

LTspice

Nouvelles commandes, applications inédites,
création et importation de modèles
et de sous-circuits

Gilles Brocard

Ingénieur et formateur en électronique

DUNOD

Tout le catalogue sur
www.dunod.com



ÉDITEUR DE SAVOIRS

Cet ouvrage sera traduit et publié en anglais et en allemand en 2016

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

Illustration de couverture : Gilles Brocard
Source : © kuzma65 – fotolia.com

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, 2016
5 rue Laromiguière, 75005 Paris
www.dunod.com
ISBN 978-2-10-074648-4

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2^o et 3^o 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.

Table des matières

Avant-propos	XVII
1 • Les nouveautés de LTspice	1
1.1 La puissance des ordinateurs PC.....	1
1.1.1 <i>La première raison est une suite d'heureux événements.....</i>	1
1.1.2 <i>La deuxième raison est une longue suite d'améliorations technologiques</i>	1
1.2 Le répertoire Educational s'enrichit de trois exemples	2
1.2.1 <i>UHFpreamp.asc</i>	2
1.2.2 <i>Linkwitz.asc</i>	3
1.2.3 <i>SOAtherm-Tutorial.asc</i>	5
1.2.4 <i>De nombreuses améliorations.....</i>	5
1.3 Améliorations apportées à LTspice depuis 2001.....	6
1.4 Liste des principales améliorations apportées à LTspice.....	6
1.5 LTspice et la vitesse d'exécution d'une simulation	8
1.6 Le tableau des 104 symboles de composants	11
1.7 Utilisations des symboles	17
2 • Le blog LTspice	19
2.1 Un blog accessible sur le site LTC	19
2.2 Autres sources de documentation proposées.....	20
2.3 Les articles du blog LTspice	20
2.4 Présentation des articles du blog LTspice, année 2015	22
2.4.1 <i>Rapide aperçu du logiciel LTspice.....</i>	22
2.4.2 <i>L'éditeur de schémas</i>	22

2.4.3	<i>L'oscilloscope de LTspice</i>	23
2.4.4	<i>Utilisation des transformateurs</i>	23
2.4.5	<i>Ajouter un nouveau composant à LTspice</i>	23
2.4.6	<i>Les paramètres de la commande .STEP</i>	36
2.4.7	<i>La commande .MEAS</i>	36
2.4.8	<i>Limites de LTspice pour les hyperfréquences</i>	37
2.4.9	<i>Les raccourcis clavier</i>	37
2.4.10	<i>Les raccourcis clavier non documentés</i>	37
2.4.11	<i>La simulation du bruit .noise</i>	38
2.4.12	<i>Générateur de signaux arbitraires avec la fonction PWL</i>	42
2.4.13	<i>Importation et exportation des données</i>	43
2.4.14	<i>Changer le paramétrage des axes des traces de l'oscilloscope</i>	46
2.4.15	<i>Annotation du schéma et des traces de mesures</i>	48
2.4.16	<i>En quoi LTpowerCAD est-il différent de LTspice ?</i>	50
2.4.17	<i>Utilisation de la commande .STEP</i>	53
2.4.18	<i>Affichage de la valeur moyenne et efficace (RMS)</i>	54
2.4.19	<i>Étude de la stabilité des amplificateurs opérationnels en boucle ouverte</i>	54
2.4.20	<i>Intégration du bruit au-dessus d'une largeur de bande</i>	62
2.4.21	<i>La simulation AC</i>	63
2.4.22	<i>Mesure du gain et de la marge de phase d'une SMPS</i>	64
2.4.23	<i>Comment interfacier les convertisseurs ADC SAR rapides</i>	64
2.4.24	<i>Les étapes pour importer un nouveau modèle</i>	65
2.4.25	<i>SMPS, marge de phase évaluée par la courbe de Bode</i>	65
2.4.26	<i>Comment simuler un transformateur simplement</i>	66
2.4.27	<i>Modélisation du comportement thermique des MOSFET</i>	67
2.4.28	<i>Utilisation du générateur automatique de symbole</i>	76
2.4.29	<i>Utiliser le nouveau modèle SOAtherm-NMOS</i>	79
2.4.30	<i>Utiliser les commandes Copy et Paste avec l'éditeur de schéma</i> ...	80
2.4.31	<i>Relier rapidement les composants avec l'éditeur de schéma</i>	80
2.4.32	<i>Importance du rapport gain/phase dans les systèmes régulés</i>	81
2.4.33	<i>Avec SOAtherm, équilibrage des MOSFET en parallèle</i>	81
2.4.34	<i>Paramétrage d'un interrupteur commandé en tension</i>	86
2.4.35	<i>Différence entre simulation et réalité</i>	90
2.4.36	<i>Comment améliorer la vitesse d'exécution de LTspice</i>	90
2.4.37	<i>SMPS, comment concilier faible Ron et sécurité SOA</i>	97

3 • Modèle et sous-circuit	101
3.1 Deux méthodes pour modéliser un composant	101
3.2 Comment procéder sans le composant ?	101
3.3 Les modèles	102
3.3.1 <i>Si le modèle est disponible dans les bases de LTspice</i>	103
3.3.2 <i>Créer un modèle par modification d'un modèle existant</i>	105
3.3.3 <i>Quelques précisions sur le modèle</i>	106
3.3.4 <i>Premier exemple</i>	108
3.3.5 <i>Deuxième exemple</i>	109
3.3.6 <i>Troisième exemple</i>	111
3.3.7 <i>Quatrième exemple</i>	112
3.4 Les sous-circuits	112
3.4.1 <i>Premier exemple: sous-circuit d'une Zener programmable TL431</i> ..	113
3.4.2 <i>Deuxième exemple: création d'un sous-circuit paramétrable</i>	121
3.5 Utilisation des modèles et des sous-circuits	127
3.5.1 <i>Commande .LIB et .INC</i>	127
3.5.2 <i>Premier exemple: TowTom2</i>	128
3.5.3 <i>Deuxième exemple: opamp</i>	128
3.5.4 <i>Troisième exemple: téléchargement depuis Internet</i>	129
3.6 Les bibliothèques de sous-circuits	129
3.6.1 <i>Comment est organisée une bibliothèque de sous-circuits ?</i>	130
3.6.2 <i>Code de couleur des Netlist</i>	133
3.6.3 <i>Comment indiquer à LTspice d'utiliser une bibliothèque dans sa totalité ?</i>	133
3.6.4 <i>Comment paramétrer les symboles appelant une bibliothèque ?</i> ...	134
4 • Exemple de modélisation: l'amplificateur opérationnel universel	137
4.1 Le modèle UniversalOpamp2	137
4.1.1 <i>Liste des paramètres du sous-circuit UniversalOpamp2</i>	139
4.1.2 <i>Sous-circuit Level.1</i>	140
4.1.3 <i>Sous-circuit Level.2</i>	141
4.1.4 <i>Sous-circuit Level.3a</i>	143
4.1.5 <i>Sous-circuit Level.3b</i>	144
4.1.6 <i>Un seul symbole, quatre modèles</i>	145
4.2 Téléchargement du modèle d'un amplificateur opérationnel TL071	147
4.2.1 <i>Procédure utilisant: UniversalOpamp2 level.3b</i>	151

5 • Importation et incorporation de modèles Spice avec internet.....	157
5.1 Les composants modélisés compatibles SPICE.....	157
5.1.1 Les composants modélisés compatibles LTspice	158
5.1.2 Composition d'un modèle	158
5.2 Les différents sites Internet	159
5.3 Le site NXP.....	159
5.4 Le site de téléchargement de l'IUT de Cachan	166
5.5 Le site de téléchargement de Texas Instruments.....	169
5.6 Les sites de téléchargement.....	171
5.6.1 Des sites proposant des modèles, des schémas et des applications	171
5.6.2 Le site LTwiki.org	172
5.6.3 Le site Yahoo groups: LTspice.....	177
5.6.4 Liste des sites de fabricants proposant des modèles SPICE	178
5.7 Quelles différences entre modèle et sous-circuit ?.....	179
5.7.1 Le modèle	179
5.7.2 Le sous-circuit	183
5.8 Comment fabriquer un modèle ou un sous-circuit ?.....	184
5.8.1 Réflexion sur la fabrication d'un modèle.....	184
5.8.2 Réflexion sur la fabrication d'un sous-circuit	185
5.9 Comment ajouter un modèle à LTspice ?	186
5.9.1 Première méthode: ajouter un modèle à une bibliothèque existante.	186
5.9.2 Deuxième méthode: ajouter un modèle à un répertoire du disque dur	189
5.9.3 Troisième méthode: ajouter un modèle directement sur le schéma	190
5.9.4 Quelques consignes concernant les trois méthodes	191
5.10 Comment ajouter un sous-circuit ?	192
5.10.1 Première méthode: ajouter un symbole dans le répertoire symboles	192
5.10.2 Deuxième méthode: détourner un symbole du schéma	195
5.10.3 Troisième méthode: mettre les nouveaux composants sur le schéma	196
5.10.4 Création automatique du symbole à partir de la Netlist.....	201
5.10.5 Création automatique du symbole à partir du schéma du sous-circuit	201
5.10.6 Création du symbole par modification des attributs d'un symbole existant	203
5.11 Création d'un sous-circuit étape par étape	206
5.11.1 Création d'un sous-circuit utilisant le générateur automatique en 14 étapes simples	206
5.11.2 Création d'un sous-circuit utilisant le symbole SRC réaffecté en 16 étapes simples	207

6 • Les composants passifs et actifs	209
6.1 Les composants passifs	209
6.2 Le modèle générique de la résistance R	209
6.3 Le modèle générique du condensateur C	211
6.3.1 <i>Le sous-modèle générique standard de condensateur</i>	212
6.3.2 <i>Deuxième sous-modèle générique de condensateur</i>	213
6.4 Le modèle générique de l'inducteur L	214
6.5 Les composants actifs	214
6.6 Le modèle générique de la diode D	214
6.6.1 <i>Le premier sous-modèle générique standard et linéaire de diode D</i>	215
6.6.2 <i>Le deuxième sous-modèle générique non linéaire de diode D</i>	216
6.6.3 <i>Le troisième sous-modèle générique Berkeley de diode D (non linéaire)</i>	216
6.7 Le modèle générique du transistor bipolaire Q	218
6.7.1 <i>Les sous-modèles génériques Ebers-Moll et Gummel-Poon</i>	219
6.7.2 <i>Le sous-modèle générique VBIC</i>	221
6.8 Le modèle générique du transistor JFET J	225
6.9 Le modèle générique du transistor MOSFET M	227
6.10 Le modèle générique du transistor MOSFET à double diffusion verticale	230
6.11 Le modèle générique du transistor MESFET Z	233
6.12 Le modèle générique du transistor IGBT	235
6.13 Les modèles de transistor unijonction, phototransistor, thyristor et TRIAC	235
7 • Les selfs, les transformateurs et les inductions mutuelles	237
7.1 Le modèle générique de l'inducteur L (sans saturation)	237
7.2 Self et inducteur à air sans circuit magnétique saturable	237
7.2.1 <i>Self et inducteur bobiné sans circuit magnétique</i>	237
7.2.2 <i>Self et inducteur avec circuit magnétique saturable</i>	238
7.3 Le sous-modèle générique d'inducteur L	240
7.4 Le modèle CHAN d'inducteur L	242
7.4.1 <i>Modèle avec saturation et hystérésis</i>	242
7.4.2 <i>Premier groupe de paramètres</i>	243
7.4.3 <i>Deuxième groupe de paramètres</i>	244
7.4.4 <i>Troisième groupe de paramètres</i>	245

7.5	Le modèle de transformateur.....	247
7.5.1	Comment réaliser un transformateur avec le modèle standard?...	248
7.5.2	Réalisation du transformateur: première méthode	249
7.5.3	Réalisation du transformateur: deuxième méthode.....	250
7.5.4	Conclusion sur les deux méthodes de création de transformateur .	251
7.5.5	Réalisation d'un transformateur avec plusieurs secondaires	252
7.5.6	Plusieurs modes de fonctionnement pour un transformateur?	253
7.6	Transformateur avec saturation et hystérésis du matériau magnétique.....	254
8	• Les commandes .FUNC et .MEAS	257
8.1	Commandes pour automatiser: .FUNC, .MEAS	257
8.2	La bibliothèque de fonctions mathématiques et de tests conditionnels	258
8.3	La bibliothèque des opérateurs LTspice	260
8.4	La commande .FUNC	260
8.4.1	Premier exemple	261
8.4.2	Avantages apportés par l'utilisation de commandes .FUNC	262
8.4.3	Deuxième exemple	263
8.5	La commande .MEAS.....	264
8.5.1	Première utilisation: calcul avec des variables hors courbe	265
8.5.2	Deuxième utilisation: calcul avec une seule valeur de la courbe ...	265
8.5.3	Troisième utilisation: calcul avec l'ensemble des valeurs de la courbe	267
8.5.4	Sept exemples d'utilisations de la commande .MEAS.....	270
9	• Les commandes accolades, .PARAM, .STEP et les fonctions PARAM et AKO:	277
9.1	Définition des commandes et des fonctions traitées dans ce chapitre.....	277
9.2	Les accolades	277
9.3	La commande .PARAM et la fonction PARAM	280
9.4	La commande .STEP	282
9.4.1	Exemple 1	284
9.4.2	Exemple 2.....	285
9.4.3	Exemple 3.....	287
9.4.4	Exemple 4.....	288
9.5	Questions fréquentes concernant la commande .STEP.....	290
9.5.1	Peut-on automatiser le calcul d'une simulation?	290
9.5.2	Comment réaliser une simulation avec la température?.....	290
9.5.3	Comment paramétrer une simulation avec la valeur d'un composant?	292

9.5.4	<i>Comment faire une simulation paramétrique avec une source ? ...</i>	292
9.5.5	<i>Comment faire une simulation paramétrique à trois niveaux ?.....</i>	293
9.5.6	<i>La commande Select Step du menu contextuel.....</i>	295
9.5.7	<i>Comment connaître les valeurs correspondant à une courbe ?</i>	297
9.5.8	<i>Comment changer l'ordre de plusieurs boucles .STEP imbriquées ?</i>	299
9.5.9	<i>La limite au nombre d'incréments d'une boucle .STEP.....</i>	300
9.5.10	<i>Les différentes manières d'incrémenter une boucle .STEP</i>	300
9.5.11	<i>Boucle définie par décade avec répartition logarithmique</i>	301
9.5.12	<i>Boucle définie par octave avec répartition logarithmique.....</i>	301
9.5.13	<i>Boucle avec une répartition linéaire des intervalles</i>	301
9.5.14	<i>Boucle avec une liste de valeurs d'incréments.....</i>	302
9.5.15	<i>Comment avoir en abscisse les unités de variation d'une boucle .STEP ?.....</i>	302
9.5.16	<i>Comment incrémenter autre chose que des valeurs numériques ? .</i>	302
9.5.17	<i>Informations complémentaires concernant la commande .STEP ...</i>	303
9.5.18	<i>Limite du nombre maximum pour une boucle .STEP unique.....</i>	304
9.6	<i>La fonction AKO:.....</i>	305
9.6.1	<i>Commande AKO: (changeur de genre).....</i>	305
9.6.2	<i>Premier exemple : changer un paramètre d'un modèle</i>	306
9.6.3	<i>Deuxième exemple: changer plusieurs paramètres d'un modèle ...</i>	307
9.6.4	<i>Troisième exemple: avec 3 boucles .step, faire varier 7 paramètres</i>	309
9.6.5	<i>Quatrième exemple, changer le modèle de composant</i>	309
10 •	Les commandes .FOUR, .WAVE, .MODEL, .SUBCKT, .INC, .LIB, .IC, .SAVE et .OPTIONS	313
10.1	<i>Commande .FOUR.....</i>	313
10.2	<i>Commande .WAVE.....</i>	314
10.3	<i>Commande .MODEL</i>	315
10.4	<i>Commande .SUBCKT</i>	317
10.5	<i>Commandes .INCLUDE et .LIB</i>	317
10.6	<i>Commande .IC</i>	318
10.7	<i>Commande .SAVE.....</i>	319
10.8	<i>Commande .OPTIONS</i>	321
10.8.1	<i>Paramètres de contrôle du diagramme de l'œil (transmission).....</i>	322
10.8.2	<i>Paramètres de contrôle de la simulation temporelle (non linéaire)</i>	323
10.8.3	<i>Paramètres de contrôle de la commande .meas</i>	323

10.8.4	<i>Paramètres de contrôle et d'aide à la convergence.....</i>	324
10.8.5	<i>Paramètres de contrôle de la méthode Newton-Raphson</i>	324
10.8.6	<i>Paramètres de contrôle de la sauvegarde et de la compression....</i>	325
10.8.7	<i>Paramètres de contrôle des composants</i>	325
10.8.8	<i>Paramètres de contrôle des simulations continues DC.....</i>	326
10.8.9	<i>Paramètres de contrôle général</i>	326
10.8.10	<i>Les neuf onglets du panneau de contrôle</i>	327
10.8.11	<i>Onglet Compression</i>	327
10.8.12	<i>Onglet Save</i>	329
10.8.13	<i>Onglet SPICE</i>	330
10.8.14	<i>Onglet Drafting</i>	333
10.8.15	<i>Onglet Netlist</i>	336
10.8.16	<i>Onglet Waveform.....</i>	337
10.8.17	<i>Onglet Operation.....</i>	339
10.8.18	<i>Onglet Hacks</i>	341
10.8.19	<i>Onglet Internet</i>	342
10.8.20	<i>Raccourcis clavier</i>	343
10.8.21	<i>Onglet Choix de couleur: Color Preferences</i>	346
10.8.22	<i>Ouverture d'un éditeur.....</i>	348
11 •	Le fichier tampon SPICE Error Log	349
11.1	Présentation du fichier tampon SPICE Error Log.....	349
11.2	Première utilisation: la commande .FOUR.....	349
11.3	Seconde utilisation: la combinaison des commandes .STEP et .MEAS.....	352
11.3.1	<i>Les étapes du calcul fait avec les commandes .meas</i>	354
11.3.2	<i>Affichage de niveau 2 avec le fichier SPICE Error Log</i>	355
11.4	Réglage d'un asservissement.....	359
11.5	Bien choisir la résolution de la boucle .STEP.....	365
12 •	Les commandes annexes, diagramme de l'œil, options de lancement, mots réservés, attribution et questions	369
12.1	Enregistrer une polarisation DC avec .SAVEBIAS.....	369
12.2	Changer un point de fonctionnement DC avec .LOADBIAS.....	370
12.3	Calculer les paramètres d'un réseau HF avec .NET	370
12.4	Définir les conditions initiales (simulation DC) avec .NODESET.....	371
12.5	Télécharger un fichier sur internet avec .FERRET	372

12.6	Faire une déclaration générale avec .GLOBAL	372
12.7	Le diagramme de l'œil et la fonction BAUDRATE	373
12.8	Paramétrer l'axe des abscisses .AC LIST	378
12.8.1	<i>Premier exemple</i>	379
12.8.2	<i>Deuxième exemple</i>	380
12.9	Le cryptage	382
12.10	Les options à ajouter lors du lancement de LTspice	384
12.11	Mots réservés	385
12.12	Précision des calculs avec LTspice	386
12.13	Tableau d'attribution du modèle générique de composants	387
12.14	Réponses aux questions	388
12.14.1	<i>Prise en compte: puissance d'une résistance et courant d'un inducteur ?</i>	388
12.14.2	<i>Quels sont les avantages de LTspice ?</i>	388
12.14.3	<i>Liste non exhaustive de ce que LTspice sait faire</i>	389
12.14.4	<i>Pour savoir ce que vous ne pourrez pas faire avec LTspice</i>	390
12.14.5	<i>LTspice peut-il remplacer un électronicien ?</i>	391
12.14.6	<i>Que fait LTspice lorsque vous lancez le calcul d'une simulation ?</i> ...	391
12.14.7	<i>Quelles sont les origines de LTspice ?</i>	393
12.14.8	<i>Comment atteindre les informations concernant certains composants ?</i>	395
12.14.9	<i>Comment afficher automatiquement les tensions de polarisation ?</i>	396
13 •	La logique et les fonctions annexes	399
13.1	Caractéristiques communes aux circuits logiques	399
13.2	Les portes logiques standards	400
13.3	Les portes logiques avec triggers de Schmitt	400
13.4	Les bascules logiques	401
13.4.1	<i>SRflop</i>	401
13.4.2	<i>Dflop</i>	402
13.4.3	<i>Différences entre circuits logiques réels et simulés ?</i>	402
13.5	PhaseDet: comparateur de phase avec sortie en courant	402
13.6	SampleHold: échantillonneur bloqueur	405
13.7	Modulate et Modulate2: modulateur de fréquence et d'amplitude	407
13.8	LTpowerCADII	410

13.8.1	<i>LTpowerCADII propose un schéma modifiable</i>	412
13.8.2	<i>LTpowerCADII présente les courbes de rendement et les pertes</i> ...	414
13.8.3	<i>LTpowerCADII vous présente une aide à la compensation de la régulation</i>	414
13.8.4	<i>LTpowerCADII vous présente toute une panoplie d'aides</i>	415
13.8.5	<i>LTpowerCADII propose des tableaux de calcul Excel</i>	415
13.8.6	<i>LTpowerCADII propose une panoplie d'outils très pratiques</i>	417
14 • Monte-Carlo		421
14.1	Présentation de Monte-Carlo	421
14.1.1	<i>Monte-Carlo 1 (distribution uniforme)</i>	421
14.1.2	<i>Monte-Carlo 2 (distribution gaussienne)</i>	421
14.2	Monte-Carlo 1 (distribution uniforme et schéma simple).....	422
14.3	Monte-Carlo 1.....	422
14.4	Monte-Carlo 2 (distribution gaussienne et schéma simple)	423
14.5	Monte-Carlo 2 (distribution gaussienne)	424
14.6	Monte-Carlo 2 (avec semi-conducteurs, sous-circuits ou modèles).....	427
14.7	Monte-Carlo 1 (distribution uniforme avec sous-circuits ou modèles).....	428
14.7.1	<i>Partie gauche de la figure 14.7</i>	428
14.7.2	<i>Partie centrale de la figure 14.7</i>	429
14.7.3	<i>Partie droite de la figure 14.7</i>	429
14.8	Monte-Carlo 1 (distribution uniforme et semi-conducteurs)	431
15 • Worst Case		435
15.1	Présentation de Worst Case	435
15.2	Worst Case 1 (tirage aléatoire)	435
15.3	Worst Case 2 (balayage automatique)	435
15.4	Worst Case 3 (application étendue).....	436
15.5	Worst Case 1 (tirage aléatoire et schéma simple)	436
15.6	Worst Case 1.....	437
15.7	Worst Case 2 (balayage automatique et limitation à 16 composants).....	439
15.8	Worst Case (avec semi-conducteurs, sous-circuits ou modèles)	444
15.9	Worst Case 1 (avec sous-circuits ou modèles)	445
15.10	Worst Case 1 (avec semi-conducteurs)	447
15.11	Worst Case 2 (avec modèles et limitée à 16 composants)	449

15.12	Worst Case 2 (avec semi-conducteurs, limitée à 16 composants)	450
15.13	Worst Case 3 (sans limitation, exécution en 2 lancements)	450
15.13.1	Procédure	451
15.13.2	Exemple détaillé	451
15.13.3	La première simulation	452
15.13.4	L'intervention de l'opérateur	452
15.13.5	Deuxième simulation	452
15.13.6	Nécessité d'une commande .MEAS	452
15.13.7	Éléments placés sur le schéma	453
15.13.8	La saisie des valeurs des composants	455
15.13.9	La saisie des transistors	456
15.13.10	Les commandes de notre exemple	458
15.13.11	Lancement de la première partie de la simulation	459
15.13.12	Modification des valeurs des composants repérés	462
15.13.13	Désactivation des commandes du cadre «Premier lancement»	464
15.13.14	Activation des commandes du cadre «Deuxième lancement»	464
15.13.15	Lancement de la deuxième simulation	465
15.13.16	Amélioration de la précision de la bande passante	467
15.13.17	Accélération de la saisie des valeurs du schéma	469
15.14	Conclusion	470
16 •	Simulation comportementale et sources programmables	471
16.1	La simulation comportementale	471
16.2	Premier exemple: comparaison des trois méthodes	471
16.3	Deuxième exemple: le calcul de l'éclairage	473
16.4	Troisième exemple, la méthode GFT	476
16.4.1	Exemple 1 d'application de la méthode GFT	477
16.4.2	Exemple 2 d'application de la méthode GFT	477
16.4.3	Exemple 3 d'application de la méthode GFT	477
16.4.4	Exemple 4 d'application de la méthode GFT	479
16.5	Quatrième exemple: la mesure d'impédance vectorielle	479
16.6	Cinquième exemple: tracé du cycle d'hystérésis	480
16.7	Sixième exemple: le schéma équivalent d'une SMPS de type BOOST	483
16.8	Pour obtenir d'autres exemples de simulation comportementale	487
	Index	489

AVANT-PROPOS

LTspice IV 4.0 a vu le jour fin novembre 2008, date à laquelle il a été mis en ligne par Linear Technology. Depuis, de nouvelles versions se sont succédé au rythme d'une par mois et LTspice a considérablement évolué pour atteindre aujourd'hui sa maturité. Plusieurs commandes importantes ont été ajoutées (**ako**: ou **SOAtherm-NMOS**), d'autres ont été nettement améliorées (**.meas** et **.step** notamment) et des applications toujours plus puissantes sont apparues s'appuyant sur des méthodes performantes (**Worst Case** ou **Linkwitz-Riley**). De plus, début 2011, un blog (en anglais) dédié à LTspice a vu le jour sur le site de Linear Technology. Il traite d'une quarantaine de sujets à l'aide de tutoriels PDF, de vidéos ou de nombreux exemples téléchargeables.

■ Pourquoi un deuxième ouvrage ?

J'ai publié un premier livre en 2011 sur la base de la version 2011, *Le simulateur LTspice IV - Manuel, méthodes et applications*. Il a été mis à jour et réédité en 2013. Toutes les nouveautés de LTspice ont été rassemblées dans ce nouvel ouvrage, complémentaire du précédent : tous les sujets non traités dans la première édition le sont dans la seconde. Il comporte en outre les réponses aux interrogations formulées par plusieurs responsables de centres d'études électroniques que j'ai rencontrés en donnant des cours de formation à LTspice. Formateur agréé LTspice auprès de la société ABC Formation, j'ai conseillé plusieurs entreprises du secteur de l'électronique et dispensé de nombreuses formations LTspice depuis 2011 dans des entreprises de toute taille ayant choisi ce logiciel pour leurs équipes de designers.

■ À qui s'adresse cet ouvrage ?

Depuis quelques années, de nombreux responsables en charge de la conception de schémas électroniques ont adopté LTspice pour eux-mêmes ou pour leurs équipes de designers. Ce choix leur a apporté un gain de temps important, a réduit leur budget de création et de mise au point, a amélioré la qualité des circuits et a augmenté l'efficacité de leurs productions. Cet ouvrage a été conçu à l'intention de toutes ces équipes.

Nous espérons qu'il sera également utile aux enseignants en électronique (IUT, licence pro ou écoles d'ingénieurs) ainsi qu'à tous ceux qui ont le désir de se former seuls à l'électronique.

■ Comment est structuré cet ouvrage ?

De nombreuses questions, souvent récurrentes, m'ont été posées au cours de sessions de formation. Ce nouveau livre apporte des réponses documentées et détaillées aux questions les plus fréquentes. Cinq cent quarante figures

et deux cents exemples, tous téléchargeables sur mon site www.LTspice.fr et sur le site des éditions Dunod (www.dunod.com/contenus-complementaires/9782100743193), viennent illustrer ces différents sujets.

Cet ouvrage est organisé en seize chapitres regroupant les sujets par thème. Certains sujets importants comme l'**importation**, la **création** et l'**incorporation** de modèles et de sous-circuits, **SOAtherm NMOS**, **ako:**, sont toutefois présentés de plusieurs façons afin de répondre aux nombreuses questions qu'ils ont suscitées. Ces développements sont parfois répartis sur plusieurs chapitres.

- Le **chapitre 1** présente les ajouts des dernières versions et ce qu'elles ont apporté à LTspice.
- Le **chapitre 2** présente un par un la quarantaine de sujets traités dans le blog de LTspice. Certains techniquement plus intéressants que d'autres font l'objet d'un développement de plusieurs pages. Les différents articles sont classés par ordre chronologique et par année de mise en ligne.
- Le **chapitre 3** détaille les procédures de création d'un modèle ou d'un sous-circuit permettant de modéliser un composant électronique. Cette question de la création des modèles de composants et des symboles associés suscite beaucoup d'interrogations.
- Le **chapitre 4** développe l'utilisation d'un modèle universel d'amplificateur opérationnel comportant quatre niveaux de simulation. La maîtrise de son utilisation permet de simuler la plupart des amplificateurs opérationnels existants.
- Le **chapitre 5** traite de l'importation et de l'incorporation de modèles et de sous-circuits à partir des sites Internet de fabricants de composants électroniques. Ces questions de l'importation, du traitement des modèles de composants, de l'incorporation dans un schéma, de la création de symboles et de la portabilité des schémas sont complémentaires de celles traitées au chapitre 3. Elles ont également provoqué un grand nombre de questions.
- Les **chapitres 6 et 7** présentent les composants passifs et actifs de LTspice. Presque tous les composants simples sont des modèles, ceux qui sont des sous-circuits sont signalés. Ce chapitre présente, à quelques articles près, les mêmes sujets que le premier ouvrage avec des corrections et des ajouts et un vocabulaire actualisé. L'apport principal est l'indexation systématique de tous les paramètres de tous les modèles de composants passifs et actifs (près de 400 indexations pour les paramètres).
- Les **chapitres 8, 9 et 10** détaillent l'utilisation et le paramétrage des commandes importantes. Ces présentations sont différentes de celles du premier livre, soit parce qu'elles ont été améliorées, soit parce qu'elles ont été totalement repensées et réécrites, soit parce que les commandes sont nouvelles: **.func**, **.meas**, **accolades**, **.param**, **ako:**, **.step**, **.four**, **.wave**, **.model**, **.subckt**, **.inc**, **.lib**, **.ic**, **.save** et **.options**.
- Le **chapitre 11** présente l'affichage graphique de deuxième niveau, réalisé à partir des données contenues dans le fichier tampon **Spice Error Log**.
- Le **chapitre 12** présente les commandes dites secondaires. Cette partie du chapitre est plutôt un aide-mémoire. On y trouvera pêle-mêle: les options

de lancement, le cryptage, les mots réservés et d'autres sujets expliquant certaines particularités de LTspice.

- Le **chapitre 13** présente les fonctions de la logique selon LTspice et les fonctions dites annexes, ce qui ne veut en aucun cas dire qu'elles sont sans intérêt. La seconde partie de ce chapitre présente **LTpowerCADII**, un logiciel complémentaire de LTspice. Il est entièrement dédié à la conception et la mise au point de SMPS et possède une passerelle vers LTspice permettant de parachever la mise au point et les ajustements des SMPS.
- Les **chapitres 14 et 15** offrent une présentation détaillée de cinq méthodes permettant d'exploiter Monte-Carlo et Worst Case qui peuvent être utilisées pour évaluer les performances vis-à-vis de la température, de la tolérance et de bien d'autres paramètres.
- Le **chapitre 16** est consacré à la simulation comportementale. L'utilisation des sources programmables est illustrée de plusieurs exemples, car c'est l'outil le mieux adapté à la mise en œuvre de ce type de simulation.

J'espère que ce nouveau livre permettra aux ingénieurs et aux électroniciens de trouver des réponses précises à toutes leurs questions concernant LTspice.

Des informations complémentaires sont disponibles sur mon site www.LTspice.fr et vous pouvez me contacter à l'adresse mail brocard.gilles.b26@gmail.com ou au cours des sessions de formation en entreprise que j'effectue toute l'année.

■ Rappels sur LTspice

LTspice est un outil global de simulation orientée **électronique analogique**. Il regroupe des qualités rarement rassemblées dans un même logiciel :

1. **Des éditeurs ergonomiques** dédiés à chaque domaine d'activité : création de schémas, de mesures (oscilloscope numérique), d'analyse spectrale (FFT), de génération de symboles, de valeurs et d'attributs de composant, de Netlist, de couleurs, etc.
2. **Des bases de données** comprenant des milliers de modèles de composants et de sous-circuits paramétrables adaptables à vos besoins particuliers. De nombreuses fonctions complexes sont aussi proposées, elles permettent un gain de temps appréciable.
3. **Des commandes puissantes** qui permettent de réaliser de vrais programmes de simulation entièrement adaptés à chaque problème.
4. **Des outils de paramétrage** et de personnalisation très complets. Ils permettent d'ajuster les fonctionnalités du logiciel à vos besoins spécifiques.
5. **Des outils de création de modèles et de sous-circuits** pour étendre facilement les bases de données de composants existantes ou les adapter à vos souhaits.
6. **Le meilleur noyau SPICE disponible** regroupant de nombreuses qualités le démarquant de ses concurrents : extrême rapidité, robustesse à toute épreuve et grande fiabilité de traitement même pour des schémas

complexes. Il exploite également les processeurs multicœurs jusqu'à huit cœurs. Ce noyau est une avancée notable du noyau Berkeley utilisé par les logiciels concurrents, PSpice, HSpice, etc.

7. **Six simulations** paramétrables et adaptables répondant à l'ensemble des besoins des électroniciens les plus exigeants. Certaines sont dédiées aux circuits linéaires; l'une d'elles traite les circuits non linéaires.
8. **Une communauté riche et très active** comprenant plusieurs millions d'utilisateurs principalement professionnels répartis sur toute la planète.
9. **Plusieurs centaines de milliers de modèles de composants** immédiatement accessibles sur Internet. La majorité des fabricants proposent au moins un et parfois plusieurs modèles (SPICE, HSpice, PSpice) de chaque composant de leur catalogue.

1 • LES NOUVEAUTÉS DE LTSPICE

1.1 La puissance des ordinateurs PC

Aujourd'hui, nous pouvons utiliser confortablement un simulateur comme LTspice pour deux raisons principales.

1.1.1 La première raison est une suite d'heureux événements

1. Deux universitaires **Ronald Rohrer** et **Donald Pederson** ont eu en 1970 les bonnes idées et le savoir-faire pour créer un premier noyau SPICE qui simule si bien les phénomènes électriques et électroniques de toute nature.
2. Durant les vingt années qui suivent, ce projet universitaire est enrichi par une équipe d'étudiants zélés, dont **Laurence Nagel** et **Ellis Cohen**, qui améliorent en permanence les fonctionnalités d'origines.
3. Dans les années 1990, une entreprise américaine, **Linear Technology**, décide de financer la modernisation et l'adaptation de ce noyau SPICE à l'informatique de l'époque (apparition de la souris, des écrans graphiques, puissance grandissante des processeurs, quantité de mémoire décuplée, etc.). Dans un premier temps, la société développe ce logiciel pour ses besoins internes, dans un deuxième temps pour le mettre à la disposition de ses clients et faciliter ainsi ses ventes.
4. Cette amélioration est tombée entre les mains d'un jeune programmeur talentueux qui s'est pris au jeu. Vingt-cinq ans plus tard, **Mike Engelhardt** est toujours à la barre et, chaque mois, il nous apporte son lot d'améliorations. Sans lui, LTspice ne pourrait pas être le simulateur que nous connaissons.

1.1.2 La deuxième raison est une longue suite d'améliorations technologiques

L'informatique est l'activité qui a, durant les soixante dernières années, le plus progressé. Nous n'allons pas dresser la chronologie de cette progression depuis la synthèse fondamentale d'un mathématicien de génie **John von Neumann** ou le ruban d'un autre mathématicien tout aussi talentueux, **Alan Turing**. Sachez seulement qu'il faut actuellement, au **XXI^e** siècle, **moins de quinze années** pour que vous ayez à disposition, sur le PC qui trône sur le coin de votre bureau, autant de « puissance de calcul » que celle du **plus rapide super-ordinateur du monde** quinze ans plus tôt !
Vous en doutez...

Prenons la dernière quinzaine d'années 2000-2015 :

- En 2000, au **Lawrence Livermore National Laboratory** (États-Unis), le super-ordinateur **ASCI White IBM** avec ses 8192 processeurs **IBM POWER** cadencés à 375 MHz atteignait la vitesse de calcul, record pour l'époque : **4,9 Téraflops** soit **4 900 000 000 000 opérations en virgule flottante par seconde**. Il était ainsi le **super-ordinateur le plus puissant du monde** en 2000. Pour son acquisition, il fallait déboursier la bagatelle de 110 millions de dollars de l'époque, soit plus d'un bon quart de milliard d'aujourd'hui !
- Quinze années plus tard, en 2015, un seul processeur **I7-5960X** accompagné d'une **carte Nvidia GTX690**, le tout tenant dans un boîtier de PC standard, atteint la puissance de calcul de **5,6 Téraflops** et vous pouvez faire l'acquisition d'un tel PC pour un peu moins de 2000 € soit en dépensant 55 000 fois moins !

C'est cette puissance de calcul phénoménale que possède le moindre de nos ordinateurs, qui permet à LTspice de faire plusieurs milliards d'opérations afin de simuler, avec la plus grande exactitude, le fonctionnement de nos circuits électroniques, même si le schéma est complexe et même s'il comporte un grand nombre de composants.

Cette comparaison ne prend en compte ni l'augmentation de la mémoire RAM, ni celle des disques durs qui ont augmenté, plus ou moins, dans les mêmes proportions. Elle ne prend en compte que la force brute de traitement du calcul ! Aussi, ne soyez pas étonné si certaines commandes de LTspice permettent d'économiser un peu de mémoire, il y a encore peu de temps, c'était essentiel...

1.2 Le répertoire Educational s'enrichit de trois exemples

Vous avez sans doute remarqué que le nombre des exemples du répertoire **Educational** a augmenté. Aucun des exemples figurant dans la liste précédente n'a été retiré. En revanche, seulement trois nouveautés sont venues grossir la liste du répertoire **Educational** au fil du temps. Mais Mike Engelhardt n'ajoute pas des exemples à la légère, jugez vous-même.

1.2.1 UHFpreamp.asc

Ce nouvel exemple d'un **préampli d'antenne TV VHF/UHF** fut le premier ajouté en janvier 2011. Certains utilisateurs de LTspice pensent qu'il ne peut pas simuler correctement les schémas comportant des fréquences radio, c'est une erreur. Il est vrai qu'il existe d'excellents logiciels entièrement dédiés aux fréquences radio VHF, UHF et plus, mais il est également vrai que LTspice simule avec une grande exactitude les schémas comportant des hautes fréquences. L'auteur de cet ouvrage à lui-même saisi et utilisé de nombreux schémas d'appareils de réception/émission dans le domaine HF, VHF et UHF et d'amplificateur de puissance dans ces bandes de fréquences. LTspice, sans être le meilleur outil

dans ce domaine, s'en sort d'une manière plus qu'honorable comme on peut le voir sur la version partiellement traduite de ce nouvel exemple **UHFpreamp.asc**:

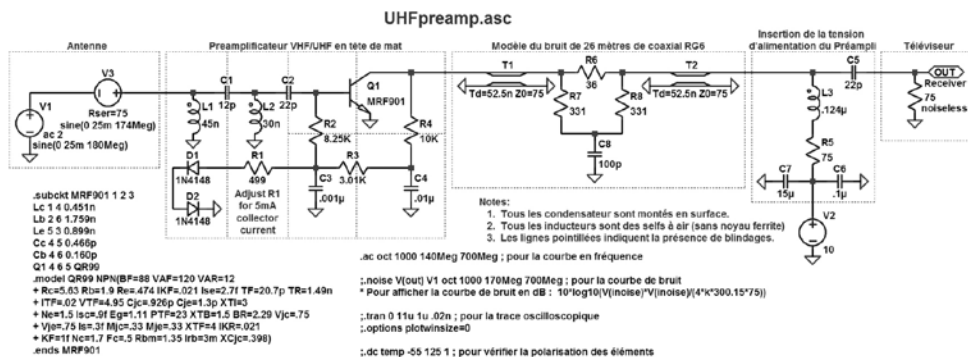


Figure 1.1

Il permet d'afficher quatre types de simulation, dont AC, paramétrée par défaut:

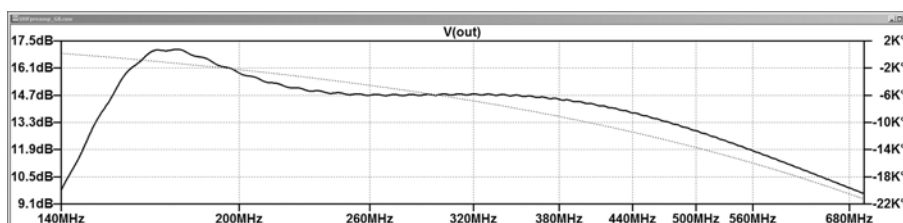


Figure 1.2

Pour voir les autres types de simulation, il suffit d'activer la simulation choisie dans le menu **Simulate/Edit Simulation Cmd**.

1.2.2 Linkwitz.asc

Ce deuxième nouvel exemple mérite largement notre attention. Il présente un schéma contenant le calcul dynamique des valeurs de tous les composants d'un égaliseur de timbre en fonction des paramètres d'un échantillon de voie humaine. Ce schéma modélise également le fonctionnement d'un haut-parleur. Il a été ajouté en novembre 2014.

Version partiellement traduite de cet exemple, voir la figure 1.3.

La courbe du milieu de la figure 1.4 est celle du transfert du haut-parleur, celle du bas est celle de l'égaliseur de timbre(voir page suivante).

On peut voir, après lancement de la simulation, les résultats du calcul dynamique des valeurs de tous les composants de l'égaliseur de timbre en fonction des paramètres du driver (figure 1.5).

Les valeurs des résistances sont données en kilo-ohms (1 volt = 1 kilo-ohm) et celles des condensateurs sont données en nanofarads (1 millivolt = 1 nanofarad).

Linkwitz-Riley : calculer un égaliseur de timbre en fonction des paramètres Fs, Qts et Vas

Présentation du développement théorique du système PA (utilisé durant le World Circuit Tour 2015)
1*) l'électronique utilisée en amont un étage de compensation
2*) le préamplificateur du microphone a été ajusté pour ajouter 4 dB @ 16 kHz (pour améliorer les sifflantes)

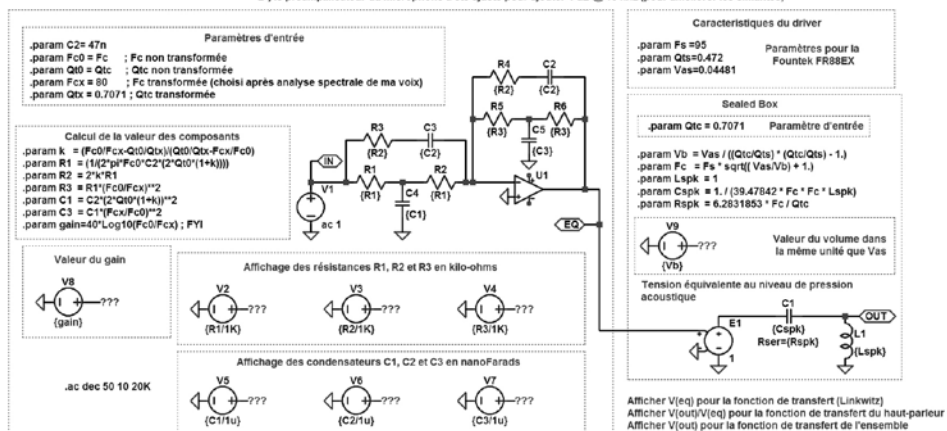


Figure 1.3

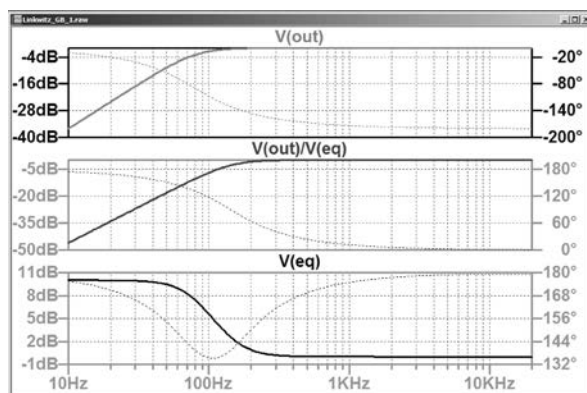


Figure 1.4

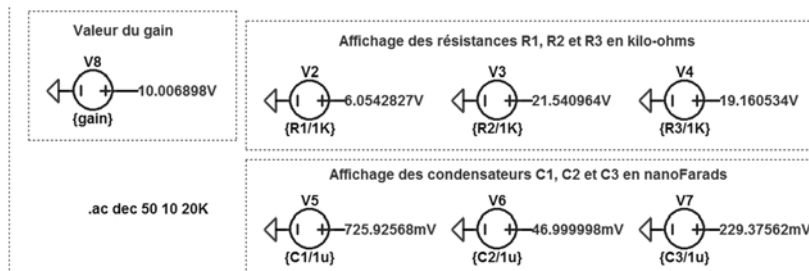


Figure 1.5

1.2.3 SOAtherm-Tutorial.asc

Ce dernier nouvel exemple présente une application utilisant le nouveau modèle thermique. En effet, LTspice propose un nouveau modèle **SOAtherm-NMOS** qui peut être adossé à une trentaine de MOSFET canal N, possédant un paramétrage thermique dédié à **SOAtherm-NMOS**. Il permet de récupérer sur ces deux sorties **Tc-fet** et **Tj-fet** les températures instantanées du boîtier et de la puce du MOSFET. En fonction de la température ambiante, les températures sont calculées en temps réel. Il est ainsi possible d'analyser finement les transitoires thermiques qui peuvent être générateurs de panne. Ce dernier exemple a été ajouté en juillet 2014 pour illustrer l'introduction du nouveau modèle **SOAtherm-NMOS** dans **LTspice**. La figure 1.6 illustre une version partiellement traduite de cet exemple.

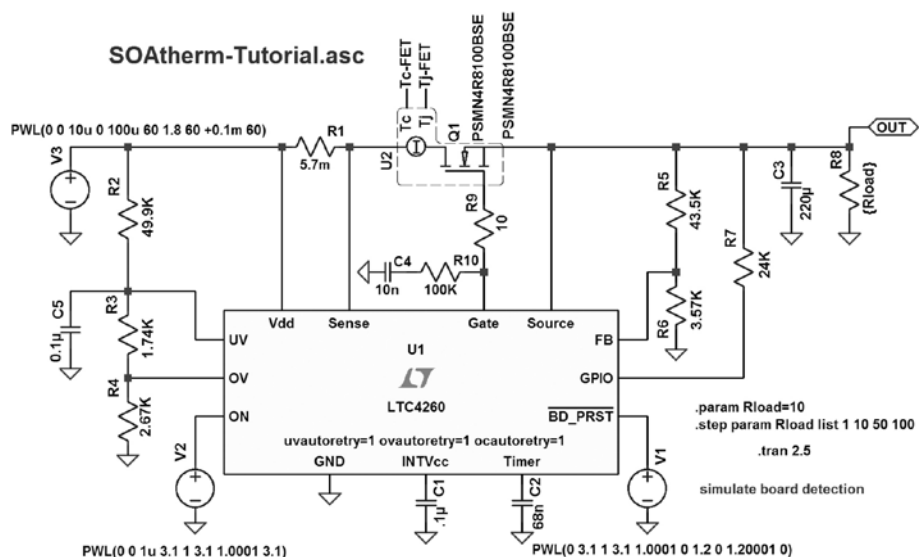


Figure 1.6

Plusieurs sujets du blog (voir chapitre 3, articles 27, 29, 33 et 37) traitent en détail de ce nouveau modèle **SAOtherm-NMOS**.

1.2.4 De nombreuses améliorations

Depuis septembre 2001, Mike Engelhardt a fait plus de deux mille améliorations, corrections et ajouts. Plus près de nous, 524 corrections ont été réalisées depuis la mise en ligne de la nouvelle version **IV** de **LTspice** en novembre 2008, c'est dire si ce logiciel est l'objet de toutes les attentions de la part de son concepteur. **Mike Engelhardt** reste en permanence à l'écoute des utilisateurs, en effet un grand nombre d'améliorations ont été faites grâce au dialogue qu'il entretient avec eux (via son adresse mail sur le site Internet de Linear

Technology). Il ne faut donc pas hésiter à faire des remarques constructives, elles pourront participer à l'amélioration permanente de LTspice.

1.3 Améliorations apportées à LTspice depuis 2001

Voici les principales améliorations ou corrections que Mike Engelhardt a apportées au simulateur LTspice au cours de la période 2011-2016. À chaque téléchargement d'une nouvelle version par la commande **Tools/Sync Release**, vous recevez, en plus de la nouvelle version de LTspice, un fichier qui vous informe des modifications apportées **...LTspice\I\Changelog.txt**. Sur la figure 1.7, vous pouvez voir à quoi ressemble ce fichier au format TXT.

```

07/20/15 Corrected an error processing .measure statements.
07/17/15 Revised the model of the LTM805.
07/17/15 Added a symbol and model for the LTC3350.
07/17/15 Added a symbol and model for the LTC3888.
07/17/15 Revised the model of the LTC1882.
07/17/15 Revised the model of the LTC1131.
07/17/15 Revised the model of the LTC3355.
07/17/15 Revised the model of the LTC6020.
07/17/15 Revised the model of the LTC3722-1 and LTC3722-2.
07/17/15 Added symbols and models for the LTC2941 and LTC2941-1.
07/17/15 Revised the model of the LTC6065.
07/17/15 Revised the models of the LTC6090 and LTC6090-5.
07/17/15 Added symbols and models for the LTC2956-1 and LTC2956-2.
07/17/15 Revised the model of the LTC6102.
07/17/15 Revised the model of the LTC4218.
07/17/15 Added symbols and models for the LTC2922, LTC2922-2.5, and LTC2922-3.3.
07/17/15 Revised the model of the LTC2945.
07/17/15 Added a symbol and model for the LTC2946.
07/17/15 Improved the performance of copying between schematics.
07/17/15 Increased the maximum number of objects that can be copied in one command.
07/17/15 Improved the validity of entered instance names.
06/29/15 Added symbols and models for the LTC2921, LTC2921-2.5, and LTC2921-3.3.
06/29/15 Revised the model of the LTC4217.
06/29/15 Added a symbol and model for the LTC7860.
06/29/15 Added a symbol and model for the LTM4022.
06/29/15 Revised the model of the LTM816.
06/29/15 Added symbols and models for the LTC3061 and LTC3062.
06/29/15 Revised the model of the LTC3042.
06/29/15 Revised the model of the LTC1799.
06/12/15 Added a symbol and model for the LTC3042.
06/12/15 Revised the model of the LTC3618.
06/11/15 Revised the model of the LTC3331.
06/11/15 The File > Clean up during a schematic Save As operation now more closely follows user preferences set in the operation pane of the control panel.
06/11/15 Revised the model of the LTC3760.
06/11/15 Revised the model of the LTM711.
06/09/15 Added a symbol and model for the LTM816.
06/09/15 Revised the model of the LTM897.
06/09/15 Revised the model of the LTM810.
06/09/15 Revised the models of the LTM8046, LTM8047, LTM8048, LTM8057, and LTM8058.
06/09/15 Added symbols and models for the LTC4207-1 and LTC4207-3.
06/09/15 Revised the symbol of the LTC4065.
06/04/15 Added a symbol and model for the LTM709.
06/03/15 Added a symbol and model for the LTC7138.
06/03/15 Revised the models of the LTM8046, LTM8047, and LTM8048.

```

Figure 1.7

1.4 Liste des principales améliorations apportées à LTspice

Cette liste ne reprend que les grandes améliorations ayant une incidence sur l'usage de LTspice. De nombreuses autres modifications ont été apportées, elles peuvent être consultées en ouvrant le fichier **Changelog.txt** (un extrait est visible sur la figure 1.7).

- **Juin 2015**, amélioration de la prise en compte des consignes utilisateurs durant la sauvegarde d'un schéma. Après cette correction, le nettoyage respecte mieux les préférences de l'utilisateur (panneau de contrôle), un bug concernant la commande **.meas** a été corrigé.
- **Janvier 2015**, rationalisation de l'utilisation du CPU pendant les temps de pause.
- **Décembre 2014**, mise à jour des équations du modèle de **VDMOS**.
- **Novembre 2014**, ajout de fichier **.plt** accompagnant plusieurs exemples, amélioration du modèle URC, élimination d'un bug du fonctionnement de la commande **autoranging** de l'axe des ordonnées, amélioration de la