

Sommaire

1	Présentation générale	
2	Montages d'initiation	
2.1	Amplificateur de 6 W à deux ECL82	4
2.1.1	Descriptif	4
2.1.2	Résultats des mesures	6
2.1.3	Conclusion	8
2.2	Amplificateur à deux EL84 en push-pull ultra-linéaire	8
2.2.1	Descriptif	8
2.2.2	Résultats des mesures	10
2.2.3	Conclusion	12
3	Conception générale des amplificateurs à tubes	
3.1	Descriptifs généraux	13
3.1.1	Amplificateur à tube unique ou single-ended	13
3.1.2	Amplificateur à deux tubes en push-pull	14
3.1.3	Autres structures	15
3.2	Étage de puissance	15
3.2.1	Étage de puissance à tube unique, triode ou pentode	15
3.2.2	Push-pull de triodes	17
3.2.3	Push-pull de pentodes	19
3.2.4	Quel montage retenir ?	19
3.3	Amplificateur de tension, focus sur le déphaseur	20
3.3.1	Retour sur le descriptif de principe	20
3.3.2	Déphaseurs à un seul étage	20
3.3.3	Déphaseurs à deux étages au moins	23
3.4	Proposition pour une conception logique d'un amplificateur	26
3.4.1	Conception logique d'un amplificateur	26
3.4.2	Exemple, conception d'un amplificateur de 20 W	29
3.4.3	Spécifications de distorsion, harmonique ou d'intermodulation	32
3.5	Synthèse	35
4	A la recherche du préamplificateur optimal	
4.1	Amplificateur à triode	36
4.1.1	Schéma générique	36
4.1.2	Equations caractéristiques	37
4.1.3	Optimisation	38
4.2	Montage de deux triodes en parallèle	39
4.3	Cathode follower	39
4.3.1	Cathode follower simple	39
4.3.2	Formes évoluées du cathode follower	41
4.4	Cascode	43
4.5	Essais des montages à une ou deux triodes sauf famille SRPP	45
4.5.1	Montages d'essais et résultats	45
4.5.2	Analyse	45
4.6	Du SRPP au μ follower	46
4.6.1	Descriptif	46
4.6.2	Equations caractéristiques	47
4.6.3	Optimisations	48
4.6.4	Du SRPP au μ follower	48
4.6.5	Equations caractéristiques du μ follower	49
4.7	μ follower à tube mixte triode/pentode	49
4.7.1	Principe et équations caractéristiques	49
4.7.2	Schémas pratiques	50
4.8	Bootstrap	51

4.9 Essais des montages à deux triodes de la famille SRPP et bootstrap	52	5.2.3 Schémas opérationnels.....	78
4.9.1 Montages d'essais et résultats	52	5.2.4 Essais de trois montages caractéristiques et premières analyses.	80
4.9.2 Analyses.....	53	5.2.5 Critères d'optimisations.....	80
4.10 Amplificateur à pentode	54	5.2.6 Première optimisation, un préamplificateur performant	81
4.10.1 Descriptif	54	5.2.7 Seconde optimisation, le schéma Isodyne ou Worthen	81
4.10.2 Equations caractéristiques	55	5.2.8 Gamme de déphaseurs optimaux	82
4.10.3 Optimisations	56	5.2.9 Paraphases à utiliser	84
4.10.4 Caractérisations en pentode pure	56	5.3 Le Schmitt	84
4.10.5 Ultra-linéaire	57	5.3.1 Descriptif de principe	84
4.10.6 Analyses.....	58	5.3.2 Schéma équivalent et équations caractéristiques.....	86
4.11 Montages à dégénération de gain	59	5.3.3 Schémas opérationnels.....	89
4.11.1 Equations caractéristiques	59	5.3.4 Essais de cinq montages caractéristiques et premières analyses.	91
4.11.2 Résultats de mesures	59	5.3.5 Déphaseurs de Pierre Loyez et de Hiroshi Amemiya	92
4.12 Synthèse	60	5.3.6 Première optimisation, générateur de courant	93
5 A la recherche du déphaseur optimal		5.3.7 Seconde voie d'optimisation, les circuits à haute linéarité	94
5.1 Cathodyne	61	5.3.8 Une gamme de déphaseurs de Schmitt optimaux	94
5.1.1 Rappel du principe	61	5.3.9 Synthèse.....	95
5.1.2 Schéma équivalent et équations caractéristiques	62	5.4 Cross-coupled (couplages croisés)	95
5.1.3 Schéma opérationnel	64	5.4.1 Descriptif de principe	95
5.1.4 Essais de quatre montages caractéristiques et premières analyses	66	5.4.2 Schéma équivalent et équations caractéristiques.....	96
5.1.5 Critères d'optimisations.....	67	5.4.3 Schémas opérationnels.....	98
5.1.6 Première voie optimale, préamplificateur bootstrappé et déphaseur à faibles charges	68	5.4.4 Essais de deux montages caractéristiques et premières analyses	99
5.1.7 Seconde voie optimale, préamplificateur à triode et déphaseur à pentode	69	5.4.5 Critères généraux d'optimisation.....	100
5.1.8 Troisième voie d'optimisation, préamplificateur à pentode et déphaseur à triode	70	5.4.6 Le vrai critère d'optimisation, une attaque symétrique	103
5.1.9 Deux solutions extrêmes avec préamplificateur à pentode	71	5.4.7 Conclusion	104
5.1.10 Une mauvaise optimisation, le cathodyne « amélioré »	72	5.5 Synthèse	104
5.1.11 Résultats des mesures des cathodynes optimaux.....	72	5.5.1 Synthèse des performances	104
5.1.12 Cathodynes à utiliser	72	5.5.2 Aspects pratiques.....	105
5.1.13 Retour à l'origine du cathodyne.....	73	5.5.3 Et pour conclure, enfin !	105
5.2 Paraphase	75	6 A la recherche des drivers optimaux	
5.2.1 Rappel du principe.....	75	6.1 Circuits conventionnels	106
5.2.2 Schéma équivalent et équations caractéristiques.....	77	6.1.1 Montages à simple triode.....	106
		6.1.2 Montages à deux triodes ou à triode/pentode	107
		6.2 Montages de semi-puissance	107
		6.2.1 Montages à triode ou pentode simple étage.....	108
		6.2.2 Montages à triode/pentode de puissance	109

6.2.3	Résultats et analyse	109	7.6.2	Histoire vraie de l'invention de l'ultra-linéaire	144
6.3	Montages à compensation de distorsion	109	7.6.3	Retours sur puissance maximale, charge optimale, impédance de sortie et bande passante aux fréquences élevées	145
6.3.1	SEPP ou single-ended push-pull	109	7.6.4	Puissance maximale, résultat d'une combinaison complexe de paramètres	145
6.3.2	Drivers en différentiel et alimentation symétrique	111	7.6.5	Distorsion, un doute légitime	148
6.3.3	Montages à asservissement de courant	112	7.7	Créativité au service des couplages, les solutions exotiques	149
6.4	Synthèse	114	7.7.1	Objectif cathode	149
7	Etage de puissance		7.7.2	Plus encore, Unity-Coupled, push-pull parallèle et super pentode	154
7.1	Amplificateur simple étage ou single-ended	115	7.7.3	Puissance maximale en fonction de la charge et distorsions	157
7.1.1	Rappel	115	7.8	Effet de la contre-réaction	160
7.1.2	Analyses approfondies	116	7.8.1	Effet sur le gain	160
7.1.3	Optimisation d'un étage à simple triode	119	7.8.2	Effet sur l'impédance de sortie	160
7.1.4	Optimisation d'un étage à simple pentode	120	7.8.3	Effet sur la puissance maximale en fonction de la charge, première analyse	160
7.2	Amplificateur push-pull en classe A	121	7.8.4	Effet sur la puissance maximale en fonction de la charge, seconde analyse	161
7.2.1	Rappels	121	7.8.5	Effet sur les bandes passantes	162
7.2.2	Analyses approfondies	122	7.9	Synthèse	162
7.2.3	Modélisation	124	7.9.1	Classes de fonctionnement	162
7.2.4	Analyse détaillée des compensations de distorsion dans un push-pull en classe A	126	7.9.2	Couplage au transformateur de sortie	162
7.3	Amplificateur push-pull en classe B	127	7.9.3	Comment choisir ?	163
7.3.1	Présentation	127	8	Alimentations	
7.3.2	Observations essentielles	127	8.1	Objectifs de l'étude	164
7.3.3	Optimisations	128	8.1.1	Cahier des charges d'une alimentation en courant continu	164
7.3.4	Faut-il travailler en classe B ?	130	8.1.2	Méthode alliant mesures sur maquette et simulation informatique	164
7.4	Classes AB	130	8.1.3	Une maquette guide	165
7.4.1	Principes fondateurs et définitions	130	8.2	Redressement condensateur en tête	165
7.4.2	Observations essentielles	130	8.2.1	Principes dans un monde idéal	165
7.4.3	Analyses approfondies	132	8.2.2	Retour au monde réel	167
7.4.4	Retour sur les variations du gain	134	8.2.3	Résultats comparés entre expérimentation et simulation	172
7.4.5	Ultimes définitions, classes AB1 et AB2	136	8.3	Redressement à condensateur en tête, quatre voies présumées d'amélioration	172
7.5	Couplage au transformateur	136	8.3.1	Condensateur en tête de forte valeur	172
7.5.1	Transformateur, rappels simples	136			
7.5.2	Influences de la charge	138			
7.5.3	Influences de l'impédance de sortie des tubes de puissance	141			
7.6	Ultra-linéaire, un couplage mythique	142			
7.6.1	Principe et rappels historiques	142			

8.3.2	Cellule de filtrage L/C	173	8.9.5	Oscillations déclenchées	210
8.3.3	Redressement par diode à vide	174	8.9.6	Quelle solution optimale ?	211
8.3.4	Condensateurs en parallèle sur les diodes	177	8.10 Polarisation négative	213	
8.4	Redressement à self en tête	177	8.10.1	Pourquoi une polarisation négative ?	213
8.5	Première synthèse de la description des solutions pour une alimentation haute tension	181	8.10.2	Cahier des charges	214
8.5.1	Synthèse	181	8.10.3	Quel filtrage justement ?	214
8.5.2	Retour sur le spectre des tensions résiduelles de filtrage	181	8.10.4	Faut-il réguler ?	216
8.5.3	Stress des composants à la mise sous tension	183	8.11 Alimentation pour le chauffage	216	
8.5.4	Parade aux transitoires, le réseau amortisseur	184	8.11.1	Quel optimum pour le chauffage de l'étage de puissance ?	217
8.6	Alimentations stabilisées	185	8.11.2	Quel optimum pour le chauffage des étages de tension ?	217
8.6.1	Alimentations régulées à transistors bipolaires	185	8.11.3	Validation de l'alimentation de chauffage par un régulateur basse tension low drop	217
8.6.2	Venons-en au FET !	188	8.11.4	Ingénierie nécessaire pour la source de chauffage en continu	219
8.6.3	Solution élégante, les régulateurs intégrés haute tension	190	8.12 Sources de courant	219	
8.6.4	Montages « simples » à tubes	191	8.12.1	Définition et propriétés	219
8.7	Conception de l'alimentation haute tension, retour sur le cahier des charges	192	8.12.2	Descriptif des sources de courant	221
8.7.1	Il est temps de passer à la conception	192	8.12.3	Bruit rapporté par une source de courant, un vrai problème	223
8.7.2	Tension continue à la valeur souhaitée	193	8.13 Critères pour le choix des composants	227	
8.7.3	Une vraie tension continue ou quelle ondulation est acceptable par le push-pull ?	195	8.13.1	Transformateur	227
8.7.4	Un filtrage complémentaire par une cellule self + condensateur est nécessaire dans la configuration de redressement avec condensateur en tête	196	8.13.2	Diodes	227
8.7.5	Tension continue stable	197	8.13.3	Condensateurs	228
8.7.6	Réponse aux appels de courant	199	8.13.4	Self de filtrage	228
8.8	Calcul de l'alimentation haute tension d'un étage de puissance	203	8.13.5	Transistors haute tension	229
8.8.1	Solution à privilégier, le redressement self en tête	203	8.13.6	Diodes zeners	229
8.8.2	Solution alternative, redressement à condensateur en tête suivi d'une cellule de filtrage self/condensateur	204	8.13.7	Résistances	231
8.9	Conception de l'alimentation haute tension des étages amplificateurs de tension	206	8.14 Et maintenant ?	232	
8.9.1	Cahier des charges	206	8.14.1	Synthèse sur les alimentations	232
8.9.2	Influence des variations de la haute tension sur le gain	207	8.14.2	Synthèse sur les cinq derniers chapitres	232
8.9.3	Influence des résiduelles de filtrage sur le rapport signal à bruit	207	9 Evolutions des amplificateurs de faible puissance		
8.9.4	Découplages, remède aux risques d'accrochage basse fréquence	209	9.1 Conception assistée par ordinateur d'un amplificateur à deux ECL82	233	
			9.1.1	Descriptif	233
			9.1.2	Performances	235
			9.1.3	Conclusion	235

9.2	2^e amplificateur, 10 W avec deux EL84	235	10.5	Conception d'un amplificateur optimal de 30/35 W .	260
9.2.1	Descriptif	235	10.5.1	Cahier des charges	260
9.2.2	Performances	237	10.5.2	Descriptif	260
9.2.3	Conclusion	237	10.5.3	Résultats des essais	262
9.3	3^e amplificateur, un paraphase qui marche et des tétrodes à faisceaux dirigés	237	10.5.4	Compensation des non-linéarités d'amplitude	263
9.3.1	Descriptif	237	10.5.5	Retour sur les bandes passantes	263
9.3.2	Performances	239	10.5.6	Conclusion	266
9.3.3	Conclusion	239	10.6	Conception d'un amplificateur optimal de 45 W	266
9.4	4^e amplificateur, le Schmitt (enfin ?)	240	10.6.1	Cahier des charges	266
9.4.1	Descriptif	240	10.6.2	Descriptif	267
9.4.2	Performances	242	10.6.3	Résultats des essais	269
9.4.3	Conclusion	242	10.6.4	Conclusion	270
9.5	Quels réglages ?	242	10.7	Synthèse	270
9.5.1	Equilibre des courants plaque du push-pull	242	11	Amplificateurs à triodes	
9.5.2	Ajustement fin de la tension grille/cathode	243	11.1	Critères de stabilité aux fréquences basses	271
9.5.3	Comment calculer le réseau de polarisation de Williamson ?	244	11.1.1	Présentation et première analyse	271
9.5.4	Ajustement fin de l'équilibre dynamique du push-pull	244	11.1.2	Amplificateurs à deux constantes de temps, rappel théorique	271
9.5.5	Méthode pratique pour les réglages en audiofréquences	245	11.1.3	Amplificateurs à deux constantes de temps, étude et validation par la simulation	273
9.6	Synthèse	247	11.1.4	Règles applicables aux amplificateurs à deux constantes de temps	273
10	Amplificateurs optimaux de grande puissance		11.1.5	Amplificateurs à trois constantes de temps	274
10.1	Cahier des charges selon D.T.N. Williamson	248	11.1.6	Règles applicables aux amplificateurs à trois constantes de temps	274
10.2	Conception d'un amplificateur optimal de 20 W	249	11.2	Critères de stabilité aux fréquences élevées	275
10.2.1	Cahier des charges	249	11.2.1	Rappels	275
10.2.2	Descriptif	251	11.2.2	Critère théorique de stabilité et définitions	276
10.2.3	Résultats des essais	253	11.2.3	Premier critère pratique de stabilité, marge de phase opérationnelle	277
10.2.4	Synthèse	254	11.2.4	Comment stabiliser un amplificateur, réseau compensateur ?	278
10.3	Retour sur les non-linéarités des étages de tension	254	11.2.5	Méthode pratique pour obtenir la bonne réponse aux signaux rectangulaires	279
10.3.1	Considérations théoriques	254	11.2.6	Second critère pratique de stabilité, réseau de contre-réaction	282
10.3.2	Validation expérimentale	255	11.2.7	Que faire de plus ?	283
10.4	Retour sur les bandes passantes	256	11.2.8	Conclusion	283
10.4.1	Notion d'impédance de sortie symétrique	256			
10.4.2	Validation par les bandes passantes	256			
10.4.3	Synthèse importante	259			

11.3 Un autre aspect de la stabilité, la Distorsion d'Intermodulation Transitoire	283	12.2.3 Approche par la simulation informatique	299
11.3.1 Description	283	12.2.4 Une ultime réserve, la sensibilité aux perturbateurs ramenés par la haute tension	302
11.3.2 Propositions d'amélioration	285	12.2.5 Théorèmes de la contre-réaction	305
11.3.3 Et nos amplificateurs à tubes ?	285	12.2.6 Théorèmes de la bande passante	305
11.3.4 Protection envers la distorsion d'intermodulation transitoire	286	12.3 Amplificateur de 30 W à 6L6GC en classe AB1	306
11.4 Premier retour aux triodes, un amplificateur de 12 W à EL34.	286	12.3.1 Introduction de la polarisation fixe	306
11.4.1 Conception générale	286	12.3.2 Détermination des conditions de fonctionnement des 6L6GC	308
11.4.2 Descriptif	286	12.3.3 Descriptif	308
11.4.3 Résultats des essais	288	12.3.4 Résultats des essais	311
11.4.4 Synthèse	289	12.3.5 Conclusion	311
11.5 Second amplificateur à triodes, 25 W avec deux 6550	289	12.4 Amplificateur de 42 W à EL34.	312
11.5.1 Conception générale	289	12.4.1 Conception générale	312
11.5.2 Descriptif	290	12.4.2 Descriptif	313
11.5.3 Résultats des essais	291	12.4.3 Résultats des essais	315
11.5.4 Conclusion	292	12.4.4 Synthèse	316
11.6 Synthèse	292	12.5 Amplificateur de 60 W à 6550 en classe AB2.	316
12 Ultimes évolutions		12.5.1 Conception générale	316
12.1 Théorie du taux maximum de contre-réaction.	293	12.5.2 Descriptif	317
12.1.1 Théorèmes de la distorsion	293	12.5.3 Résultats des essais	319
12.1.2 Amplificateur Mullard original, une contre validation ?	293	12.5.4 Conclusion	320
12.2 Théorie du fractionnement de la contre-réaction	296	12.6 Synthèse	320
12.2.1 Ultime expérience préalable	296	Epilogue	321
12.2.2 Principe fondateur du fractionnement de la contre-réaction	297	Bibliographie	324
		Index	328

Note : l'absence de certains sous-titres (niveau 4) est délibérée.