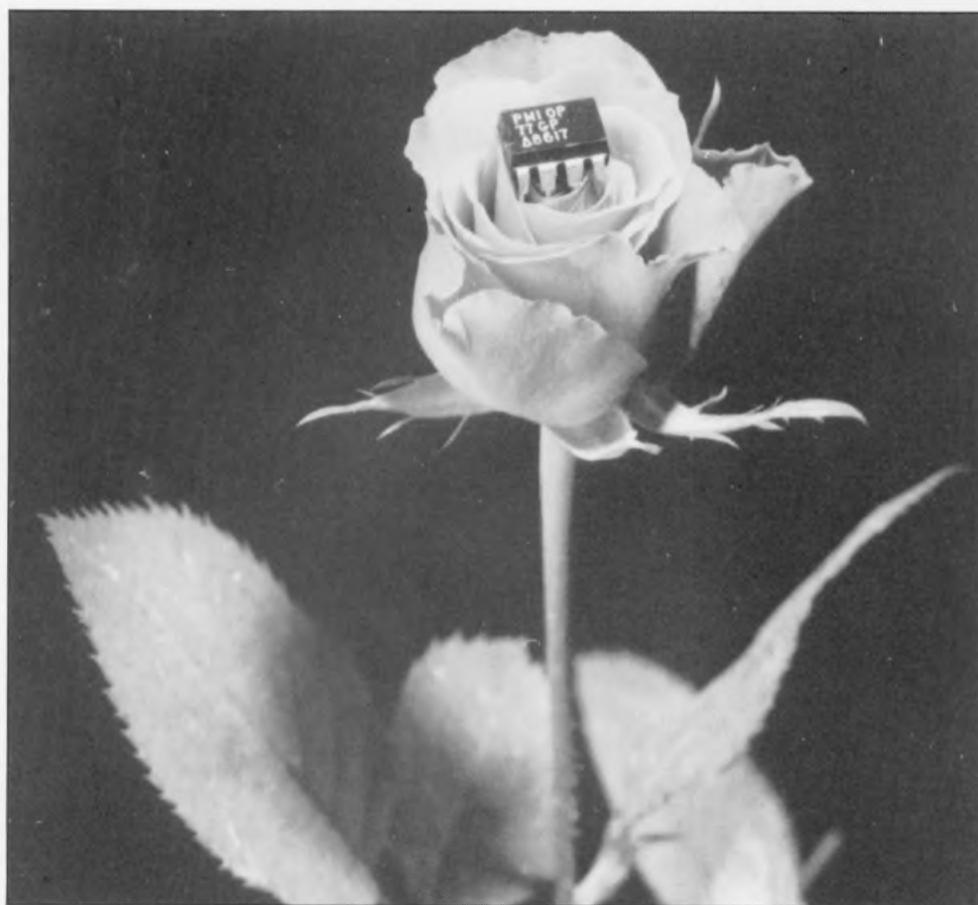


la succession du 741 est ouverte !

ampli-ops en tous genres et de tout format

Les fabricants de circuits intégrés ne cessent de lancer sur le marché de nouveaux amplificateurs opérationnels "améliorés". Nous avons déjà utilisé certaines de ces "nouveauautés" dans plusieurs circuits récents décrits dans Elektor. Quelles sont donc les différences entre ces amplificateurs opérationnels dernier cri et ce vieux 741 si familier ? Nous allons tenter, par cet article, de répondre à cette question et ainsi peut-être vous aider à choisir le type d'amplificateur opérationnel qui convient le mieux à telle ou telle application.



La conception d'un circuit électronique basé sur un amplificateur opérationnel idéal est, théoriquement du moins, d'une simplicité enfantine. Cependant, il n'est pas exceptionnel que le concepteur d'un tel circuit avoue, à un stade ou un autre du développement, que son "produit" ne fonctionne que

sur le papier. La cause de l'échec est évidente: **l'amplificateur opérationnel idéal n'existe pas !**

Ce modèle idéalisé a toutefois un droit à l'existence certain pour la bonne raison qu'il simplifie énormément l'analyse des circuits les plus complexes. L'amplificateur

opérationnel supposé quasi-idéal ne peut servir en fait, si l'on passe outre la conception de circuits aux performances limitées, qu'à la réalisation d'analyses de fonctions. Toute autre application oblige à tenir compte de ses caractéristiques de "non-idéalité" les plus importantes. Le qualificatif d'important ou de

négligeable à attribuer à chacun des paramètres caractéristiques d'un amplificateur opérationnel dépend en fait du genre de circuit dans lequel celui-ci doit être utilisé. Dans le cas d'un circuit d'amplification d'une tension alternative par exemple, la dérive (*drift*) de l'amplificateur opérationnel

est sans importance, ce qui n'est certainement pas le cas de son taux de montée (*slew rate*). A l'inverse, les performances d'un amplificateur de tension continue sont beaucoup plus sensibles à cette fameuse dérive qu'au taux de montée. Faire une distinction entre les caractéristiques importantes et celles qui le sont moins, permet également de ne pas faire de calculs inutiles.

Il est évident qu'un choix bien réfléchi demande une certaine expérience en la matière et une connaissance étendue du sujet. Gain infini, impédance d'entrée infinie et impédance de sortie nulle, sont des expressions que connaît la majorité des lecteurs d'Elektor. L'apparition de termes comme tension de décalage, dérive, polarisation de l'entrée, taux de montée et bien d'autres encore, laisse cependant prévoir des difficultés de toutes sortes.

Technologies

Les fabricants d'amplificateurs intégrés font ce qu'ils peuvent, les "pôvres", pour s'approcher le plus possible de l'amplificateur opérationnel idéal. La raison pour laquelle ils n'y sont pas encore arrivés, jusqu'à présent, est que l'amélioration de l'un des paramètres va très souvent de pair avec la dégradation de l'une ou de l'autre, voire de plusieurs des caractéristiques de l'amplificateur opérationnel. Le fait que l'accroissement du taux de montée entraîne inévitablement une augmentation de la consommation de courant en est un bel exemple. Bien qu'elle ne soit pas en mesure d'optimiser simultanément toutes les caractéristiques d'un amplificateur opérationnel, la technologie moderne permet des améliorations très sensibles.

Puisque tout fabricant d'amplificateur opérationnel a mis en oeuvre son processus d'intégration "favori" pour produire les meilleurs produits possibles, il n'est pas surprenant que, finalement, l'on se retrouve devant une diversité incroyable de composants dans la famille des amplifica-

teurs opérationnels. Il existe en gros quatre technologies de fabrication aujourd'hui: les technologies bipolaire, BIFET, BIMOS et LinCMOS (nous avons déjà consacré un article à cette dernière, voir "les LinCMOS" dans le n°135, septembre 1989).

Bipolaire: pas si mal que ça !

Les amplificateurs opérationnels bipolaires font appel, par définition, à des transistors NPN et PNP. Le 741 est sans aucun doute le type de composant le plus connu de cette famille. Les amplificateurs opérationnels bipolaires

ont les meilleures caractéristiques en ce qui concerne la stabilité de la tension de décalage d'entrée. Dans la littérature professionnelle, cette caractéristique est connue sous le nom de "dérive en tension". Elle indique tout simplement le coefficient de température de

1a

Parameter	Conditions	LM741A/LM741E			LM741			LM741C			Units
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
Input Offset Voltage	$T_A = 25^\circ\text{C}$ $R_S \leq 10\text{ k}\Omega$ $R_S \leq 50\Omega$		0.8	3.0		1.0	5.0		2.0	6.0	mV mV
	$T_{AMIN} \leq T_A \leq T_{AMAX}$ $R_S \leq 50\Omega$ $R_S \leq 10\text{ k}\Omega$			4.0			6.0			7.5	mV mV
Average Input Offset Voltage Drift				15							$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
Input Offset Voltage Adjustment Range	$T_A = 25^\circ\text{C}, V_S = \pm 20\text{V}$	± 10				± 15			± 15		mV
Input Offset Current	$T_A = 25^\circ\text{C}$		3.0	30		20	200		20	200	nA nA
	$T_{AMIN} \leq T_A \leq T_{AMAX}$			70		85	500			300	nA
Average Input Offset Current Drift				0.5							$\text{nA}/^\circ\text{C}$
Input Bias Current	$T_A = 25^\circ\text{C}$		30	80		80	500		80	500	nA μA
	$T_{AMIN} \leq T_A \leq T_{AMAX}$			0.210			1.5			0.8	μA
Input Resistance	$T_A = 25^\circ\text{C}, V_S = \pm 20\text{V}$	1.0	6.0		0.3	2.0		0.3	2.0		M Ω M Ω
	$T_{AMIN} \leq T_A \leq T_{AMAX}$ $V_S = \pm 20\text{V}$		0.5								M Ω
Input Voltage Range	$T_A = 25^\circ\text{C}$							± 12	± 13		V V
	$T_{AMIN} \leq T_A \leq T_{AMAX}$				± 12	± 13					V
Large Signal Voltage Gain	$T_A = 25^\circ\text{C}, R_L \geq 2\text{ k}\Omega$ $V_S = \pm 20\text{V}, V_O = \pm 15\text{V}$ $V_S = \pm 15\text{V}, V_O = \pm 10\text{V}$		50								V/mV V/mV
	$T_{AMIN} \leq T_A \leq T_{AMAX}$ $R_L \geq 2\text{ k}\Omega$ $V_S = \pm 20\text{V}, V_O = \pm 15\text{V}$ $V_S = \pm 15\text{V}, V_O = \pm 10\text{V}$ $V_S = \pm 5\text{V}, V_O = \pm 2\text{V}$		32								V/mV V/mV V/mV
			10								V/mV

890151 - 11

b

ELECTRICAL CHARACTERISTICS at $V_S = \pm 15\text{V}, -55^\circ\text{C} \leq T_A \leq +125^\circ\text{C}$, unless otherwise noted.

PARAMETER	SYMBOL	CONDITIONS	OP-07A			OP-07			UNITS
			MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	
Input Offset Voltage	V_{OS}	Note 1	—	25	60	—	60	200	μV
Average Input Offset Voltage Drift Without External Trim	TCV_{OS}	Note 2	—	0.2	0.6	—	0.3	1.3	$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
With External Trim	TCV_{OSn}	$R_P = 20\text{ k}\Omega$ (Note 3)	—	0.2	0.6	—	0.3	1.3	$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
Input Offset Current	I_{OS}		—	0.8	4	—	1.2	5.6	nA
Average Input Offset Current Drift	TCI_{OS}	Note 2	—	5	25	—	8	50	$\text{pA}/^\circ\text{C}$
Input Bias Current	I_B		—	± 1	± 4	—	± 2	± 6	nA
Average Input Bias Current Drift	TCI_B	Note 2	—	8	25	—	13	50	$\text{pA}/^\circ\text{C}$
Input Voltage Range	IVR		± 13	± 13.5	—	± 13	± 13.5	—	V
Common-Mode Rejection Ratio	CMRR	$V_{CM} = \pm 13\text{V}$	106	123	—	106	123	—	dB
Power Supply Rejection Ratio	PSRR	$V_S = \pm 3\text{V to } \pm 18\text{V}$	—	5	20	—	5	20	$\mu\text{V/V}$
Large-Signal Voltage Gain	A_{VO}	$R_L \geq 2\text{ k}\Omega, V_O = \pm 10\text{V}$	200	400	—	150	400	—	V/mV
Output Voltage Swing	V_O	$R_L \geq 2\text{ k}\Omega$	± 12	± 12.6	—	± 12	± 12.6	—	V

NOTES:

- OP-07A grade V_{OS} is measured approximately one minute after application of power. For all other grades V_{OS} is measured approximately 0.5 seconds after application of power.
- Sample tested.
- Guaranteed by design.

Figure 1. Deux extraits des fiches de caractéristiques des amplificateurs opérationnels 741 (figure 1a) et OP-07 (figure 1b).

la tension de décalage d'entrée, c'est-à-dire sa variation en fonction de l'évolution de la température ($\Delta U_{os} / \Delta T$).

Puisque l'appariement de transistors FET est beaucoup plus difficile que celui de transistors bipolaires, les amplificateurs opérationnels à entrées FET (qu'elles soient de technologie BIMOS ou BIFET) sont incommodés davantage par des dérives en tension. Les amplificateurs opérationnels bipolaires modernes, tel que l'OP-07 par exemple, présentent une dérive de la tension de décalage de $1,3 \mu V/^{\circ}C$ au maximum seulement. Mieux encore, des valeurs moyennées de $0,2 \mu V/^{\circ}C$ ne constituent plus une exception de nos jours. Par rapport au "vieux" 741, les performances du OP-07 sont 15 fois meilleures en ce qui concerne cette caractéristique précise. Vous vous demandez peut-être comment les "concepteurs" de l'OP-07 ont fait pour obtenir une telle amélioration. A la comparaison des feuilles de caractéristiques de ces deux amplificateurs opérationnels (figure 1), il est évident, qu'outre la dérive, la valeur absolue de la tension de décalage de l'OP-07 est, elle aussi, sensiblement plus faible. Cette découverte fait supposer que la dérive en tension est liée de façon indissociable à l'importance de la tension (absolue) de décalage, en d'autres termes, la réduction de U_{os} entraîne une réduction parallèle de la dérive en tension.

Ajustage par destruction de diodes zener

Dans le cas d'un OP-07 on utilise cette technique (dite de *zener-zap trimming* outre-Manche) afin de réduire la tension absolue de décalage, U_{os} , à une valeur inférieure à $200 \mu V$, et ceci sans devoir faire appel à une compensation externe. L'amplificateur opérationnel OP-77, le successeur désigné de l'OP-07, utilise également cette technique d'ajustage par destruction de diodes zener. Pour bien comprendre le principe de cette méthode, il est bon de commencer par

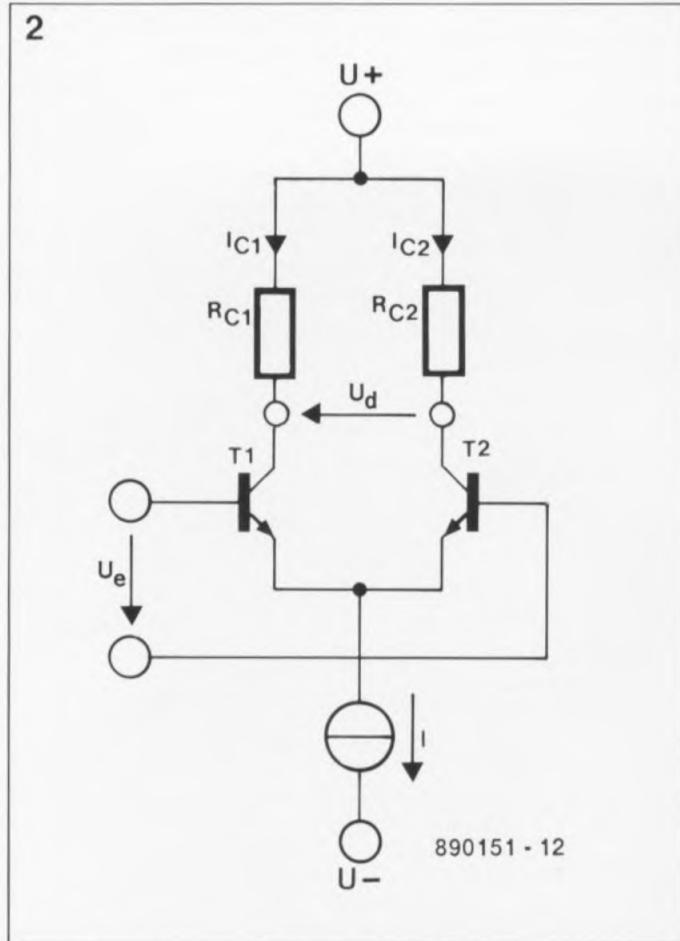


Figure 2. Schéma simplifié de l'étage d'entrée d'un amplificateur opérationnel bipolaire.

l'examen de la "fiche d'état civil" donnant les informations sur l'origine de la tension de décalage. Le figure 2 montre, la circuiterie, simplifiée, de l'étage d'entrée d'un amplificateur bipolaire standard. La tension de sortie (U_d) est égale à la différence des potentiels entre les deux collecteurs; elle est calculée de manière suivante:

$$U_d = I_{C1} \cdot R_{C1} - I_{C2} \cdot R_{C2}$$

En raison de ceci, la tension de sortie serait nulle si les deux résistances prises en série dans les lignes des collecteurs avaient la même valeur. Un parfait appariement des deux transistors T1 et T2 associé à des courants de collecteur identiques, entraînerait deux tensions de seuil, U_{be1} et U_{be2} , égales. Cela signifie que la tension de sortie U_d n'est nulle que dans le cas d'une tension d'entrée $U_e (= U_{be1} - U_{be2})$ nulle elle aussi. En pratique, il est impossible que les deux transistors T1 et T2 soient jumeaux à ce point. Par conséquent il y aura toujours une différence (aussi minime soit-elle) entre les deux tensions de seuil, même si les courants appliqués aux collecteurs, I_{C1} et I_{C2} , sont parfaitement égaux. Il est évident maintenant que la tension d'entrée U_e doit avoir la même valeur que la tension de décalage U_{os} si l'on veut obtenir une tension de sortie U_d égale à zéro.

Dans la pratique, la tension de sortie d'un amplificateur opérationnel est réglée à zéro en appliquant à ses entrées une tension de polarisation convenable. Il existe pourtant des amplificateurs opérationnels que l'on a dotés de broches supplémentaires, reliés à l'électronique interne de ce composant. Ceci permet une compensation de la tension de décalage d'entrée à l'aide d'un potentiomètre ajustable, externe, sans qu'il faille coller un "circuit de mise à zéro" aux entrées si sensibles de l'amplificateur. La figure 3 montre le circuit de base d'une telle configuration.

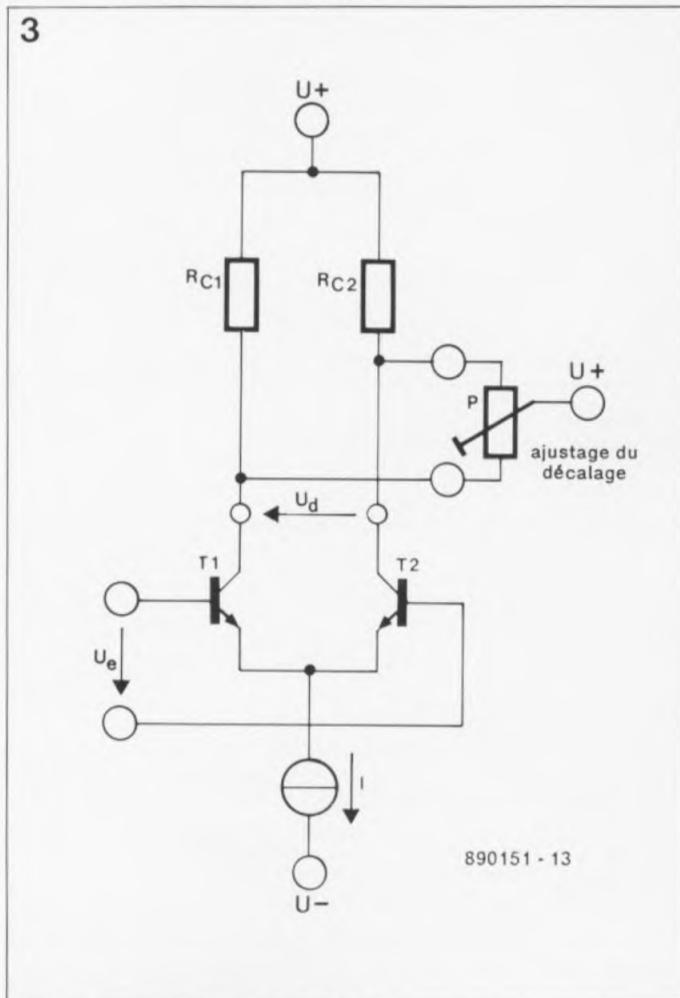


Figure 3. Compensation de la tension de décalage à l'aide d'un potentiomètre ajustable externe (P).

Les concepteurs des amplificateurs opérationnels bipo-

lares mentionnés ci-dessus, sont pourtant allés plus loin encore, comme l'illustre la **figure 4**. La résistance totale, prise en série dans chaque ligne de collecteur, se compose de plusieurs résistances: R1 à R4 pour le transistor T1, et R5 à R8 pour le transistor T2. Le circuit comporte en outre des diodes zener prises en parallèle sur quelques-unes des résistances. Une fois terminés les premiers processus de fabrication du circuit intégré, le fabricant réduit la tension de décalage au minimum en appliquant aux diodes zener appropriées de fortes impulsions de courant; on les "zappe", ah le joli bruit ! Est-il nécessaire de préciser que les diodes en question grillent et que dans ces conditions, elles court-circuitent la résistance prise en parallèle. A l'aide de cette technique de *zener-zap-trimming* on obtient des amplificateurs opérationnels présentant une tension de décalage de 25 μ V environ. Il est bien entendu possible d'annuler cette faible tension de décalage à l'aide d'un potentiomètre d'ajustage, selon la technique décrite plus haut. On remarquera que ce potentiomètre d'ajustage fait alors partie d'un pont de résistances. Afin d'éviter une influence trop importante des coefficients de température différents présentés par les résistances intégrées et celle du potentiomètre externe sur la dérive en tension, la configuration de la figure 4 est préférable au circuit standard de la figure 3.

Toutes ces caractéristiques sont extrêmement séduisantes et il n'est pas exclu qu'elles vous donnent envie de remplacer immédiatement chaque 741 prévu dans un montage par un OP-07 "up to date". Soyez bien conscient des conséquences pourtant ! Cette substitution pourrait fort bien vous revenir très cher: un OP-07 coûte le prix de dix 741, si ce n'est plus !

Courant d'entrée

A la température ambiante, les transistors bipolaires ont des courants d'entrées plus élevés, par définition, que ceux que connaissent les transistors JFET. A l'inverse

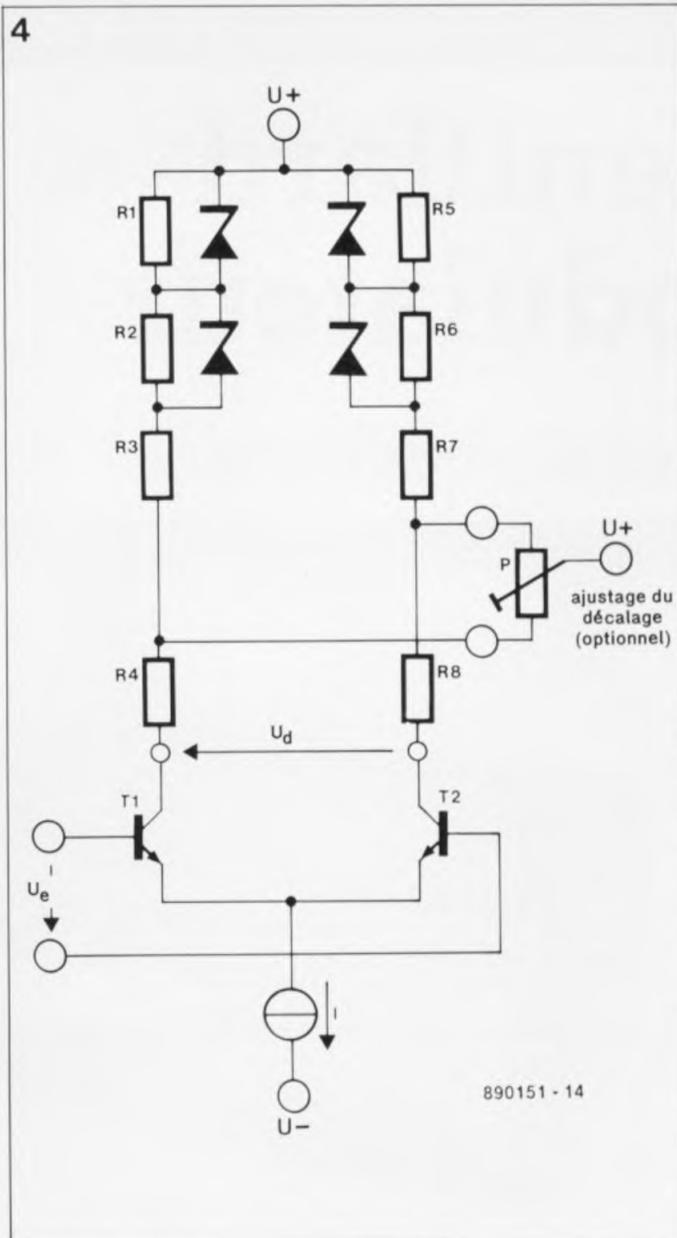


Figure 4. La tension de décalage de l'OP-07/OP-77 est réduite au minimum par un processus de destruction de diodes zener.

des transistors JFET, le courant d'entrée des bipolaires reste pratiquement constant sur toute la plage des températures de service.

Le courant d'entrée, aussi appelé courant de polarisation d'entrée (*input bias current*) dans le cas des amplificateurs opérationnels

Tableau 1

Catégorie	Caractéristiques principales	Type
Usage universel	faible coût	LM741, OP-02 (741 amélioré)
Puissance faible	faible courant de service < 1 mA	TLC271, OP-21
Puissance micro	très faible courant de service < 100 μ A	TLC271, OP-20
Vitesse élevée	Bande passante gain élevé Taux de montée élevé	LF356, CA3140, OP-15, OP-16
Précision élevée	Faible décalage d'entrée Gain en alternatif élevé Taux élevée de la réjection en mode commun	OP-07, OP-77 (OP-07 amélioré) OP-27 (faible bruit)

BIFET (bipolaires à entrées JFET), double à chaque fois que la température augmente de 10 degrés. Lorsqu'un amplificateur opérationnel BIFET, tel que le TL074 par exemple, atteint sa température de fonctionnement, son courant d'entrée est souvent plus élevé que celui que connaît un circuit bipolaire de bonne qualité. En raison de la présence de diodes de protection intégrées, le courant d'entrée d'un amplificateur opérationnel BIMOS (entrées MOSFET et sortie bipolaire), tel que le CA3140, dépend également de sa température de fonctionnement. Ceci n'implique en rien que l'utilisation de ce type d'amplificateurs opérationnels ne comporte pas certains avantages. Outre un courant d'entrée très faible aux températures peu élevées, ces amplificateurs opérationnels présentent un taux de montée beaucoup plus important. L'amplificateur opérationnel BIFET OP-16 possède un taux de montée typique de 25 V/ μ s, il est donc 75 fois plus rapide que l'OP-07 ou le 741. L'utilisation de miroirs de courant a mené enfin à une réduction très importante du courant d'entrée de l'OP-07 par rapport au 741. En cas d'utilisation d'un amplificateur opérationnel du type 741, il faut tenir compte d'un courant de polarisation d'entrée de 500 nA au maximum, alors que cette valeur n'est que de 5 nA pour un OP-07.

Sélection

Il devrait être clair maintenant que ce sont les coûts et les caractéristiques techniques du circuit à réaliser qui déterminent quel amplificateur opérationnel choisir. Actuellement on pourrait distinguer 5 catégories d'applications. Les amplificateurs opérationnels qui figurent dans l'une ou l'autre de ces catégories possèdent chacun des caractéristiques optimisées très spécifiques. Pour vous faciliter le premier pas vers un bon choix, nous vous proposons, dans le **tableau 1**, les différentes catégories avec quelques exemples de types d'amplificateurs opérationnels convenables. ■