

# Chap.3 – Amplificateur Linéaire Intégré (ALI)

## 1. Impédances d'entrée et de sortie – Adaptation d'impédance

- 1.1. Définitions des impédances d'entrée et de sortie
- 1.2. Adaptation d'impédance

## 2. Modèle de l'ALI

- 2.1. Définition et intérêt des composants actifs
- 2.2. Présentation du composant A.O.
- 2.3. Schéma équivalent de l'AO : impédances entrée / sortie, FT passe-bas 1<sup>er</sup> ordre, saturations
- 2.4. Mise en évidence expérimentale de la vitesse limite de balayage (ou « slew rate »)

### Intro :

Les montages que l'on peut réaliser avec les dipôles R, L et C (filtres par exemple) ont un inconvénient majeur : leur comportement dépend du circuit que l'on branche en aval. Leur fonction de transfert est modifiée lorsqu'ils sont utilisés. On se propose de déterminer les conditions nécessaires pour que le comportement d'un montage ne dépende pas des circuits placés avant et après lui. On introduit pour cela les notions d'impédances d'entrée et de sortie. On présente alors un nouveau composant utile en électronique de commande : l'Amplificateur Linéaire Intégré. Les propriétés de ce composant actif permettent « d'adapter les impédances » de manière à rendre les différents blocs d'un circuit indépendants les uns des autres.

## 1. Impédances d'entrée et de sortie – Adaptation d'impédance

La notion d'impédance d'entrée / de sortie est à la marge du programme. Aucune connaissance générale n'est exigible, mais une introduction à cette notion est nécessaire pour comprendre ce qui va suivre. On s'intéresse dans cette partie aux circuits linéaires en régime sinusoïdal forcé.

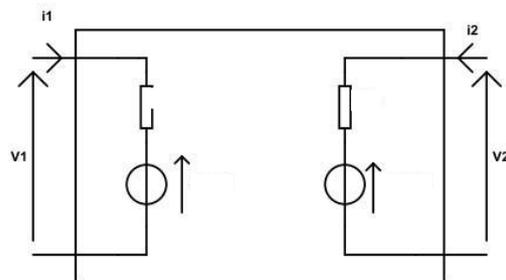
### 1.1. Définitions des impédances d'entrée et de sortie

Le Théorème de Thévenin (hors programme) stipule qu'entre deux bornes d'un circuit *linéaire*, on peut toujours modéliser la portion de circuit située entre ces deux bornes par un générateur de Thévenin (source idéale de tension sinusoïdale et impédance en série).

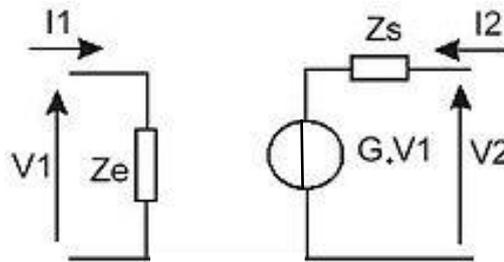
Un quadripôle – par exemple un filtre RC – peut être modélisé de la sorte :

- vu depuis l'amont, i.e. depuis le circuit situé avant ses deux bornes d'entrée
- vu depuis l'aval, i.e. depuis le circuit situé après ses deux bornes de sortie

Par conséquent, tout quadripôle linéaire admet comme schéma équivalent :



Dans les cas que l'on étudiera, la source idéale d'entrée est de tension nulle, et peut donc être remplacée par un fil.



**Impédances d'entrée et de sortie**  
(le quadripôle étant débranché du reste du circuit)

On définit l'impédance d'entrée  $Z_e$  comme l'impédance du générateur de Thévenin équivalent situé en entrée.  
On définit l'impédance de sortie  $Z_s$  comme l'impédance du générateur de Thévenin équivalent situé en sortie

La partie réelle de l'impédance d'entrée (resp. de sortie) est qualifiée de résistance d'entrée (resp. de sortie). A notre niveau, on verra que l'on ne s'intéressera qu'au module des impédances d'entrée / sortie, laissant de côté leur argument. Si l'on parle abusivement de « grande impédance d'entrée », on parle en réalité d'« impédance d'entrée de grand module ».

**Comment déterminer l'impédance d'entrée  $Z_e$  ?**

Le quadripôle étant déconnecté du reste du circuit, il s'agit de déterminer le rapport :

$$\frac{\text{tension d'entrée}}{\text{courant d'entrée}}$$

en fonction des données sur le circuit réel (modélisé sur le schéma par l'impédance  $Z_e$ )

- ❖ Déterminer l'impédance d'entrée du filtre passe-bas RC série, la sortie du filtre étant en circuit ouvert

Remarque : la détermination de l'impédance de sortie n'est pas au programme

## 1.2. Adaptation d'impédance

En électronique de *commande*, on branche ensemble des blocs qui réalisent des opérations bien définies (filtrage, amplification de tension / de courant, sommation, multiplication, intégration, dérivation, etc.). Comme lorsqu'on exploite un schéma bloc en SII, on souhaite que le *comportement de chaque bloc ne soit pas influencé par les blocs voisins*. Avec le matériel couramment utilisé en TP, ce n'est généralement pas le cas !

Exemple : On dispose d'un GBF délivrant une tension sinusoïdale d'amplitude  $E = 10\text{ V}$ . On souhaite alimenter une « résistance de charge »  $R_{ch}$  avec ce générateur (une ampoule par exemple). L'ampoule ne fonctionne correctement qu'avec une tension égale à  $E$  à ses bornes.

- ❖ Donner le schéma équivalent du GBF, en précisant la valeur numérique de chaque constituant.
- ❖ A quelle condition sur  $R_{ch}$  le dispositif fonctionne-t-il correctement ?
- ❖ Identifier les résistances d'entrée et de sortie des deux dipôles impliqués.
- ❖ Quelle relation doivent vérifier les impédances d'entrée et de sortie pour que le dispositif fonctionne correctement ?

Manip : On peut vérifier en régime continu (cas particulier du régime sinusoïdal, à fréquence nulle) que la tension délivrée chute lorsque la résistance de charge devient trop petite. Comment déterminer rapidement la valeur de la résistance interne du GBF ?

**Notion d'adaptation d'impédance en électronique de commande**

On souhaite rendre indépendants les comportements de deux blocs branchés l'un après l'autre.  
L'impédance de sortie  $Z_s$  du bloc amont **est adaptée** à l'impédance d'entrée  $Z_e$  du bloc aval **lorsque  $Z_s \ll Z_e$** .

Exemple : On considère un quadripôle simple, un circuit RC série, filtre interposé entre un microphone et un haut-parleur. Le microphone est modélisé par une source idéale de tension. Le haut-parleur est modélisé par une résistance  $R_{HP}$ . On s'intéresse à l'adaptation d'impédance entre le filtre et le haut-parleur.

- ❖ Quelle condition doit vérifier  $R_{HP}$  pour que la FT du filtre ne soit pas significativement modifiée par  $R_{HP}$  ? En admettant que cette condition est équivalente à " $Z_{s\text{amont}} \ll Z_{e\text{aval}}$ ", donner  $Z_s$  du filtre RC
- ❖ Le microphone possède en réalité une résistance interne de  $100\ \Omega$ , on le modélise donc par un générateur de Thévenin. Est-il possible d'utiliser un filtre RC pour un haut-parleur de résistance arbitrairement petite ?

Ordres de grandeur de qq impédances d'entrée / sortie en TP :

- résistance de sortie du GBF =
- résistance d'entrée d'un voltmètre =
- impédance d'entrée d'un oscilloscope =

Remarque : En électronique de *puissance*, on préfère transférer le maximum de *puissance* d'un bloc à l'autre, quitte à ce que les comportements des blocs ne soient pas indépendants les uns des autres. On peut montrer que l'impédance de sortie  $Z_s$  du bloc amont est adaptée à l'impédance d'entrée  $Z_e$  du bloc aval lorsque  $Z_s = Z_e$ . Le critère « d'adaptation d'impédance » dépend de ce que l'on souhaite optimiser.

Remarque : On retrouvera la notion « d'adaptation d'impédance » lors de l'étude de la propagation des ondes (aspect « transfert maximal de puissance »). On comprendra notamment en quoi le gel utilisé lors d'une échographie réalise une adaptation d'impédance, permettant aux ondes ultrasonores de pénétrer à l'intérieur du corps, au lieu d'être intégralement réfléchies à l'interface air-corps.

## 2. Modèle de l'ALI

On peut imaginer plusieurs types d'ALI, notamment des amplificateurs en courant (comme le transistor). On présente ici le plus classique des ALI : l'Amplificateur Opérationnel (AO). Étudié depuis des décennies en CPGE, c'est lui que vous rencontrerez le plus fréquemment.

### 2.1. Définition et intérêt des composants actifs

#### **Définition composant actif**

*Un composant est dit actif s'il reçoit de l'énergie depuis une source extérieure au circuit.*

Exemples :

- une alimentation stabilisée (ou un GBF) est branchée sur le secteur EDF
- un multiplieur est branché à une alimentation stabilisée  $+15 / -15\ \text{V}$  (idem pour l'AO)
- une photodiode reçoit de l'énergie lumineuse (délivre un courant proportionnelle à l'intensité lumineuse)
- une dynamo de vélo reçoit du travail mécanique (délivre tension proportionnelle à la vitesse de rotation)

#### **Intérêt des composants actifs en électronique**

*Les composants actifs fréquemment utilisés en électronique permettent d'obtenir :  
de grandes impédances d'entrée et de faibles impédances de sortie.*

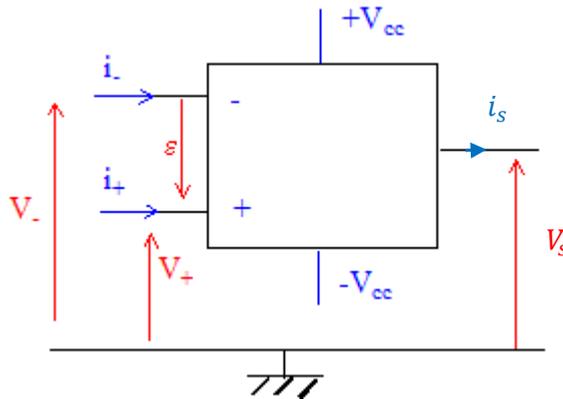
Remarque : Les quadripôles actifs que nous utiliserons souvent en TP (AO et multiplieur) vérifient bien cette propriété. Par contre, tous les exemples cités ci-dessus ne la vérifient pas. Le fait, par exemple, qu'une photodiode ou qu'une dynamo de vélo soient des composants actifs possèdent d'autres avantages.

## 2.2. Présentation du composant A.O.

Comme l'indique le schéma du composant, l'AO est un tripôle constitué :

- d'une *entrée dite non-inverseuse*, de potentiel  $V_+$  et de courant entrant  $i_+$
- d'une *entrée dite inverseuse*, de potentiel  $V_-$  et de courant entrant  $i_-$
- d'une *sortie*, de potentiel  $V_s$  et de courant sortant  $i_s$

La masse du circuit étant nécessaire pour définir une tension mesurable  $V_s$ , l'ensemble constitue un quadripôle.



Pour fonctionner, ce composant doit être branché à une alimentation stabilisée par l'intermédiaire de deux fils, délivrant respectivement une tension de +15 V par rapport à la masse et une tension de -15 V par rapport à la masse ( $V_{cc}$  sur le schéma). **L'AO est donc un composant actif**, puisqu'il reçoit de l'énergie depuis une source de tension extérieure au circuit considéré.

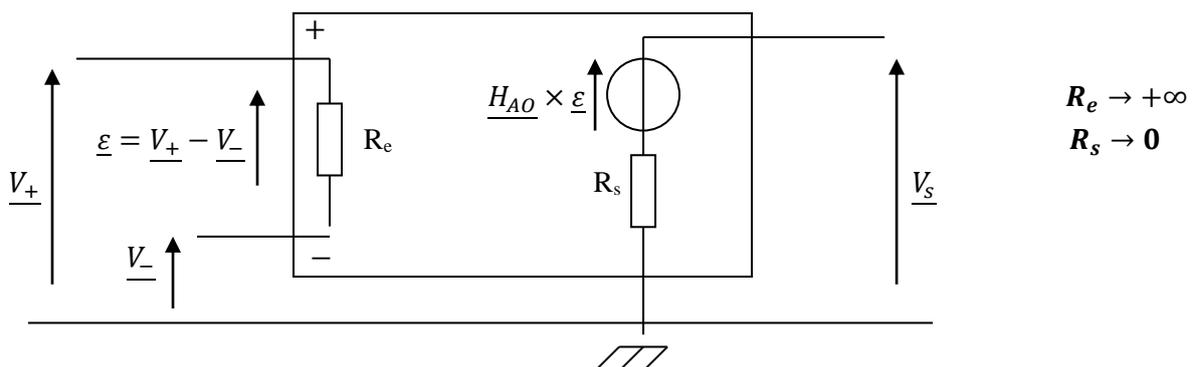
On retiendra le schéma simplifié de l'AO, où l'on ne fait pas figurer les branchements à la source +15 / -15 V.

### **Attention : pas de loi des nœuds en sortie de l'AO**

Puisqu'on ne représente pas les courants délivrés par l'alim +15/-15, on ne peut pas appliquer la loi des nœuds à la sortie de l'AO !!

Ce qui est équivalent à dire que le fonctionnement interne de l'AO ne contraint aucunement la valeur de  $i_s$ .

## 2.3. Schéma équivalent de l'AO : impédances entrée / sortie, FT passe-bas 1<sup>er</sup> ordre, saturations



### **Modèle d'ALI au programme de PSI**

- *résistance d'entrée infinie*  $\Rightarrow$  les courants d'entrée  $i_+$  et  $i_-$  sont nuls (de l'ordre du pA – nA en réalité)
- *résistance de sortie nulle*  $\Rightarrow$  la tension  $V_s$  ne dépend pas de la charge (i.e. du circuit placé en aval)
- existence d'un *régime linéaire* : la fonction de transfert  $H_{AO}$  est un *passe-bas* du 1<sup>er</sup> ordre
- existence d'un *régime saturé en tension* : l'amplitude  $V_s$  ne peut dépasser une valeur notée  $V_{sat}$
- existence d'une *saturation en courant* : l'amplitude  $i_s$  ne peut dépasser une valeur notée  $i_{sat}$

Puisque  $R_s = 0$  :

$$\underline{H_{AO}} \stackrel{\text{def}}{=} \frac{V_s}{\varepsilon}$$

Notation canonique de la FT passe-bas 1<sup>er</sup> ordre :

$$\underline{H_{AO}} = \frac{G_0}{1 + j \frac{\omega}{\omega_c}}$$

Ordres de grandeur :

- $V_{sat} \sim 15 \text{ V}$  :  $V_{sat}$  est du même ordre de grandeur que la tension  $V_{cc}$  d'alimentation continue de l'AO
- $i_{sat} \sim 40 \text{ mA}$  : l'AO ne convient pas à l'électronique de puissance, du fait des faibles courants délivrés
- $G_0 \sim 10^5$  : gain statique très élevé
- $\omega_c \sim 20 \text{ rad.s}^{-1} \Rightarrow f_c \sim 3 \text{ Hz} \Rightarrow \tau = \frac{1}{\omega_c} \sim 0,05 \text{ s}$  : fréquence de coupure très basse

❖ Retrouver ces valeurs sur la notice du TL081 donnée en fin de poly

Manip de cours : On branche le GBF sur l'entrée  $\varepsilon$  de l'AO. Le GBF délivre une tension sinusoïdale. On observe à l'oscilloscope les deux tensions  $\varepsilon(t)$  et  $V_s(t)$ , en mode balayage puis en mode XY, pour  $f = 10 \text{ Hz}$  et une amplitude d'entrée à  $8 \text{ V}$ .

❖ Expliquez les observations.

Conclusion : Si l'on souhaite utiliser l'AO en régime linéaire, on n'utilise jamais l'AO seul (i.e. en prenant  $\varepsilon$  comme entrée et  $V_s$  comme sortie). Le gain statique étant trop élevé, la tension de sortie sature dès que l'entrée différentielle  $\varepsilon(t)$  dépasse  $0,1 \text{ mV}$ . On verra dans le prochain chapitre que c'est en réalisant un système bouclé par une rétroaction sur la borne inverseuse de l'AO que l'on réalisera des montages linéaires utilisables en pratique, i.e. avec une bande passante plus large et un gain plus faible.

## 2.4. Mise en évidence expérimentale de la vitesse limite de balayage (ou « slew rate »)

Manip de cours : On branche le GBF sur l'entrée  $\varepsilon$  de l'AO. Le GBF délivre une tension sinusoïdale d'amplitude  $8 \text{ V}$  et de fréquence  $10^4 \text{ Hz}$ .

- ❖ Que devrait-on observer en sortie ?
- ❖ Qu'observe-t-on en réalité ?

On observe que les variations de la tension de sortie  $V_s(t)$  de l'AO ne peuvent être infiniment rapides.

### Vitesse limite de balayage (slew-rate)

$$\left| \frac{dV_s}{dt}(t) \right| < B_{max}$$
$$B_{max} \sim 10 \text{ V} \cdot \mu\text{s}^{-1}$$

Ce défaut se repère en TP lorsque le signal de sortie tend à « se **triangulariser** ».

où  $B_{max}$  est la *vitesse de balayage maximale*. La valeur numérique de cette vitesse de balayage dépend de la marque d'AO utilisé : retrouver sa valeur dans le cas du TL081.

Remarque : En plus des deux saturations et du slew-rate, il existe d'autres défauts : tension d'offset en entrée et courants de polarisation. Ils sont hors programme, mais nous serons amenés à discuter brièvement de l'offset.

Remarque générale sur ce chapitre : On rappelle que l'étude du régime sinusoïdal forcé n'est pas aussi restrictive qu'il n'y paraît, puisque grâce au principe de superposition et aux séries de Fourier, on peut transposer tous les résultats aux régimes périodiques non-sinusoïdaux. Bien que n'étant pas au programme, on rappelle aussi qu'en définitive les résultats peuvent être transposés aux régimes variables quelconques, grâce aux transformées de Fourier.

Le bloc 2 illustre quelques propriétés relatives à la rétroaction sur l'exemple de l'amplificateur linéaire intégré. L'identification de certains montages à des systèmes bouclés permet de faire le lien avec le cours d'automatique de Sciences Industrielles pour l'Ingénieur. L'étude des circuits est strictement limitée à des situations pouvant être facilement abordées avec les outils introduits en première année (loi des mailles, loi des nœuds, diviseur de tension). La vitesse limite de balayage de l'ALI est uniquement évoquée en TP afin d'identifier les distorsions harmoniques traduisant un comportement non linéaire. Les limitations associées aux courants de polarisation et la tension de décalage ne sont pas étudiées.

Notions et contenus	Capacités exigibles
<b>2. Rétroaction</b>	
Modèle de l'ALI défini par une résistance d'entrée infinie, une résistance de sortie nulle, une fonction de transfert du premier ordre en régime linéaire, une saturation de la tension de sortie, une saturation de l'intensité de sortie.	Citer les hypothèses du modèle et les ordres de grandeur du gain différentiel statique et du temps de réponse.
Limite en fréquence du fonctionnement linéaire.	<b>Identifier la manifestation de la vitesse limite de balayage d'un ALI dans un montage.</b>

## Notions clefs

### Savoirs :

- Modèle de l'ALI : schéma équivalent + propriétés + ordres de grandeur
- Vitesse limite de balayage : manifestation expérimentale + ordre de grandeur
- Critère pour une bonne adaptation d'impédance en électronique de commande
- Définition et intérêt des composants actifs
- Ordres de grandeur des impédances d'entrée et de sortie des appareils en TP
- 

### Savoirs faire :

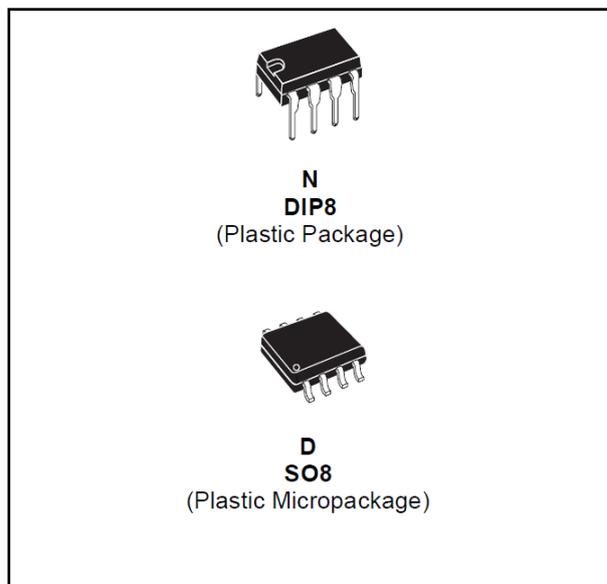
- Déterminer l'impédance d'entrée d'un montage

### *Animations + manip :*

- *Mise en évidence résistance de sortie du GBF : chute tension quand  $R_{ch}$  diminue*
- *Relation entrée-sortie AO (mode XY) : saturation en tension*
- *Mise en évidence du slew-rate : sinus HF en entrée, triangularisation en sortie*

### GENERAL PURPOSE J-FET SINGLE OPERATIONAL AMPLIFIERS

- WIDE COMMON-MODE (UP TO  $V_{CC}^+$ ) AND DIFFERENTIAL VOLTAGE RANGE
- LOW INPUT BIAS AND OFFSET CURRENT
- OUTPUT SHORT-CIRCUIT PROTECTION
- HIGH INPUT IMPEDANCE J-FET INPUT STAGE
- INTERNAL FREQUENCY COMPENSATION
- LATCH UP FREE OPERATION
- HIGH SLEW RATE :  $16V/\mu s$  (typ)

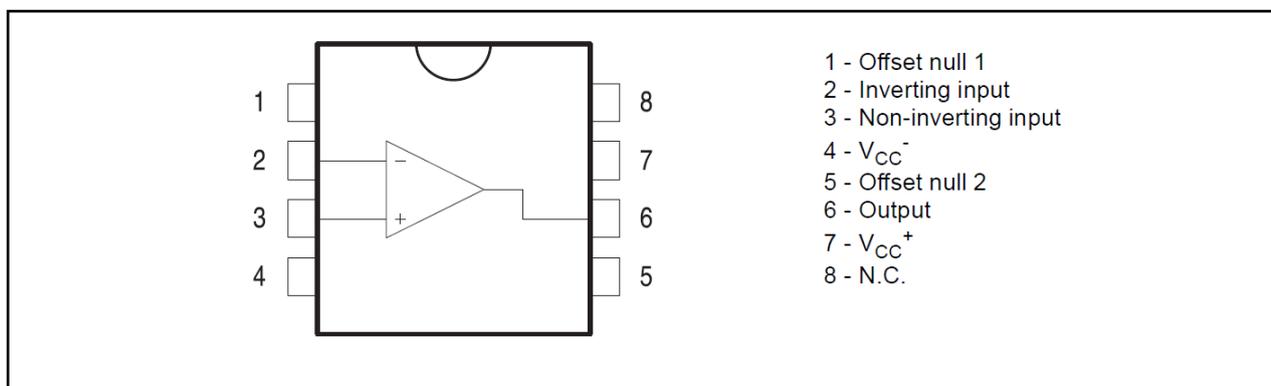


#### DESCRIPTION

The TL081, TL081A and TL081B are high speed J-FET input single operational amplifiers incorporating well matched, high voltage J-FET and bipolar transistors in a monolithic integrated circuit.

The devices feature high slew rates, low input bias and offset currents, and low offset voltage temperature coefficient.

#### PIN CONNECTIONS (top view)

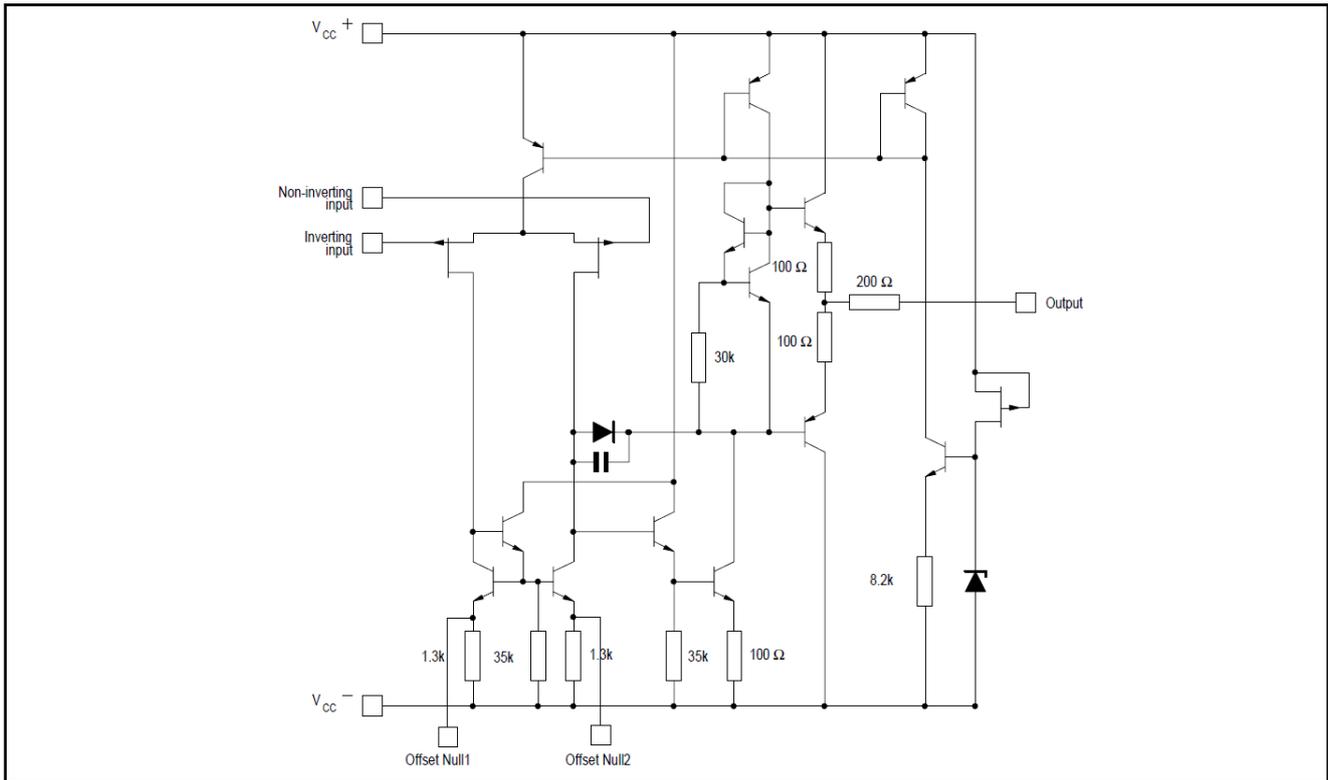


#### ORDER CODE

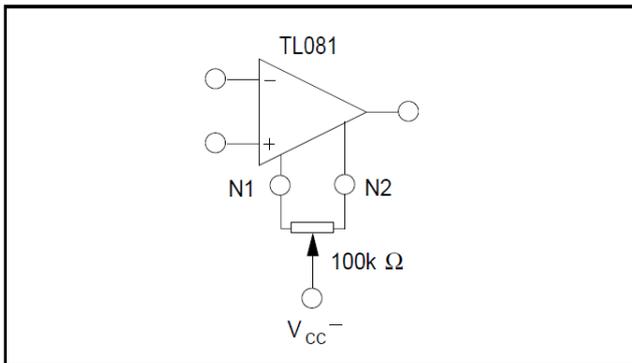
Part Number	Temperature Range	Package	
		N	D
TL081M/AM/BM	-55°C, +125°C	•	•
TL081I/AI/BI	-40°C, +105°C	•	•
TL081C/AC/BC	0°C, +70°C	•	•
<b>Example :</b> TL081CD, TL081IN			

N = Dual in Line Package (DIP)  
D = Small Outline Package (SO) - also available in Tape & Reel (DT)

**SCHEMATIC DIAGRAM**



**INPUT OFFSET VOLTAGE NULL CIRCUIT**



**ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS**

Symbol	Parameter	TL081M, AM, BM	TL081I, AI, BI	TL081C, AC, BC	Unit
$V_{CC}$	Supply voltage - note 1)	±18			V
$V_i$	Input Voltage - note 2)	±15			V
$V_{id}$	Differential Input Voltage - note 3)	±30			V
$P_{tot}$	Power Dissipation	680			mW
	Output Short-circuit Duration - note 4)	Infinite			
$T_{oper}$	Operating Free-air Temperature Range	-55 to +125	-40 to +105	0 to +70	°C
$T_{stg}$	Storage Temperature Range	-65 to +150			°C

1. All voltage values, except differential voltage, are with respect to the zero reference level (ground) of the supply voltages where the zero reference level is the midpoint between  $V_{CC}^+$  and  $V_{CC}^-$ .
2. The magnitude of the input voltage must never exceed the magnitude of the supply voltage or 15 volts, whichever is less.
3. Differential voltages are the non-inverting input terminal with respect to the inverting input terminal.
4. The output may be shorted to ground or to either supply. Temperature and/or supply voltages must be limited to ensure that the dissipation rating is not exceeded

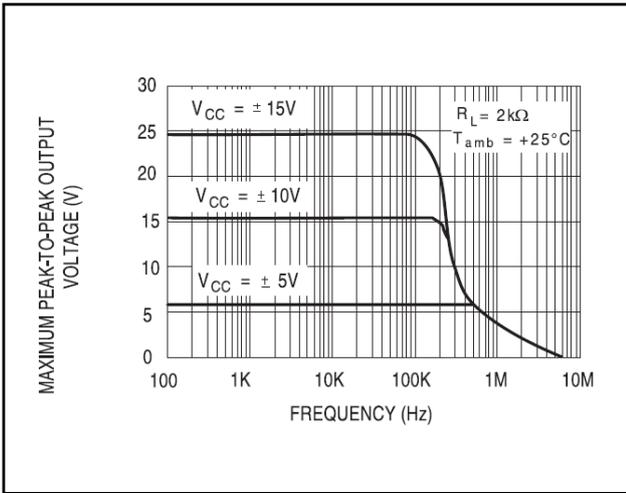


**ELECTRICAL CHARACTERISTICS**

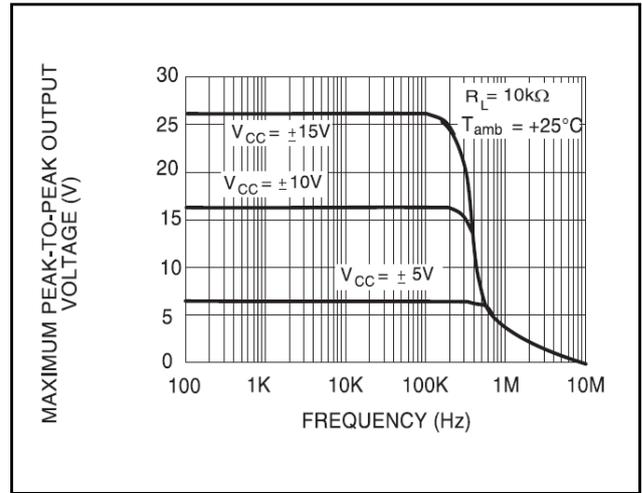
$V_{CC} = \pm 15V$ ,  $T_{amb} = +25^{\circ}C$  (unless otherwise specified)

Symbol	Parameter	TL081,M,AC,AI,AM,BC,BI,BM			TL081C			Unit
		Min.	Typ.	Max.	Min.	Typ.	Max.	
$V_{io}$	Input Offset Voltage ( $R_S = 50\Omega$ ) $T_{amb} = +25^{\circ}C$		3	10		3	10	mV
	$T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$	TL081 TL081A TL081B TL081 TL081A TL081B	3 3 1	6 3 13 7 5			13	
$DV_{io}$	Input Offset Voltage Drift		10			10		$\mu V/^{\circ}C$
$I_{io}$	Input Offset Current - note 1) $T_{amb} = +25^{\circ}C$		5	100		5	100	pA nA
	$T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$			4		10		
$I_{ib}$	Input Bias Current -note 1 $T_{amb} = +25^{\circ}C$		20	200		20	400	nA
	$T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$			20		20	20	
$A_{vd}$	Large Signal Voltage Gain ( $R_L = 2k\Omega$ , $V_o = \pm 10V$ ) $T_{amb} = +25^{\circ}C$	50	200		25	200		V/mV
	$T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$	25			15			
SVR	Supply Voltage Rejection Ratio ( $R_S = 50\Omega$ ) $T_{amb} = +25^{\circ}C$	80	86		70	86		dB
	$T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$	80			70			
$I_{CC}$	Supply Current, no load $T_{amb} = +25^{\circ}C$		1.4	2.5		1.4	2.5	mA
	$T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$			2.5		2.5		
$V_{icm}$	Input Common Mode Voltage Range	$\pm 11$	+15 -12		$\pm 11$	+15 -12		V
CMR	Common Mode Rejection Ratio ( $R_S = 50\Omega$ ) $T_{amb} = +25^{\circ}C$	80	86		70	86		dB
	$T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$	80			70			
$I_{os}$	Output Short-circuit Current $T_{amb} = +25^{\circ}C$	10	40	60	10	40	60	mA
	$T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$	10		60	10		60	
$\pm V_{opp}$	Output Voltage Swing $T_{amb} = +25^{\circ}C$							V
	$R_L = 2k\Omega$	10	12		10	12		
	$R_L = 10k\Omega$	12	13.5		12	13.5		
	$T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$							
SR	Slew Rate ( $T_{amb} = +25^{\circ}C$ ) $V_{in} = 10V$ , $R_L = 2k\Omega$ , $C_L = 100pF$ , unity gain	8	16		8	16		$V/\mu s$
$t_r$	Rise Time ( $T_{amb} = +25^{\circ}C$ ) $V_{in} = 20mV$ , $R_L = 2k\Omega$ , $C_L = 100pF$ , unity gain		0.1			0.1		$\mu s$
$K_{ov}$	Overshoot ( $T_{amb} = +25^{\circ}C$ ) $V_{in} = 20mV$ , $R_L = 2k\Omega$ , $C_L = 100pF$ , unity gain		10			10		%
GBP	Gain Bandwidth Product ( $T_{amb} = +25^{\circ}C$ ) $V_{in} = 10mV$ , $R_L = 2k\Omega$ , $C_L = 100pF$ , $f = 100kHz$	2.5	4		2.5	4		MHz
$R_i$	Input Resistance		$10^{12}$			$10^{12}$		$\Omega$

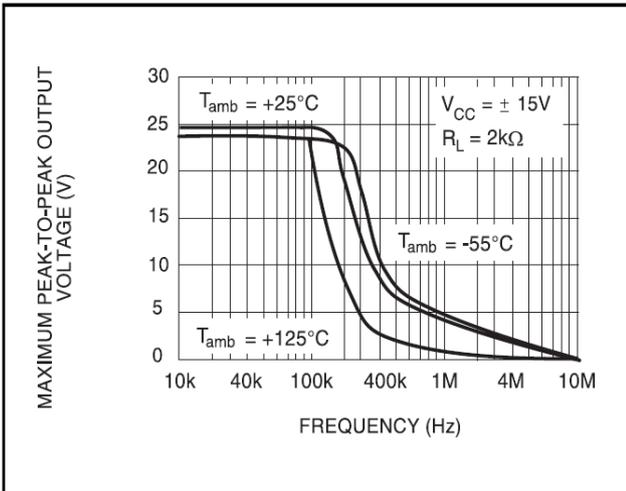
**MAXIMUM PEAK-TO-PEAK OUTPUT VOLTAGE versus FREQUENCY**



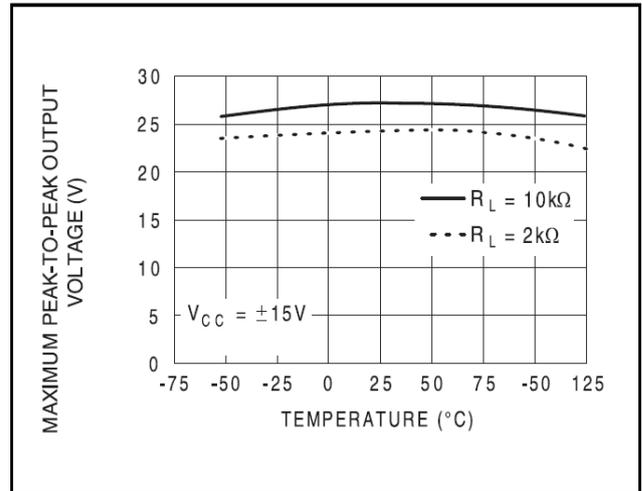
**MAXIMUM PEAK-TO-PEAK OUTPUT VOLTAGE versus FREQUENCY**



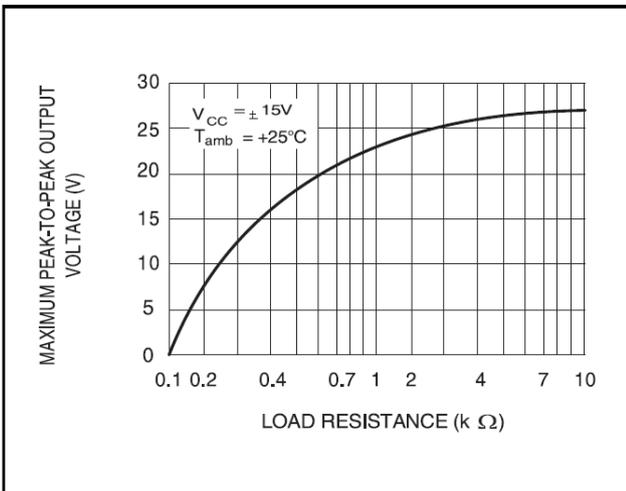
**MAXIMUM PEAK-TO-PEAK OUTPUT VOLTAGE versus FREQUENCY**



**MAXIMUM PEAK-TO-PEAK OUTPUT VOLTAGE versus FREE AIR TEMP.**



**MAXIMUM PEAK-TO-PEAK OUTPUT VOLTAGE versus LOAD RESISTANCE**



**MAXIMUM PEAK-TO-PEAK OUTPUT VOLTAGE versus SUPPLY VOLTAGE**

