

Chapitre 4 – Éditeur graphique de schémas	67
4.1 Les commandes de LTspice IV	67
4.2 L'éditeur graphique de schémas	67
4.2.1 <i>Menu File (Fichier)</i>	69
4.2.2 <i>Menu Edit (Editeur)</i>	71
4.2.3 <i>Menu Hierarchy (Organisation de la hiérarchie)</i>	74
4.2.4 <i>Menu View (Affichage)</i>	74
4.2.5 <i>Menu Simulate (Simulation)</i>	77
4.2.6 <i>Menu Tools (Outils)</i>	78
4.2.7 <i>Menu Window (Gestion des fenêtres d'affichage)</i>	79
4.2.8 <i>Menu Help (Aide)</i>	80
4.2.9 <i>Menu contextuel de l'éditeur graphique de schémas</i>	80
4.3 Bases de données de composants	81
4.4 Saisie d'un nouveau schéma	82
4.4.1 <i>Ouvrir l'éditeur graphique de schémas</i>	82
4.4.2 <i>Placer les premiers éléments sur la page du schéma</i>	82
4.4.3 <i>Les principales commandes de l'éditeur de schéma</i>	84
4.4.4 <i>Interconnecter les éléments du schéma</i>	87
4.4.5 <i>Saisir la valeur ou la référence d'un composant</i>	88
4.4.6 <i>Saisir les valeurs d'un composant avec l'éditeur d'attributs</i>	90
4.4.7 <i>Enrichir le schéma (optionnel)</i>	92
4.4.8 <i>Ajouter la simulation, la source et des directives (optionnelles)</i>	93
4.4.9 <i>Enregistrer votre schéma</i>	94
4.4.10 <i>Lancer la simulation</i>	94
4.5 Incorporation d'un BUS de câblage	94
4.6 Rappel des règles d'utilisation de l'éditeur de schémas	96
4.7 Exportation d'un schéma	98
Chapitre 5 – Syntaxe et éditeur de composants	99
5.1 Règles syntaxiques générales sous LTspice IV	99
5.2 Éditeurs de valeurs de composants	102

5.3	Procédures pour accéder aux modèles usuels ou complexes des composants	106
5.3.1	<i>Modifications des valeurs courantes d'un composant</i>	106
5.3.2	<i>Affichage des attributs et modification des valeurs d'un composant</i>	111
5.4	Attribution des lignes de l'éditeur d'attributs	112
5.5	Affichage des attributs d'un composant utilisant deux modèles	114
Chapitre 6 – Éditeur de symboles et liens hiérarchiques		117
6.1	Menu éditeur de symboles	117
6.1.1	<i>Menu File (Fichier)</i>	118
6.1.2	<i>Menu Edit (Fichier)</i>	118
6.1.3	<i>Menu Hierarchy (Hiérarchie)</i>	118
6.1.4	<i>Menu Draw (Dessin)</i>	119
6.1.5	<i>Menu View (Affichage)</i>	119
6.1.6	<i>Menu Tools (Outils)</i>	119
6.1.7	<i>Menu Window (Gestion des fenêtres d'affichage)</i>	120
6.1.8	<i>Menu Help (Aide)</i>	120
6.1.9	<i>Le menu contextuel de l'éditeur de symboles</i>	120
6.2	Première étape, dessiner le corps du symbole	120
6.3	Deuxième étape, ajouter des bornes de raccordement	121
6.4	Troisième étape, ajouter ou modifier des attributs	121
6.5	Les appels possibles à partir d'un symbole	122
6.6	Attributs visibles attachés au symbole	125
6.7	Génération automatique de symboles à partir d'une partie de schéma	126
6.8	Génération automatique de symboles à partir d'une Netlist	127
6.9	Liens hiérarchiques avec LTspice IV	131
6.10	Règles d'utilisation de la hiérarchie	132
6.11	Règles à respecter pour la construction hiérarchique	133
6.12	Les commandes du menu Hierarchy	135
6.13	Exemple : déroulement d'une construction hiérarchique simple à 2 niveaux	136
6.13.1	<i>Écran numéro 1 : un modèle de sous-circuit</i>	136

6.13.2	Écran numéro 2 : un schéma secondaire	137
6.13.3	Écran numéro 3 : le schéma principal	137
6.13.4	Écran numéro 4 : une simulation du schéma principal	138
6.14	Exportation du répertoire Hierarchy	138
6.15	Interactivité entre le niveau bas et le niveau haut	139
Chapitre 7	Éditeur de Netlists	141
7.1	Origine historique des Netlists	141
7.2	La Netlist, un passage obligé	141
7.3	Structure, syntaxe et conventions des Netlists	142
7.4	Exemple de Netlist	142
7.5	Menus de l'éditeur de Netlists	143
7.5.1	Menu Edit (Fichier)	144
7.5.2	Menu View (Affichage)	144
7.5.3	Menu Simulate (Simulation)	144
7.5.4	Le menu contextuel de l'éditeur de Netlists	145
7.6	La rédaction d'une Netlist	145
7.7	Syntaxe du fichier Netlist .cir, .net ou .sp	147
7.8	Comment ouvrir l'éditeur de Netlists à partir d'un schéma	147
7.9	Exécution d'une Netlist	150
7.10	Exportation d'une Netlist correspondant à un schéma	151
7.11	Commandes systèmes utilisées dans les Netlists	151
Chapitre 8	Éditeur graphique de mesures, oscilloscope virtuel et FFT	153
8.1	L'afficheur de courbes de LTspice IV	153
8.1.1	Affichage des résultats du calcul de la simulation	153
8.1.2	Comment sélectionner des points de mesures sur votre schéma ?	153
8.2	Comment afficher une mesure sur l'oscilloscope virtuel ?	154
8.2.1	Visualiser une tension référencée à la masse	154
8.2.2	Visualiser un courant	154
8.2.3	Visualiser une tension différentielle (non référencée à la masse)	155

8.2.4	<i>Effacer les traces précédentes</i>	155
8.2.5	<i>Effacer sélectivement une ou plusieurs traces</i>	155
8.2.6	<i>Afficher la puissance instantanée</i>	156
8.2.7	<i>Afficher la puissance moyenne, l'intégrale de l'énergie sur la période affichée</i>	156
8.2.8	<i>Afficher la tension ou le courant moyen sur la période affichée ou la valeur efficace (RMS)</i>	157
8.3	Utilisation des menus	157
8.3.1	<i>Éditeur de l'oscilloscope virtuel et de l'analyseur FFT</i>	158
8.3.2	<i>Menu File (Fichier)</i>	158
8.3.3	<i>Menu View (Affichage)</i>	159
8.3.4	<i>Menu Plot Settings (Paramétrage de l'oscilloscope virtuel)</i>	160
8.3.5	<i>Menu Simulation (Lancement de la simulation)</i>	163
8.3.6	<i>Menu Tools (Outils)</i>	163
8.3.7	<i>Menu Window (Fenêtre)</i>	164
8.3.8	<i>Menu Help (Aide)</i>	164
8.3.9	<i>Le menu contextuel de l'oscilloscope virtuel</i>	164
8.4	Choisir les mesures à afficher	165
8.5	Ajouter une trace ou un écran supplémentaire	166
8.5.1	<i>Ajouter une trace supplémentaire</i>	166
8.5.2	<i>Ajouter un écran supplémentaire</i>	168
8.6	Fonctions Zoom	169
8.7	Opérations mathématiques dans l'oscilloscope virtuel	169
8.8	Demander le calcul d'une expression mathématique	170
8.9	Fonctions définies par l'utilisateur	174
8.10	Modifications des échelles des axes	175
8.10.1	<i>Échelles des axes verticaux</i>	175
8.10.2	<i>Échelles de l'axe horizontal</i>	176
8.11	Utilisation de l'oscilloscope virtuel en mode X-Y	177
8.12	Le menu contextuel et les échelles	178
8.13	Autres paramétrages des échelles	178
8.13.1	<i>Échelle verticale gauche</i>	179

8.13.2	<i>Affichage de la phase seule</i>	180
8.13.3	<i>Échelle verticale droite</i>	180
8.14	Gestion de l'oscilloscope virtuel multitraces	181
8.15	Informations concernant les traces de l'oscilloscope virtuel	183
8.16	Autres aménagements des traces de l'oscilloscope virtuel	184
8.17	Contrôles des couleurs de l'oscilloscope virtuel	185
8.18	Deux curseurs de mesures	187
8.19	Affichage des coordonnées dans le bandeau bas	190
8.20	Enregistrer la configuration de l'oscilloscope virtuel	191
8.21	Accélération du chargement des fichiers	192
8.22	Mémoire RAM et espace d'adressage	193
Chapitre 9 – Les directives de paramétrage des simulations		195
9.1	Définition d'une directive de simulation	195
9.1.1	<i>L'éditeur de directives de simulation</i>	195
9.1.2	<i>Syntaxe des directives de simulation</i>	196
9.1.3	<i>Première règle de syntaxe</i>	197
9.1.4	<i>Deuxième règle de syntaxe</i>	197
9.1.5	<i>Troisième règle de syntaxe</i>	199
9.1.6	<i>Il ne faut jamais oublier un paramètre obligatoire</i>	200
9.2	.options paramètres modifiant l'exécution d'une simulation	201
9.3	.ic fixer les conditions initiales pour une simulation temporelle	205
9.4	.savebias enregistrer un point de fonctionnement DC	206
9.5	.loadbias charger un point de fonctionnement DC	207
9.6	.net calcul des paramètres d'un réseau avec une simulation AC	207
9.7	.nodeset conditions initiales pour l'analyse DC	208
Chapitre 10 – Les six simulations principales		211
10.1	Présentation des six simulations principales	211
10.1.1	<i>Simulations DC (continues)</i>	211

10.1.2	<i>Simulations AC (fréquentielles)</i>	212
10.1.3	<i>Simulations de circuit non linéaire</i>	212
10.1.4	<i>Caractéristiques des simulations</i>	213
10.2	Critères de choix concernant les simulations	214
10.2.1	<i>Si la seule source d'excitation du circuit est une tension continue</i>	214
10.2.2	<i>La seule source d'excitation du circuit est une tension alternative de faible amplitude</i>	215
10.2.3	<i>La seule source d'excitation du circuit est une tension alternative de grande amplitude (ou toute autre action mettant en œuvre la non-linéarité des composants du circuit)</i>	215
10.3	.op – simulation d'un point de polarisation continu	216
10.4	.dc – simulation continue avec balayage (une à trois sources)	218
10.5	.tf – simulation de la fonction de transfert (gain, impédance d'entrée et de sortie)	219
10.6	.ac – simulation d'un signal AC autour d'un point de polarisation	220
10.7	.noise – simulation de bruit	221
10.8	.temp – simulation d'un balayage de température	223
10.9	.tran – simulation temporelle (non linéaire)	225
10.10	Paramétrages de la simulation temporelle .tran	227
10.10.1	<i>Attention à la valeur de Maximum Timestep</i>	228
10.10.2	<i>Paramètre uic (simulation temporelle)</i>	232
10.10.3	<i>Paramètre startup (simulation temporelle)</i>	232
10.10.4	<i>Paramètre steady (simulation temporelle)</i>	234
10.10.5	<i>Paramètre .nodiscard (simulation temporelle)</i>	235
10.10.6	<i>Paramètre .step (simulation temporelle)</i>	236
10.11	.four – éditer les harmoniques sous forme numérique	239
10.11.1	<i>Comment fonctionne l'analyse FFT</i>	240
10.11.2	<i>Conditions à remplir pour obtenir une analyse FFT représentative</i>	243
10.11.3	<i>Influence des paramètres Stop Time et Timestep sur la FFT</i>	253
10.12	Simulations statistiques Monte-Carlo	254
10.12.1	<i>Première étape</i>	256
10.12.2	<i>Deuxième étape</i>	256

10.12.3	<i>Troisième étape</i>	257
10.12.4	<i>Remarque concernant la méthode Monte-Carlo</i>	258
10.13	Paramétrage des simulations	258
Chapitre 11	Mesures numériques, téléchargement, enregistrement et modèles	261
11.1	Récupération des mesures sous forme numérique	261
11.1.1	<i>La récupération des fichiers de mesures sous forme numérique</i>	261
11.1.2	<i>Déclaration de variables</i>	261
11.2	<i>.meas</i> – afficher numériquement des valeurs de mesures	262
11.2.1	<i>Premier type de mesures : pour un seul point d'abscisse</i>	262
11.2.2	<i>Exemples d'utilisation de .meas pour un seul point d'abscisse</i>	266
11.2.3	<i>Deuxième type de mesure : pour un intervalle entre deux points de l'axe des abscisses</i>	267
11.2.4	<i>Exemples d'utilisation des paramètres rise, fall, last et cross</i>	269
11.2.5	<i>Cas d'une simulation NOISE</i>	276
11.2.6	<i>Création d'un script de mesure : Nom-de-fichier.meas</i>	276
11.2.7	<i>Précision des résultats fournis par la commande .meas</i>	281
11.3	<i>.param</i> – variables et paramètres	283
11.4	<i>.step</i> – intervalles paramétrables	285
11.5	<i>.func</i> – les fonctions utilisateurs	292
11.6	Rapport d'efficacité d'un convertisseur DC-DC : <i>steady</i>	292
11.7	<i>.ferret</i> – télécharger un fichier sur Internet	293
11.8	<i>.global</i> – déclaration générale	294
11.9	<i>.save</i> – limitation de la quantité de données sauvegardées	294
11.10	<i>.wave</i> – transformer le signal de sortie en <i>.wav</i>	295
11.11	Paramétrage de la valeur d'un composant avec la commande <i>.param</i>	296
11.12	<i>.model</i> – définir un modèle SPICE	297
11.13	<i>.subckt</i> – définir un sous-circuit	298
11.14	<i>.include</i> – inclure une nouvelle bibliothèque	299
11.15	<i>.lib</i> – bibliothèque de modèles ou de sous-circuits	300

Chapitre 12 – Importation de modèles de composants	303
12.1 LTspice IV a-t-il besoin de télécharger des modèles de composants ?	303
12.2 Macromodèles et modèles	303
12.3 Sous-circuits	304
12.4 Bibliothèques de modèles	304
12.5 Un modèle de composant est constitué de deux éléments	305
12.6 Symboles d'appel de composants	306
12.7 Téléchargements d'un modèle de composant	306
12.8 Trois extensions pour trois manières d'ajouter des composants	307
12.9 Un symbole peut appeler plusieurs éléments	307
12.10 Bibliothèques de modèles	307
12.10.1 <i>Comment le compilateur détecte-t-il l'utilisation d'un modèle plutôt que d'un autre ?</i>	309
12.10.2 <i>Chaque composant a plusieurs modèles possibles</i>	310
12.11 Modèles	310
12.12 Exemple : bibliothèques de sous-circuits 74htc.lib	310
12.13 Exemple : transistor bipolaire Darlington MJ11015	311
12.13.1 <i>Première étape, téléchargement</i>	312
12.13.2 <i>Deuxième étape, création automatique du symbole</i>	314
12.13.3 <i>Troisième étape, adaptation du symbole</i>	314
12.14 Exemple : un amplificateur opérationnel, le TL071	316
12.15 Comment créer un sous-circuit ?	320
12.16 Les étapes de la création d'un nouveau sous-circuit	321
12.17 Exemple illustré de création de sous-circuit	322
Chapitre 13 – Éditeur des sources de tension et de courant	329
13.1 Deux types de sources et deux éditeurs	329
13.2 Il existe deux grands types de sources, dépendantes ou indépendantes	330
13.3 Toute simulation nécessite la présence d'une source indépendante	331

13.4	Comment placer une source dans un schéma	332
13.4.1	Trois sources indépendantes	333
13.4.2	Neuf sources dépendantes, six linéaires et trois non linéaires	334
13.4.3	Deux sources dépendantes (obsolètes)	334
13.5	Sources indépendantes	335
13.6	V – source de tension indépendante (STNC)	335
13.6.1	Source de tension PULSE (pulsée)	336
13.6.2	Source de tension SINE (sinusoïdale)	336
13.6.3	Source de tension EXP (exponentielle)	336
13.6.4	Source de tension SFFM (modulée en fréquence)	337
13.6.5	Source arbitraire de tension modulée par une commande PWL	337
13.6.6	Source de courant modulée par un fichier .wav	337
13.7	I – source de courant indépendante (SCNC)	338
13.7.1	Source de courant PULSE (pulsée)	339
13.7.2	Source de courant SINE (sinusoïdale)	339
13.7.3	Source de courant EXP (exponentielle)	339
13.7.4	Source de courant SFFM (modulée en fréquence)	339
13.7.5	Sources de courant modulées	340
13.8	Load – charge active indépendante (SCCV)	341
13.9	L'éditeur de sources indépendantes	342
13.9.1	Paramétrage du balayage de la fréquence d'une source indépendante pour une simulation AC	344
13.9.2	Paramétrages des sources indépendantes pour une simulation continue DC (petites amplitudes)	345
13.9.3	Paramétrages des sources indépendantes pour une simulation alternative AC (petites amplitudes)	348
13.9.4	Paramétrages des sources indépendantes pour une simulation temporelle (grandes amplitudes)	352
13.10	Sources indépendantes	369
13.11	E – source de tension dépendante en tension (STCT)	369
13.11.1	Premier modèle : la fonction de transfert est une constante	370
13.11.2	Deuxième modèle : la fonction de transfert est une table de couples de valeurs	372

13.11.3	<i>Troisième modèle : la fonction de transfert est une transformée de Laplace en paramètre S</i>	373
13.12	F – source de courant commandée en courant (SCCC)	374
13.13	G – source de courant commandée en tension (SCCT)	378
13.13.1	<i>Premier modèle</i>	379
13.13.2	<i>Deuxième modèle</i>	379
13.13.3	<i>Troisième modèle</i>	379
13.14	H – source de tension commandée en courant (STCC)	380
13.15	B – source de tension arbitraire, non linéaire (STC)	380
13.16	B – sources de courant arbitraires, non linéaire (SCC)	385
13.17	E _{poly} – source de tension polynomiale, non linéaire (STP)	387
13.18	G _{poly} – source de courant polynomiale, non linéaire (SCP)	388
13.19	L'éditeur d'attributs pour les sources dépendantes	389
Chapitre 14	– Les composants passifs	391
14.1	Composants passifs	391
14.1.1	<i>Préambules à l'utilisation des paramètres d'un modèle de composant</i>	391
14.2	R – résistor (un modèle)	392
14.3	C – condensateur (deux modèles)	394
14.3.1	<i>Premier modèle de condensateur standard</i>	395
14.3.2	<i>Deuxième modèle de condensateur</i>	396
14.4	L – inducteur	397
14.4.1	<i>Premier modèle d'inducteur (linéaire sans saturation)</i>	397
14.4.2	<i>Deuxième modèle (non linéaire)</i>	399
14.4.3	<i>Troisième modèle : CHAN (non linéaire avec prise en compte de la saturation et de l'hystérésis)</i>	399
14.5	Le cycle d'hystérésis	401
14.6	Différences entre inducteurs avec et sans circuit magnétique	403
14.6.1	<i>Inducteur bobiné sans circuit magnétique</i>	403
14.6.2	<i>Inducteur bobiné avec circuit magnétique</i>	404
14.7	K – transformateurs (inductance mutuelle)	405

14.8	Inductances mutuelles à plusieurs enroulements	406
14.9	Autres manières de réaliser un transformateur avec la saturation et l'hystérésis	407
Chapitre 15 – Les composants semi-conducteurs		409
15.1	Les composants semi-conducteurs	409
15.2	D – diode (trois modèles)	410
15.2.1	<i>Premier modèle standard de diode</i>	<i>410</i>
15.2.2	<i>Deuxième modèle de diode</i>	<i>411</i>
15.2.3	<i>Paramètres de puissance, communs aux deux modèles</i>	<i>412</i>
15.3	Q – transistor bipolaire (trois modèles), modèles Ebers-Moll, Gummel-Poon et VBIC.....	413
15.3.1	<i>Premier (Ebers-Moll) et deuxième modèles (Gummel-Poon).....</i>	<i>414</i>
15.3.2	<i>Troisième modèle (VBIC).....</i>	<i>416</i>
15.4	J – transistor JFET (un modèle).....	422
15.5	M – MOSFET monolithique (plusieurs modèles).....	423
15.5.1	<i>Le MOSFET monolithique.....</i>	<i>424</i>
15.5.2	<i>Modèles de transistor MOSFET.....</i>	<i>425</i>
15.6	M – MOSFET à double diffusion verticale (un modèle)	428
15.7	Z – MESFET (un modèle).....	431
Chapitre 16 – Les composants annexes		433
16.1	Autres composants annexes	433
16.2	S – interrupteur commandé par une tension (deux modèles).....	434
16.2.1	<i>Premier modèle standard Level=1</i>	<i>436</i>
16.2.2	<i>Deuxième modèle complet Level=2.....</i>	<i>436</i>
16.3	W – interrupteur commandé par un courant (un modèle).....	437
16.4	O – ligne de transmission avec perte (un modèle).....	441
16.5	T – ligne de transmission sans perte (un modèle).....	442
16.6	U – ligne de transmission RC (un modèle).....	443
16.7	A – fonctions spéciales.....	444
16.7.1	<i>Les fonctions spéciales inv, buf, and, or, xor.....</i>	<i>445</i>

16.7.2	<i>Les fonctions spéciales schmitt, schmtbuf, schmtinv, diffschmitt, diffscmittinv et diffschmittbuf</i>	446
16.7.3	<i>Les fonctions spéciales dflop et srlflop</i>	447
16.7.4	<i>La fonction spéciale phidet</i>	448
16.7.5	<i>La fonction spéciale varistor</i>	448
16.7.6	<i>La fonction spéciale modulate</i>	448
16.7.7	<i>La fonction spéciale sample</i>	449
16.8	$\times$ – appel d'un sous-circuit	449
Chapitre 17 – Inductance saturable, cycle d'hystérésis, transformateur et inductance mutuelle		451
17.1	Intérêt d'utiliser un circuit magnétique	451
17.1.1	<i>Fonctionnement d'un circuit magnétique</i>	451
17.1.2	<i>Quelques définitions utiles</i>	452
17.2	Le cheminement sur le cycle d'hystérésis	453
17.2.1	<i>Courbe de première aimantation (en trait pointillé)</i>	453
17.2.2	<i>Parcours du cycle d'hystérésis (en trait plein)</i>	453
17.3	Mesures de l'inductance, du champ et de l'induction magnétique	454
17.3.1	<i>Le modèle CHAN (saturation et hystérésis)</i>	456
17.3.2	<i>Mesure de l'inductance</i>	458
17.3.3	<i>Mesure de la densité du flux d'induction magnétique</i>	459
17.4	Trois exemples de cycle d'hystérésis	461
17.5	Le cycle d'hystérésis avec un entrefer	463
17.6	Le cycle d'hystérésis avec plusieurs valeurs du champ H	464
17.7	Le cycle d'hystérésis avec une polarisation continue	464
17.8	Présentations de quatre modèles LTspice IV de transformateur	466
17.9	Deux premiers modèles de transformateur sans prise en compte de la saturation et de l'hystérésis	467
17.10	Quatre valeurs sont nécessaires pour les modèles 1 et 2	468
17.11	Deux valeurs importantes, le coefficient de couplage K et le rapport de transformation N	469
17.12	Deux schémas équivalents pour les modèles 1 et 2	470

17.13	Modèle de transformateur N°1, $K=1$ et selfs de fuite explicites	470
17.14	Modèle de transformateur N°2 : K différent de 1 et self de fuite implicite (calculé par LTspice IV)	471
17.15	Cas des transformateurs constitués de plusieurs enroulements	472
17.16	Détermination du transformateur en fonction des caractéristiques d'une SMPS	473
17.17	Notre choix de transformateur	475
17.18	Calculs des valeurs du modèle à partir des mesures ou des caractéristiques .	475
17.19	Modèles N° 1 et N° 2 du transformateur	476
17.20	Schéma de la SMPS avec le transformateur N° 1	477
17.21	Schéma de la SMPS avec le transformateur N° 2	480
17.22	Conclusions concernant les deux méthodes	480
17.23	Problèmes de la saturation du transformateur	483
17.24	Modèle N° 3 du transformateur (avec saturation et hystérésis)	487
17.25	Modèle N° 3 du transformateur réalisé avec un sous-circuit	487
17.26	Sous-circuits avec un seul secondaire	488
17.27	Sous-circuit de transformateur avec plusieurs secondaires	491
17.28	Intégration du sous-circuit (modèle N° 3 de transformateur) dans une SMPS	493
17.29	Mise au point d'un snubber (écrêteur de surtension)	496
17.30	Dépassement des caractéristiques d'un composant	500
17.31	Similitude entre résultats de simulation et mesures sur le prototype câblé..	503
17.32	Conclusions sur la similitude entre simulation et mesures réelles	506
Chapitre 18 – Panneau de contrôle et raccourcis clavier		507
18.1	Présentation du panneau de contrôle en neuf onglets	507
18.2	Onglet Compression (options liées à la compression des données)	508
18.3	Onglet Save Default (options liées à l'enregistrement)	509

18.4	Onglet SPICE (options de fonctionnement du noyau de simulation de LTspice IV)	511
18.4.1	<i>Précautions concernant les paramétrages SPICE</i>	512
18.4.2	<i>Paramètres du contrôle du calcul des simulations</i>	512
18.4.3	<i>Paramètres de contrôle de la méthode d'intégration</i>	513
18.4.4	<i>Paramètres de contrôle du solveur</i>	514
18.5	Onglet Drafting Options (options de dessin)	514
18.6	Onglet Netlist Options (options de syntaxe ou de rédaction de la Netlist) .	517
18.7	Onglet Waveforms (traceur de courbes ou oscilloscope virtuel)	520
18.8	Onglet Operation (configuration générale de LTspice IV)	522
18.9	Onglet Hacks (fonctionnement interne de LTspice IV)	525
18.9.1	<i>Précaution concernant les paramétrages Hacks !</i>	525
18.9.2	<i>Paramétrages de contrôle Hacks !</i>	526
18.10	Onglet Internet (connexion à Internet)	526
18.11	Programmation des raccourcis clavier	528
18.11.1	<i>Interactivité de l'éditeur de schéma</i>	529
18.11.2	<i>Raccourcis clavier de l'éditeur de schéma</i>	530
18.12	Paramétrage des couleurs (Color Preferences)	531
Chapitre 19	– Quelques exemples	533
19.1	Tracé du réseau de caractéristiques d'un composant semi-conducteur	533
19.1.1	<i>Caractéristiques d'un JFET canal N, le 2N3819</i>	533
19.1.2	<i>Caractéristiques d'un transistor bipolaire canal N, le 2N2222</i>	536
19.1.3	<i>Évolutions des caractéristiques avec la température</i>	536
19.1.4	<i>Caractéristiques d'une diode Zener en fonction de la température</i>	538
19.2	Un montage d'amplificateur	538
19.2.1	<i>Cahier des charges de l'amplificateur</i>	539
19.2.2	<i>Le montage de l'amplificateur</i>	540
19.2.3	<i>Vérification du dimensionnement des composants du montage</i>	542
19.2.4	<i>Le rendement</i>	544
19.3	La puissance moyenne	545
19.3.1	<i>Mesures de la distorsion harmonique</i>	546

19.3.2	Tracé de la courbe FFT	548
19.3.3	Mesures de la distorsion d'intermodulation	550
19.3.4	Réponses à un signal carré	552
19.3.5	Diagramme de Bode	554
19.3.6	Bruit généré par l'amplificateur	555
19.3.7	Fonction de transfert de cet amplificateur	556
19.4	Diagramme de Bode d'une boucle de régulation (application à une SMPS)	558
19.4.1	Inconvénients des méthodes classiques	558
19.4.2	Avantages de la nouvelle méthode	558
19.4.3	Diagramme de Bode du gain	560
19.4.4	Diagramme de Bode de l'impédance	562
19.5	Un wattmètre simple, application d'une source B	565
19.6	Analyse paramétrique d'un circuit RLC	566
19.7	Incorporation d'un BUS de câblage	569
19.8	Convertisseur DC-DC (SMPS)	572
19.8.1	Utilisation d'une self à air non saturable	575
19.8.2	Utilisations d'une self avec un circuit magnétique saturé	575
19.8.3	Utilisation d'une self avec un circuit magnétique non saturé	578
19.8.4	Le rapport d'efficacité du convertisseur DC-DC	579
19.9	Analyse en fonction de la dispersion des valeurs de composants par la méthode Monte-Carlo	580
Chapitre 20	Questions diverses	583
20.1	Quel est l'impact de l'ordinateur sur la vitesse de calcul d'une simulation avec LTspice IV ?	583
20.1.1	Trois exemples d'ordinateurs portables	584
20.1.2	Quatre exemples d'ordinateurs de bureau	584
20.2	Quelles sont les limites de LTspice IV ?	585
20.3	LTspice IV est-il une aide réelle ?	589
20.4	Comment récupérer la liste des composants d'un montage	590
20.5	Comment permuter facilement les pages de schémas ?	590

20.6	Comment copier/coller une partie de circuit entre deux pages de schémas ?	590
20.7	Quelles sont les erreurs les plus fréquentes lors de l'utilisation de LTspice IV ?	591
20.8	Quelles sont les astuces qui font gagner du temps ?	591
20.9	Dans quels cas le simulateur LTspice IV peut-il se bloquer ?	592
20.10	LTspice IV peut-il s'installer sur tous les ordinateurs ?	593
20.11	Quelles aides concrètes apportent LTspice IV pour la simulation de circuit électronique ?	593
20.12	Faut-il beaucoup de manipulations pour réaliser une simulation avec LTspice IV ?	594
20.13	Quelle aide LTspice IV apporte-t-il dans le domaine de la mesure ?	594
20.14	Pourquoi LTspice IV permet-il de tester davantage de solutions ?	594
20.15	Y a-t-il un risque d'addiction à l'utilisation de LTspice IV ?	595
20.16	LTspice IV est-il une aide réelle à l'apprentissage de l'électronique ?	596
20.17	Vous ne trouvez pas les menus indiqués ou leurs contenus sont différents de ceux attendus	597
20.18	Quels sont les drapeaux associés au lancement de LTspice IV ?	597
20.19	Quelles sont les actions permettant la réalisation d'une simulation ?	598
20.20	Les modèles de circuit SMPS de LTspice IV sont-ils compatibles avec les autres logiciels SPICE ?	598
20.21	Où trouver des informations fiables, des modèles et des exemples d'applications pour les utilisateurs de LTspice IV ?	600
20.22	Existe-t-il une version Linux de LTspice IV ?	600
Annexe		601
Valeurs de L_m et A pour l'utilisation du modèle CHAN		601
Valeurs de Bs, Br et Hc pour l'utilisation du modèle CHAN		602
Bibliographie		611
Index		613

AVANT-PROPOS

LTspice IV est un logiciel étonnant par sa puissance, sa rapidité de calcul et l'universalité de ses applications. C'est le logiciel qu'il faut utiliser pour produire une électronique performante en ce XXI^e siècle où exigence de qualité doit aller de pair avec rapidité de mise au point !

Savez-vous que les circuits intégrés (amplificateur opérationnel, etc.) n'auraient jamais pu avoir le développement que nous leur connaissons depuis 40 ans ni même voir le jour, si des simulateurs tels que LTspice IV n'avaient pas permis leur conception ? Tous les spécialistes considèrent comme essentiel leur contribution au développement de l'électronique telle que nous la connaissons aujourd'hui !

Depuis plus de 20 ans, LTspice IV est l'héritier direct de cette aventure scientifique et technique. Il est incontestablement le logiciel le plus rapide, le plus robuste et le plus complet des simulateurs électroniques SPICE. Malheureusement, l'aide électronique est la seule documentation disponible. Elle est incomplète et très en retard sur l'avancement du logiciel, beaucoup de commandes parfois essentielles sont à peine documentées, certaines n'y figurent même pas !

Il était préjudiciable que les utilisateurs, chaque jour plus nombreux (un million six cent mille à travers le monde, début 2011), ne disposent pas d'un ouvrage entièrement dédié à LTspice IV. Ce livre a été conçu pour répondre à ce manque, il est bien plus qu'un manuel puisqu'il est enrichi d'un grand nombre d'astuces, de méthodes et d'exemples illustrés de près de cinq cents schémas, synoptiques et copies d'écran. En quelques heures, il fera de vous un spécialiste de LTspice IV et en quelques jours un véritable expert !

LTspice IV a une puissance sans borne : le nombre de nœuds, de composants, de simulations, la résolution des graphiques, la taille des schémas n'ont aucune limite autre que celles de la puissance de votre ordinateur PC ou de sa mémoire ! Bien que LTspice IV soit ***le seul simulateur professionnel entièrement gratuit***, il est sans concession et n'est aucunement limité contrairement à ses concurrents.

Plusieurs niveaux de lecture de cet ouvrage sont possibles, du débutant jusqu'à l'ingénieur en charge de la conception de vastes ensembles.

L'utilisateur averti pourra commencer sa lecture au chapitre 4 alors que le débutant devra commencer par le chapitre 2 qui lui fera découvrir les nombreux fichiers fournis lors de l'installation de LTspice IV. L'utilisateur novice pourra ensuite s'attarder sur l'application développée au chapitre 3. Elle montre les grands principes

du fonctionnement de LTspice IV. Le premier chapitre, relatant la genèse de LTspice IV, pourra être lu dans un deuxième temps.

Les cinq éditeurs principaux de LTspice IV sont traités aux chapitres 4 à 8. C'est ici que commence la description du fonctionnement du logiciel. Ensuite, toutes les définitions et les commandes (appelées directives de simulation) sont détaillées et accompagnées d'exemples dans les chapitres 9 à 11. Le chapitre 12 traite du téléchargement des modèles et sous-circuits SPICE ainsi que de la génération des symboles permettant leur utilisation facile. Des chapitres 13 au 16 vous trouverez, la description des sources, les composants passifs, actifs et spéciaux ainsi que leurs paramètres. Le chapitre 17 traite plus particulièrement des selfs et transformateurs qui possèdent, dans LTspice IV, un modèle non linéaire aux applications étendues (prise en compte de la saturation et de l'hystérésis). Le chapitre 18 s'attarde sur le panneau de contrôle, véritable tableau de bord où sont rassemblés tous les paramètres de LTspice IV. Le chapitre 19 est un recueil d'exemples touchant à des domaines variés de l'électronique. Il est suivi du chapitre 20 qui répond aux questions les plus souvent posées au cours des sessions de formation LTspice IV dispensées par l'auteur.

Quel que soit votre domaine d'application de l'électronique, cet ouvrage vous permettra d'atteindre rapidement un niveau d'expertise dans le domaine de la simulation électronique. Il vous apportera une aide précieuse par le gain de temps très appréciable qu'il procure. Grâce à lui et à LTspice IV, vous bénéficiez d'une mise au point rapide et efficace de vos projets. Vous comprendrez comment avec LTspice IV vous pourrez réaliser des tests impossibles à faire avec un prototype sur table (excursions en température, fonctionnement aux limites, tests destructifs, analyse de Monte-Carlo, etc.). Vous avez des idées de circuits électroniques, avec cet ouvrage et LTspice IV vous aurez un *feedback* immédiat de leur validité !

Si LTspice IV ne remplace pas les connaissances nécessaires à la conception de circuits électroniques, il rend celles-ci nettement plus efficace et plus rapide grâce notamment, à une approche rigoureuse et une validation immédiate. Il apporte aux entreprises un gain de temps et d'argent indéniable et permet une amélioration substantielle des performances de vos montages. Les lycées techniques, IUT et écoles d'ingénieurs sont de plus en plus nombreux à proposer à leurs étudiants des sessions de formation à la simulation électronique avec LTspice IV.

Pour avoir une maîtrise complète de LTspice IV et être réellement efficace avec l'ensemble de ses commandes, il faut plusieurs jours de pratique. Une documentation complète et claire est également nécessaire, c'est l'apport de cet ouvrage. Ainsi, LTspice IV deviendra rapidement votre outil de conception le plus efficace et le plus précieux !

Afin de faciliter la lecture de cet ouvrage, nous avons appliqué les règles d'écriture suivantes :

- Lorsqu'il faut appuyer sur la touche gauche de la souris une seule fois, nous écrirons : *clik gauche*, de même pour *clik droit* ainsi que pour *double-clik gauche* et *double-clik droit* sans autre précision.
- Lorsqu'il faut maintenir l'appui sur la touche de la souris en déplaçant celle-ci, nous écrirons : *clik gauche + glissé* ou *clik droit + glissé*.
- Lorsqu'il faut appuyer en même temps (ou plus exactement avant et relâcher après l'action) sur une touche du clavier, nous écrirons par exemple : *Ctrl + clik gauche* ou *Alt + clik droit* ou encore *Maj + double-clik gauche*.
- La résistance est appelée dans cet ouvrage *résisteur* et le terme *résistance* est réservé à sa valeur exprimée en ohms. Par analogie, le condensateur a une capacitance exprimée en Farad (F) et l'inducteur une inductance en Henry (H).
- Les *simulations* AC, DC, temporel, etc. seront nommées indifféremment suivant les chapitres « analyses » ou « simulations » ; de plus, la *simulation temporelle* sera également nommée *.TRAN* (syntaxe dans une Netlist), *transient* (étiquette de l'onglet de cette simulation), *transitoire* ou *temporelle* qui sont les termes les plus fréquemment rencontrés dans la littérature technique.
- Bien que la méthode de Monte-Carlo ou le calcul de FFT ne soient pas, à proprement parler des *analyses* (au sens du traitement du noyau SPICE), nous utiliserons parfois cette dénomination.

Compléments en ligne

Vous trouverez sur <http://www.LTspice.fr>, <http://www.LTspiceIV.com> et <http://www.LTspice4.com> ainsi que sur www.dunod.com (sur la page consacrée à cet ouvrage), un certain nombre de compléments organisés comme indiqué ci-après.

Répertoire des fiches techniques

Ce répertoire contient les fiches techniques au format asc de tous les schémas présentés dans cet ouvrage ainsi que de nombreux autres. Cette rubrique s'enrichira à mesure des schémas ajoutés par les lecteurs et par l'auteur. Chaque fichier porte le nom correspondant au schéma dans l'ouvrage.

Répertoire bibliothèques et de modèles de composants SPICE

Vous trouverez dans ce répertoire un certain nombre de bibliothèques utilisées dans cet ouvrage. Cette rubrique s'enrichira à mesure des schémas ajoutés par les lecteurs et par l'auteur.

Répertoire sous-circuits

Vous trouverez dans ce répertoire un certain nombre de sous-circuits tels que les modèles de transformateurs ou les fichiers de calcul d'asservissement.

Répertoire divers

Vous trouverez dans ce répertoire un certain nombre de documents : la plupart des tableaux, illustrations difficilement lisibles dans l'ouvrage ainsi que les tableaux d'annexes.

■ Remerciements

Nous remercions les équipes de *Würth Elektronik* et *Linear Technology* pour leur enthousiasme et leur bienveillance ainsi que l'aide apportée, la fourniture de documentations et de produits.

Comme vous allez le découvrir, LTspice IV est un logiciel remarquable à plus d'un titre. Toutefois, comme tous les logiciels complexes, il est parfois d'une utilisation délicate. C'est pourquoi nous avons pris un grand soin lors de la sélection des méthodes présentées dans cet ouvrage.

Si malgré les nombreuses précautions prises, vous avez connaissance de méthodes plus efficaces que celles présentées, ou bien si vous avez, vous-même, mis au point des procédures intéressantes, n'hésitez pas à nous en faire part sur le site Internet de l'ouvrage ou bien directement sur le mail de l'auteur (brocard.gilles@gmail.com).

De même, si vous constatez une limite non documentée ou un dysfonctionnement même mineur, n'hésitez pas à nous le signaler.

Les sous-circuits, les informations complémentaires et les méthodes les plus judicieuses seront ajoutés au site Internet et seront intégrés dans la prochaine édition de cet ouvrage lui conférant un caractère plus collégial. De plus, les informations concernant d'éventuels dysfonctionnements seront transmises directement aux concepteurs du logiciel (équipe de Linear Technology dirigée par Mike Engelhardt) en vue de leurs corrections.

1 • PRÉSENTATION DE LTSPICE IV ET HISTORIQUE

1.1 Réalisation d'une simulation avec LTspice IV

1.1.1 Trois étapes élémentaires

Avec LTspice IV, la simulation d'un circuit est une procédure simple. Elle se décompose en trois étapes élémentaires (figure 1.1) :

- **Première étape : saisie du schéma et choix de la simulation.** Avec l'*éditeur graphique de schémas*, vous saisissez votre circuit et vous ajoutez vos commentaires. Le nombre de composants fournis avec LTspice est très important. Néanmoins, s'il vous manque un ou plusieurs modèles de composants, vous pouvez très simplement les télécharger sur Internet (voir à ce sujet le chapitre 12). En fonction de vos besoins (analyse continue, alternative ou temporelle), choisissez une simulation et ajoutez la source correspondante (voir à ce sujet les chapitres 9 à 11, et 13). Ajoutez éventuellement des commandes supplémentaires (directives de simulation) et paramétrez l'ensemble de ces éléments, valeurs des composants, etc.
- **Deuxième étape : lancement de la simulation.** Vous demandez à l'ordinateur d'effectuer l'ensemble des calculs nécessaire à la résolution de la simulation choisie, c'est **le lancement de la simulation**. Cette étape demande un certain délai pour effectuer tous les calculs.
- **Troisième étape : effectuer les mesures.** Vous choisissez les mesures (courant, tension, fréquence, puissance, etc.) permettant d'effectuer les mesures de votre choix. Les mesures sont instantanément affichées dans un écran graphique ressemblant à un oscilloscope numérique de grande performance. Vous pouvez d'ailleurs régler les paramètres d'affichages de la même manière que sur un oscilloscope (recadrage, changement d'échelle, zoom, choix des couleurs, morcellement de l'écran et multiplication des traces).

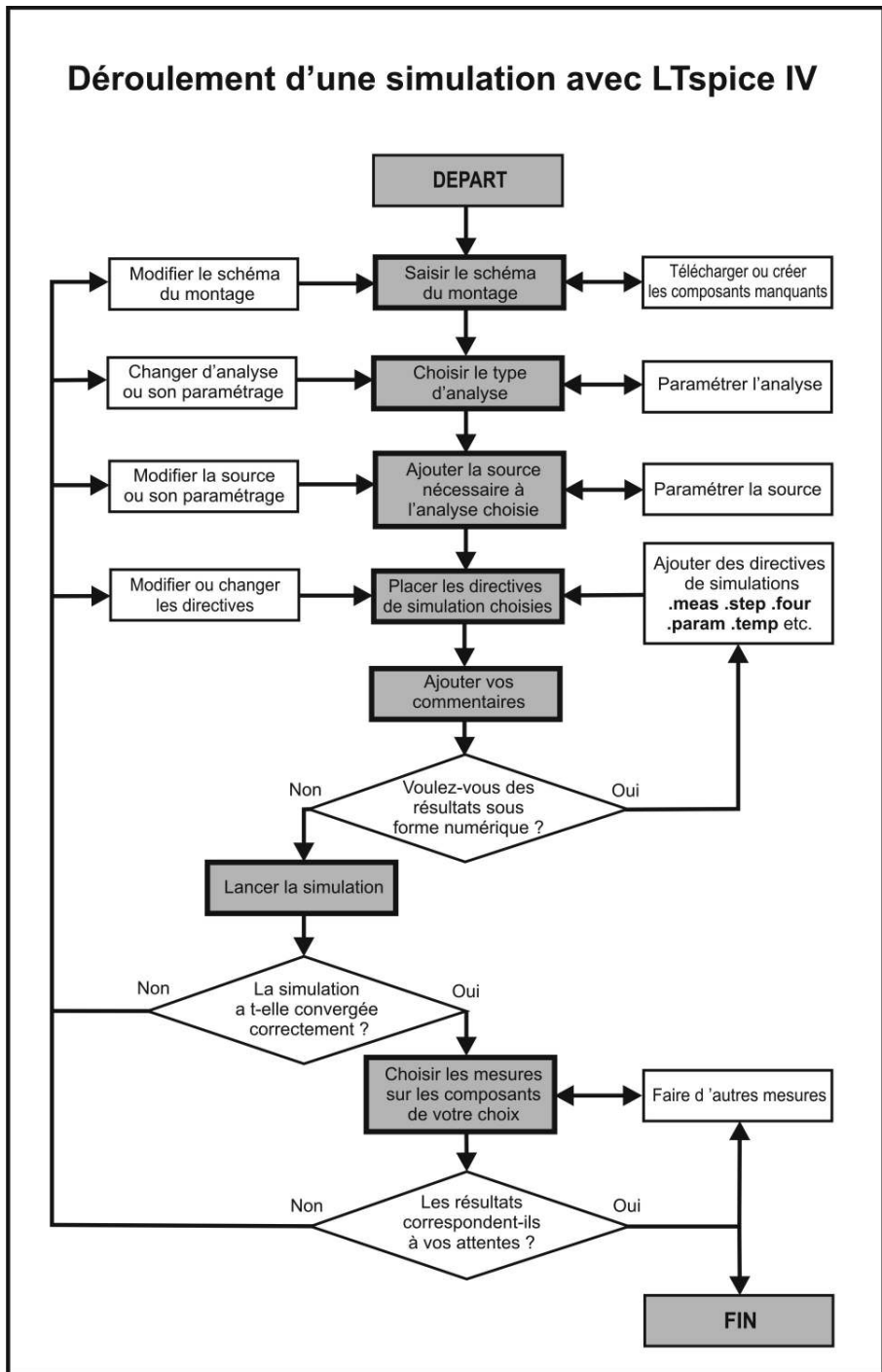


Figure 1.1

1.1.2 Analyse des résultats

En fonction des résultats, vous pouvez modifier le montage, changer les paramètres de la source ou de la simulation ou choisir d'autre méthode de mesures. Pour voir le résultat de vos modifications, ***vous devez impérativement relancer le simulateur avant d'effectuer de nouvelles mesures.***

Cette procédure est similaire à celle de la mise au point d'un prototype sur table, avec néanmoins des différences qui rendent la simulation très attractive, dans le cas d'un montage sur table, la procédure est plus coûteuse et demande davantage de temps :

- Pour les composants non disponibles en magasin, vous devez lancer une procédure d'approvisionnement, chercher un distributeur, obtenir un prix puis passer commande, etc.
- Pour modifier le câblage, il faut dessouder, puis modifier le circuit imprimé, éventuellement le refaire si la modification est importante, re-souder, changer la valeur de certains composants. Vous êtes bloqué au premier composant manquant dont aucun substitutif n'est en magasin.
- Pour les mesures, il est indispensable que tous les appareils de mesures soient disponibles et étalonnés. Certains sont fort coûteux (étuve, nanovoltmètre, pico-ampèremètre) pour une utilisation parfois très ponctuelle.

Par contre, ***le test du prototype sur table reste indispensable*** pour valider définitivement le montage simulé. En général, ce test est nettement plus rapide et plus réduit si la simulation a été faite avec rigueur.

1.2 Petite histoire de LTspice IV

Bien que la connaissance des phases de l'élaboration de LTspice IV ne soit pas indispensable à son utilisation, cette saga est suffisamment originale pour que l'on s'y arrête quelques instants. D'autant plus, que cette connaissance vous permettra de comprendre certains aspects de LTspice IV, comme l'existence des ***Netlists*** communes à tous les logiciels exploitant le ***noyau SPICE***.

LTspice IV, apporte de nombreuses améliorations et corrections du noyau SPICE 3F4/5, néanmoins il dépend étroitement de ses performances. Le cheminement qui a permis à LTspice IV d'être le logiciel puissant que nous connaissons aujourd'hui est plein de rebondissements.

1.2.1 CANCER – 1969 à 1971

À la toute fin des années soixante, deux professeurs Ronald Rohrer et Donald Peder-son ainsi que Laurence Nagel, élaborèrent, dans les laboratoires de l'Université de Berkeley en Californie, la première version d'un programme de simulation de circuit électronique à laquelle ils donnèrent, assez maladroitement, le nom de ***CANCER***

(*Computer Analysis of Nonlinear Circuits Excluding Radiation*). Cette première version effectue la simulation pour une excitation continue (DC), alternative (AC) de signaux de forme simple. En plus des composants passifs RLC, le logiciel sait traiter les diodes (équations de Shockley) et les transistors bipolaires (équations d'Ebers-Moll.).

Cette première ébauche est d'une utilisation peu aisée et réservée à de rares initiés bien qu'elle fût, dès ses origines, proposée en *friendly users*. Programmée en *Fortran*, elle exige la saisie du montage électronique étudié sous forme de grand fichier texte dont la syntaxe rigoureuse est très contraignante (c'est la Netlist descriptive du circuit qui existe encore de nos jours). Pour la sortie, le logiciel fournit les résultats de la simulation sous forme d'interminables tableaux de chiffres d'une interprétation peu aisée. Il faut rappeler qu'à cette époque le seul périphérique d'entrée est le clavier et les seuls organes de sortie, l'écran alphanumérique rémanent de couleur vert et l'imprimante à aiguilles. Une entrée ou une sortie ne pouvait être autre chose qu'un caractère ASCII.

Cette version fonctionne bien malgré de nombreuses limitations. Elle permet la simulation de nombreux circuits même si les utilisateurs devaient en permanence tenir compte des nombreuses limitations du logiciel. Sans ces premières versions, la micro-électronique analogique puis numérique n'aurait certainement pas pu avoir le développement que nous lui avons connu.

À cette époque, la demande est forte et d'autres programmes de simulation voient le jour tels que ECAP d'IBM et Autonetics de TRAC sans atteindre la renommée de CANCER.

1.2.2 SPICE1 – 1972 à 1974

Devenu projet de maîtrise de Laurence Nagel, CANCER est constamment enrichi. L'incorporation des tout premiers amplificateurs opérationnels et l'amélioration de la robustesse de ses algorithmes furent les premiers progrès suivis de l'ajout des équations *Gummel-Poon* pour la simulation des modèles de transistors bipolaires. Le logiciel est rebaptisé SPICE version 1 (*Simulation Program with IC Emphasis*). La présentation officielle à la presse américaine eut lieu en 1973, ce fut le professeur Donald Pedersen qui s'en chargea. CANCER, dorénavant rebaptisé SPICE, devint rapidement un outil de simulation pour toute l'industrie des circuits intégrés en pleine expansion.

1.2.3 SPICE2 – 1975 à 1983

De 1975 à 1983, sous l'impulsion de Laurence Nagel et d'Ellis Cohen, SPICE deviendra *SPICE2*, puis *SPICE2B* et enfin *SPICE 2G.6* en 1983.

Des améliorations très significatives ont été apportées principalement avec l'analyse nodale (MNA) plus stable et robuste que la version précédente. Elle prend désormais

en charge les sources de tension et les inductances. La mémoire est allouée dynamiquement pour accueillir des circuits de grandes tailles et de complexités croissantes. Les modèles de transistors MOSFET et bipolaires sont remaniés et élargis. Enfin, le réglage de l'intervalle de temps entre deux incréments temporels est ajouté (c'est le *time-step* de LTspice IV). La version SPICE2G.6 présentée en 1983 sera la dernière version programmée en Fortran.

Certains simulateurs sont encore basés sur cette ancienne version SPICE2G.6 avec quelques améliorations.

1.2.4 SPICE3 – 1984 à 1990

À partir de 1985, **SPICE2G.6** est entièrement réécrit en langage C et prend le nom de SPICE3. La bonne portabilité de ce langage permet de proposer **SPICE3** sur les nouveaux ordinateurs PC qui ne pouvaient l'exploiter jusqu'à présent.

Une interface graphique est développée pour l'affichage des résultats ce qui en facilite grandement l'utilisation. **SPICE3** comprend maintenant un modèle plus complet de représentation des condensateurs et des inducteurs. Apparaissent également les sources contrôlées. L'amélioration constante des algorithmes réduit les problèmes de convergence qui deviennent exceptionnels.

De nombreux ajouts viennent compléter cette nouvelle version : un modèle de MESFET, des lignes de transmission avec et sans pertes, un commutateur non idéal, des améliorations concernant le modèle de semi-conducteurs avec la prise en compte des nouveaux transistors, triac, etc.

Cette version de SPICE3 n'est plus entièrement compatible avec l'ancienne version SPICE2G.6. Cette différence fait que tous les modèles de composants SPICE ne sont pas toujours compatibles entre eux, vous trouverez chez certains fabricants de composants des modèles SPICE2 et SPICE3.

Dans cette période, de nombreuses versions commerciales voient le jour notamment HSPICE, IS_SPICE et MICROCAP. MicroSim commence la commercialisation de PSPICE, c'est la première version pour PC de SPICE. Cette nouvelle version de SPICE contribue beaucoup à démocratiser son utilisation dans l'industrie, les PME et les universités. Plusieurs entreprises intègrent le simulateur SPICE à leurs logiciels de saisie de schéma pour le routage de circuit imprimé. Ce que l'on appellerait aujourd'hui « des suites graphiques de saisie/simulation/routage de circuit électronique » apparaissent sur le marché.

1.2.5 Naissance de LTspice - 1990-2007

Les droits de SPICE tombent dans le domaine public faisant de SPICE le premier simulateur de circuit totalement libre et ouvert. Plusieurs éditeurs le dotent d'une saisie graphique très rudimentaire. Cela leur permet une exploitation commerciale sur PC ou station de travail.

Comme de nombreuses sociétés, *Linear Technology* développe une version de SPICE basé sur le noyau SPICE3 (programmé en C) à laquelle elle donne le nom de *DOS SwitcherCAD* et l'utilise dans un premier temps, pour ces besoins internes. *Mike Engelhardt* adapte cette version en simplifiant son utilisation et en lui adjoignant une interface de saisie de schéma réellement conviviale ainsi qu'une sortie graphique performante. Linear Technology propose cette nouvelle version à ses clients à partir de 1996, c'est *Power SwitcherCAD*. Le but est de les aider à concevoir des alimentations à découpage pour lesquelles elle propose toute une gamme de circuits intégrés dédiés (*SMPS*).

La disponibilité d'ordinateurs PC toujours plus performants, aussi bien dans l'industrie que dans les universités, aide à la diffusion de ce logiciel gourmand en ressource machine. La dernière version sera *Power SwitcherCAD III* proposée jusqu'en 2008.

1.2.6 Version LTspice IV depuis fin 2008

Au deuxième semestre 2008, la version 4 du logiciel développée par Linear Technology, est distribuée librement sur Internet, elle porte le nom commercial de *LTspice IV*. Les améliorations sont multiples, la rapidité et la robustesse sont nettement améliorées.

Depuis 1990, Linear Technology est devenu un fabricant américain important, spécialisé dans la fabrication et la distribution de circuits intégrés analogiques partout dans le monde. Il a développé une gamme très complète de circuits intégrés généralistes et spécialisés permettant de réaliser tous les types de SMPS. Dans le domaine technique complexe et délicat de la conception de convertisseur DC DC, Linear Technology apporte sa contribution en fournissant des produits très originaux et performants auxquels il ajoute son puissant outil de conception qu'est devenu LTspice IV.

Saluons cette démarche qui a amené Linear Technology à développer un logiciel totalement gratuit ayant atteint un niveau d'excellence. Aujourd'hui LTspice IV est à la toute première place des simulateurs analogiques. La version actuelle est particulièrement performante, rapide et stable. C'est actuellement un outil qui permet la simulation de pratiquement tout type de composants. La disponibilité de nombreuses bases de données de modèles de composants ainsi que la gratuité totale ont favorisé sa diffusion à grande échelle. C'est assurément, de nos jours, le logiciel de simulation de circuit électronique le plus utilisé au monde.

LTspice IV est totalement compatible avec les modèles SPICE3 et à un moindre degré avec les modèles SPICE2.

LTspice IV peut être facilement installé sur toutes les versions de Windows. Il est entièrement gratuit, totalement ouvert et capable d'utiliser plusieurs dizaines de milliers de « modèles de composants SPICE » de toute marque. Ces modèles sont téléchargeables gratuitement sur Internet, car SPICE, étant le plus universel des