



BLAISE PASCAL
PT 2019-2020

Chapitre 10 – Électronique

ALI et rétroaction

Au programme

Extrait du programme officiel : partie 2 « Électronique », bloc 2 « Rétroaction ».

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. 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 du système étudié.

Notions et contenus	Capacités exigibles
Modèle de l'ALI défini par des courants de polarisation nuls, 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. Modéliser un ALI fonctionnant en régime linéaire à l'aide d'un schéma bloc.
Montages amplificateur non inverseur et comparateur à hystérésis.	Analyser la stabilité du régime linéaire.
Vitesse de balayage.	Identifier la manifestation de la vitesse limite de balayage d'un ALI.
Cas limite d'un ALI idéal de gain infini en régime linéaire.	Identifier la présence d'une rétroaction sur la borne inverseuse comme un indice de fonctionnement en régime linéaire. Établir la relation entrée-sortie des montages non inverseur, suiveur, inverseur, intégrateur. Exprimer les impédances d'entrée de ces montages. Expliquer l'intérêt d'une forte impédance d'entrée pour une association en cascade d'étages à faible impédance de sortie.
Cas limite d'un ALI idéal de gain infini en régime saturé.	Établir la relation entrée-sortie du comparateur simple. Pour une entrée sinusoïdale, faire le lien entre la non linéarité du système et la génération d'harmoniques en sortie. Établir le cycle d'un comparateur à hystérésis. Définir le phénomène d'hystérésis en relation avec la notion de mémoire.

En **gras**, les points devant faire l'objet d'une approche expérimentale.

Au concours

- ▷ Écrit : épreuve A 2015, 2016, 2017, 2018, 2019 ... autant dire tous les ans !
- ▷ Oral : souvent.

Plan du cours

I	Amplificateur linéaire intégré	3
I.1	Le composant	3
I.2	Régimes linéaire et de saturation.	4
I.3	Vitesse de balayage	5
I.4	Modèle de l'ALI idéal de gain infini	6
II	Rétroaction	7
II.1	Approche qualitative.	7
II.2	Effet stabilisant d'une rétroaction négative : amplificateur non inverseur.	8
II.3	Effet déstabilisant d'une rétroaction positive : comparateur à hystérésis	8
III	Exemples de montages à ALI en régime linéaire	9
III.1	Suiveur	9
III.2	Amplificateur non inverseur	9
III.3	Amplificateur inverseur	9
III.4	Intégrateur	10
IV	Exemples de montages à ALI en régime de saturation	10
IV.1	Comparateur simple	10
IV.2	Comparateur à hystérésis non-inverseur.	10

Double objectif de ce chapitre :

- ▷ introduire un nouveau composant qui va permettre de réaliser des circuits électriques beaucoup plus riches qu'avec les seuls dipôles connus jusqu'à présent ;
- ▷ analyser sur des exemples l'influence de la rétroaction, en lien avec le cours d'automatique de SI.

I - Amplificateur linéaire intégré

I.1 - Le composant

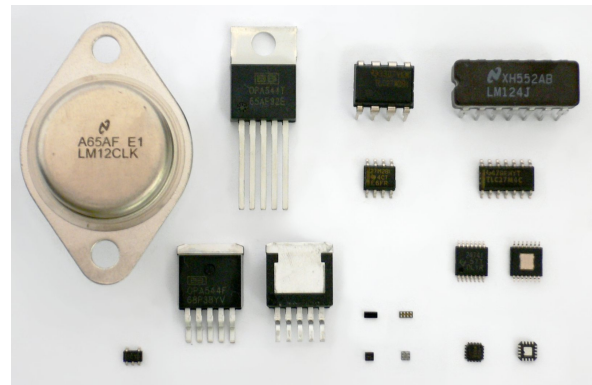
Il s'agit d'un amplificateur différentiel : il amplifie la différence de potentiel entre ses deux entrées appelées **entrée non inverseuse** \oplus et **entrée inverseuse** \ominus . C'est un quadripôle qui ne fonctionne que s'il est alimenté par une source de tension symétrique $\pm 15\text{ V}$.

Autres noms usuels : amplificateur opérationnel, « ampli op », AO, AOp, etc.

Remarque : Les ALI ont été développés dans les années 1940-1950 pour réaliser des opérations mathématiques dans les calculateurs analogiques : addition, intégration, etc. Certains exemples seront présentés dans ce chapitre. Le coût unitaire s'élevait à l'époque à une vingtaine de dollars, il n'est aujourd'hui que de quelques centimes.

a) Description

• Un ALI vu de l'extérieur



• Un ALI vu de l'intérieur

Un ALI est un **circuit intégré**, c'est-à-dire qu'il contient d'autres composants « élémentaires » (résistances, condensateurs, transistors). Le circuit intégré est donné dans la fiche technique (« datasheet ») du composant (cf. dernières pages).

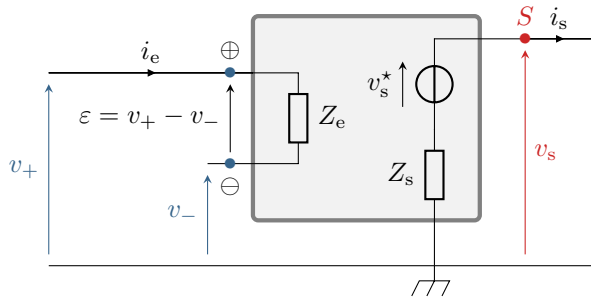
b) Représentation conventionnelle

Seules trois bornes sont représentées : les deux entrées et la sortie. L'alimentation continue n'est jamais représentée ... mais il ne faut pas l'oublier lorsque l'on branche un ALI!

Espace 1

🚫🚫🚫 **Attention !** Il faut absolument distinguer les deux bornes d'entrée qui jouent des rôles très différents.

c) Approche fonctionnelle



On adopte une approche de type bloc fonctionnel (autrement dit de boîte noire!) : le but n'est pas d'entrer dans les détails du circuit intégré. Un bloc fonctionnel est décrit par

- ▷ une relation entrée-sortie, c'est-à-dire ici entre v_s^* et ε ;
- ▷ son impédance (résistance) d'entrée Z_e ;
- ▷ son impédance (résistance) de sortie Z_s .

✂ Lecture de la fiche technique :

▷ Résistance d'entrée (« input resistance R_i ») :

Espace 2

↪ conséquence :

Espace 3

▷ Résistance de sortie : elle n'est pas mentionnée dans la fiche technique :

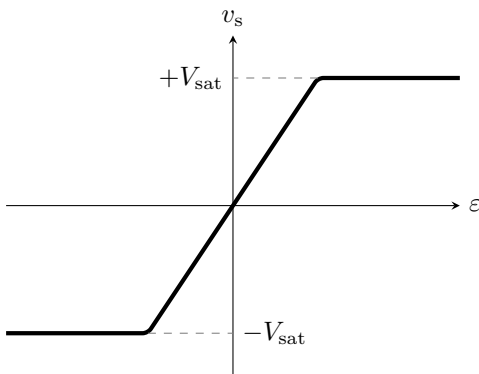
Espace 4

1.2 - Régimes linéaire et de saturation

La relation entrée-sortie est un peu plus compliquée qu'une simple fonction de transfert de filtre.

● **Saturation en tension**

On représente ci-dessous la **caractéristique statique** de l'ALI. La caractéristique statique représente v_s en fonction de ε en régime permanent continu, c'est-à-dire à fréquence nulle.



Espace 5

On peut donc distinguer deux régimes de fonctionnement :

▷ si $-V_{sat} < v_s < +V_{sat}$:

Espace 6

▷ si $v_s = \pm V_{sat}$:

Espace 7

• Saturation en courant

L'intensité de sortie de l'ALI est également limitée :

- ▷ si $-i_{\text{sat}} < i_s < +i_{\text{sat}}$, l'ALI peut fonctionner en régime linéaire sous réserve que la tension le permette ;
- ▷ si $i_s = \pm i_{\text{sat}}$, l'ALI est **saturé en courant** et la relation entrée-sortie n'est plus linéaire ... mais v_s est a priori quelconque.

Remarque : En pratique, dans les montages usuels, la saturation en courant est moins contraignante que la saturation en tension.

✂ Lecture de la fiche technique : (« output short circuit current I_{os} »)

Espace 8

• Fonction de transfert du premier ordre en régime linéaire

Dans sa zone de fonctionnement linéaire et pour des fréquences inférieures à quelques MHz, l'ALI est bien décrit par une fonction de transfert passe-bas du premier ordre

$$\frac{H_{\text{ALI}}}{\varepsilon} = \frac{v_s}{v_e} = \frac{\mu_0}{1 + j \frac{f}{f_c}}$$

où μ_0 est le **gain statique** et f_c la **fréquence de coupure** de l'ALI (en boucle ouverte).

⚠ ⚠ ⚠ **Attention !** Une telle fonction de transfert n'est valable que dans la zone de fonctionnement linéaire.

Sens physique du gain statique :

Espace 9

✂ Lecture de la fiche technique :

- ▷ Gain statique (« large signal voltage gain A_{vd} ») :

Espace 10

- ▷ Fréquence de coupure : la fréquence de coupure est égale à la bande passante pour un passe-bas du premier ordre. Elle est donnée par l'intermédiaire du produit gain bande (« gain bandwidth product GBP ») :

Espace 11

1.3 - Vitesse de balayage

Le comportement dynamique de l'ALI n'est pas seulement caractérisé par sa fréquence de coupure en boucle ouverte f_c , mais les variations de la tension de sortie sont également contraintes par une limitation non-linéaire appelée **vitesse de balayage** ou **slew rate** dans la dénomination anglaise.

✂ Lecture de la fiche technique :

Espace 12

Sens physique du slew rate :

Espace 13

I.4 - Modèle de l'ALI idéal de gain infini

Largeur du domaine linéaire :

Espace 14

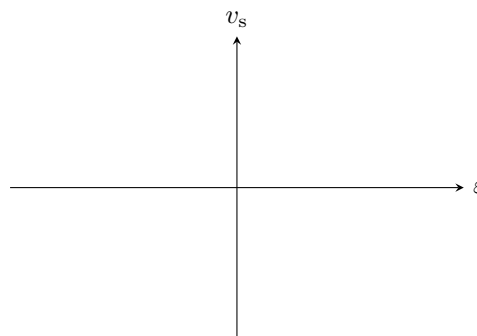
Ordre de grandeur du bruit électronique :

Espace 15

↪ le régime linéaire n'est pas accessible en boucle ouverte, et en pratique il ne l'est que si on impose $\varepsilon = 0$ par une rétroaction adaptée.

↪ tout se passe comme si $\mu_0 = \infty$: **modèle de l'ALI de gain infini**.

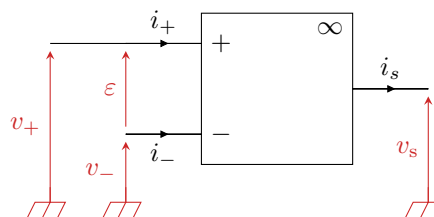
Caractéristique statique dans le modèle de gain infini :



Modèle de l'ALI idéal de gain infini :

- ▷ sa résistance d'entrée est infinie, et donc les courants de polarisation i_+ et i_- sont nuls ;
- ▷ sa résistance de sortie est nulle, et donc le courant de sortie i_s indépendant de la tension de sortie v_s ;
- ▷ sa tension de sortie est limitée à $\pm V_{\text{sat}}$ avec $V_{\text{sat}} \lesssim 15 \text{ V}$ et saturation au delà ;
- ▷ son courant de sortie est limité à $i_{\text{sat}} \simeq 40 \text{ mA}$ et saturation au delà ;
- ▷ son slew rate est infini, et donc sa réponse est instantanée ;
- ▷ relation entrée-sortie en régime linéaire :

$$\varepsilon = 0 \quad \text{tant que} \quad -V_{\text{sat}} < v_s < V_{\text{sat}} .$$



⚠ ⚠ ⚠ **Attention !** Ne pas confondre le modèle de l'ALI idéal avec le fonctionnement linéaire : un ALI idéal peut fonctionner en régime de saturation, de même qu'un ALI « réel » peut fonctionner en régime linéaire.

Sauf mention contraire dans un exercice, c'est le modèle d'ALI idéal de gain infini qui est implicitement utilisé.

Remarque : Le modèle d'ALI idéal de gain infini contient d'autres hypothèses, qui ne sont pas abordées dans le cours de PT. En revanche, nous rencontrerons certaines de ces limitations en TP, en particulier la tension d'offset : en régime linéaire $\varepsilon = V_{\text{offset}} \neq 0$, très faible mais non nulle.

II - Rétroaction

II.1 - Approche qualitative

a) Définition

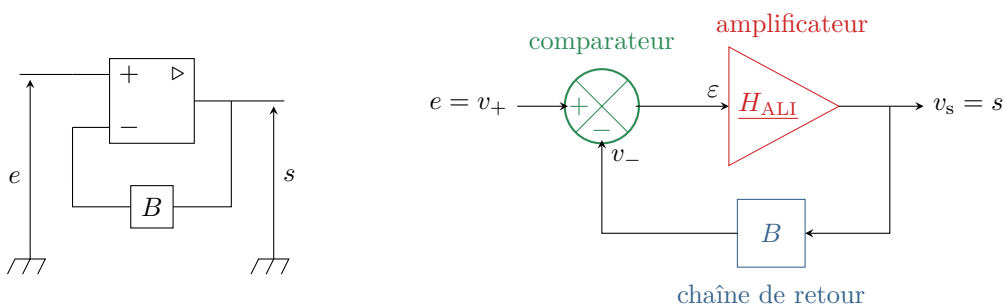


On appelle **boucle de rétroaction** ou **chaîne de retour** un dispositif par lequel le signal de sortie d'un système affecte le signal d'entrée. Le système est alors dit **bouclé**.

Remarque : La notion de rétroaction se voit naturellement en électronique, mais est en fait beaucoup plus générale. Par exemple, le système climatique terrestre est soumis à de nombreuses rétroactions.

Ici, cela consiste à relier la borne de sortie de l'ALI par un dipôle ou une association de dipôles à l'une ou l'autre des bornes d'entrée. La rétroaction est dite **négative** si elle se fait sur l'entrée \ominus (c'est le cas sur le schéma ci-dessous) et **positive** si elle a lieu sur l'entrée \oplus . Selon la borne choisie, les effets de la rétroaction sont très différents !

En termes de schéma bloc, un ALI bouclé se décrit comme un comparateur et un amplificateur qui modélisent l'ALI lui-même, et une chaîne de retour de fonction de transfert B .



b) Effet qualitatif de la rétroaction

Dans le cas où B est réel positif (et uniquement dans ce cas!) on peut simplement comprendre la différence entre les deux rétroactions. Raisonnons à entrée e fixée : la valeur de la sortie s est donc normalement fixée également. Imaginons que s augmente sous l'effet d'une perturbation à l'intérieur du système (bruit électronique, etc.). Comment le système va-t-il réagir ?

- Cas d'une rétroaction négative

Espace 16



De façon générale, une rétroaction sur la borne \ominus a un effet stabilisant : tous ALI fonctionnant en régime linéaire ont une rétroaction négative.

Remarque : La réciproque est souvent vraie mais pas toujours, à cause de la saturation en sortie : si v_s atteint V_{sat} alors l'ALI passe forcément en régime de saturation quelle que soit la rétroaction.

- Cas d'une rétroaction positive

Espace 17



De façon générale, une rétroaction sur la borne \oplus a un effet déstabilisant : tous les ALI qui n'ont qu'une rétroaction positive fonctionnent en régime de saturation.

- **Absence de rétroaction**

La plage de fonctionnement linéaire est tellement étroite qu'en pratique un ALI sans rétroaction fonctionne en régime de saturation.

- **Cas d'une double rétroaction :**

Certains montages possèdent deux boucles de rétroaction sur les deux bornes \oplus et \ominus : on dit alors qu'il y a **compétition de rétroaction**, et on ne peut pas prévoir simplement le régime de fonctionnement de l'ALI.

c) Rappel des critères de stabilité

Pour confirmer cette approche qualitative, nous allons étudier analytiquement la stabilité de deux montages identiques ... à la rétroaction près.

Rappelons que dans un cas (presque) général, l'équation différentielle et la fonction de transfert harmonique d'un SLCI s'écrivent

$$\sum_{n=0}^N a_n \frac{d^n s}{dt^n} = \sum_{k=0}^K b_k \frac{d^k e}{dt^k} \quad \longleftrightarrow \quad \underline{H}(j\omega) = \frac{\sum_{k=0}^K b_k (j\omega)^k}{\sum_{n=0}^N a_n (j\omega)^n}.$$

Le membre de gauche « sortie » de l'équation différentielle donne le dénominateur de la fonction de transfert, et le membre de droite « entrée » en donne le numérateur.

Rappelons le résultat suivant, établi dans le cours sur les systèmes linéaires :

Critère de stabilité d'un système linéaire d'ordre 1 ou 2 :

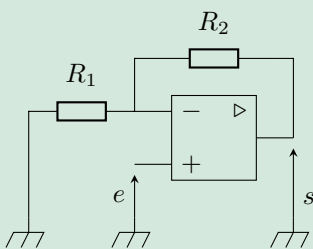


Espace 18

Si ce n'est pas le cas, le système est instable et il ne peut fonctionner en régime linéaire.

II.2 - Effet stabilisant d'une rétroaction négative : amplificateur non inverseur

Exercice C1 : Stabilité du régime linéaire en présence d'une rétroaction négative



On étudie la stabilité du régime linéaire dans le montage ci-contre, appelé amplificateur non inverseur. L'ALI est supposé idéal, et décrit par une fonction de transfert du premier ordre.

1 - Exprimer successivement v_- , v_+ puis écrire ε sous la forme

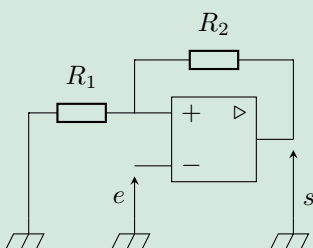
$$\varepsilon = e - Bs$$

en identifiant le gain B de la chaîne de retour.

2 - On suppose le régime linéaire, et on cherche à vérifier sa stabilité. Exprimer la fonction de transfert $\underline{H} = \underline{S}/\underline{E}$ du montage complet. Conclure.

II.3 - Effet déstabilisant d'une rétroaction positive : comparateur à hystérésis

Exercice C2 : (In)stabilité du régime linéaire en présence d'une rétroaction positive



On étudie la stabilité du régime linéaire dans le montage ci-contre, appelé comparateur à hystérésis. L'ALI est supposé idéal, et décrit par une fonction de transfert du premier ordre.

1 - Quelle différence y a-t-il entre ce montage et celui de l'exercice précédent ?

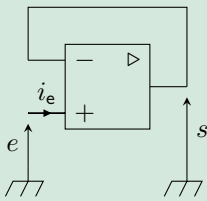
2 - Identifier le gain B de la chaîne de retour.

3 - Étudier la stabilité du montage.

III - Exemples de montages à ALI en régime linéaire

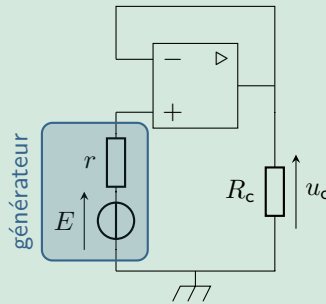
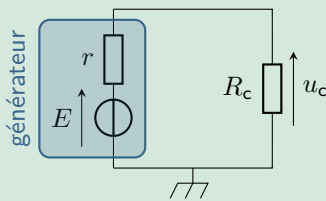
III.1 - Suiveur

Exercice C3 : Suiveur



Le montage suiveur est représenté ci-contre.

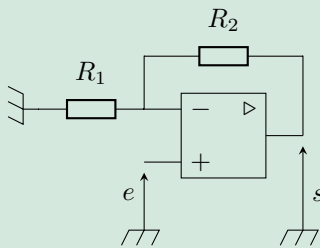
- 1 - Quel est le régime de fonctionnement probable de l'ALI ?
- 2 - Exprimer la relation entrée-sortie du montage. Commenter.
- 3 - Définir et exprimer l'impédance d'entrée du montage.



- 4 - Pour comprendre l'intérêt du suiveur, considérons la situation ci-dessous où l'on cherche à alimenter une résistance de charge R_c avec un générateur de fém E et de résistance interne r . Exprimer la tension u_c aux bornes de la charge avec et sans suiveur. Conclure sur l'intérêt du montage et la signification de l'impédance d'entrée.

III.2 - Amplificateur non inverseur

Exercice C4 : Amplificateur non-inverseur

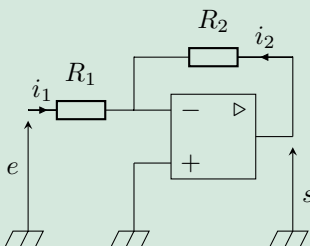


On étudie le montage amplificateur non-inverseur ci-contre.

- 1 - Quel est le régime de fonctionnement probable de l'ALI ?
- 2 - Établir la relation entrée-sortie du montage.
- 3 - Définir et exprimer l'impédance d'entrée du montage.

III.3 - Amplificateur inverseur

Exercice C5 : Amplificateur inverseur

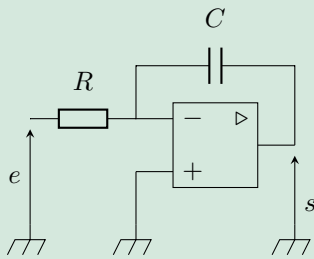


On étudie le montage amplificateur inverseur ci-contre.

- 1 - Quelle est la différence avec l'amplificateur non-inverseur étudié précédemment ?
- 2 - Quel est le régime de fonctionnement probable de l'ALI ?
- 3 - Exprimer la loi des nœuds en termes de potentiel à l'entrée inverseuse : l'écrire d'abord en fonction de i_1 et i_2 , puis des tensions aux bornes des résistances, et enfin des potentiels aux différents points pertinents.
- 4 - En déduire la relation entrée-sortie du montage.
- 5 - Définir et exprimer l'impédance d'entrée du montage. Commenter.

III.4 - Intégrateur

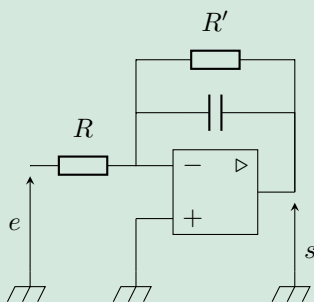
Exercice C6 : Intégrateur parfait



On étudie le montage intégrateur ci-contre.

- 1 - Quel est le régime de fonctionnement probable de l'ALI ?
- 2 - Est-il plus efficace d'utiliser un pont diviseur ou la loi des nœuds en termes de potentiel ? Est-il plus efficace d'utiliser une représentation temporelle ou fréquentielle des signaux ?
- 3 - Établir la relation entrée-sortie du montage dans les représentations fréquentielle et temporelle.
- 4 - Définir et exprimer l'impédance d'entrée du montage.

Exercice C7 : Pseudo-intégrateur



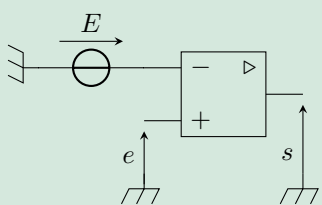
Le montage pseudo-intégrateur est une adaptation du montage intégrateur où une résistance R' est montée en parallèle du condensateur C .

- 1 - Établir la fonction de transfert du montage.
- 2 - Montrer que la fonction de transfert ne diverge plus à basse fréquence.
- 3 - Montrer que ce montage se comporte en intégrateur pour les signaux de haute fréquence.
- 4 - Dans quelle gamme de fréquence ce montage est-il utilisable en lieu et place du précédent ? Comment choisir la valeur de R' ?

IV - Exemples de montages à ALI en régime de saturation

IV.1 - Comparateur simple

Exercice C8 : Comparateur simple

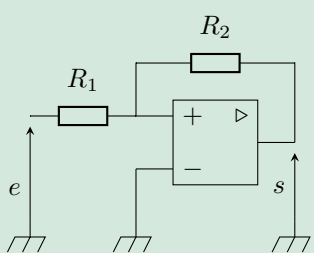


On étudie le montage comparateur simple ci-contre. La tension E , supposée constante pour simplifier, est imposée par un générateur extérieur.

- 1 - Quel est le régime de fonctionnement probable de l'ALI ?
- 2 - On suppose l'ALI en saturation haute. Établir la condition de bascule. Reprendre la question en supposant l'ALI en saturation basse. Conclure sur la relation entrée-sortie du montage.
- 3 - Représenter la relation entrée-sortie sur un diagramme s en fonction de e .
- 4 - On prend $E = 10\text{ V}$ et e un signal harmonique d'amplitude 20 V . Représenter graphiquement $e(t)$ et construire $s(t)$. Comparer le spectre des signaux d'entrée et de sortie.

IV.2 - Comparateur à hystérésis non-inverseur

Exercice C9 : Comparateur à hystérésis non-inverseur



On étudie le montage comparateur à hystérésis ci-contre.

- 1 - Quel est le régime de fonctionnement probable de l'ALI ?
- 2 - Exprimer ε en fonction de s et e sans préjuger de l'état de saturation de l'ALI.
- 3 - On suppose l'ALI en saturation haute. Établir la condition de bascule. Reprendre la question en supposant l'ALI en saturation basse.
- 4 - Représenter la relation entrée-sortie sur un diagramme entrée-sortie en indiquant le sens de parcours du cycle.
- 5 - On prend $R_1 = 2\text{ k}\Omega$, $R_2 = 3\text{ k}\Omega$ et e un signal harmonique d'amplitude 20 V . Représenter graphiquement $e(t)$ et construire $s(t)$. Commenter.

General purpose JFET single operational amplifiers

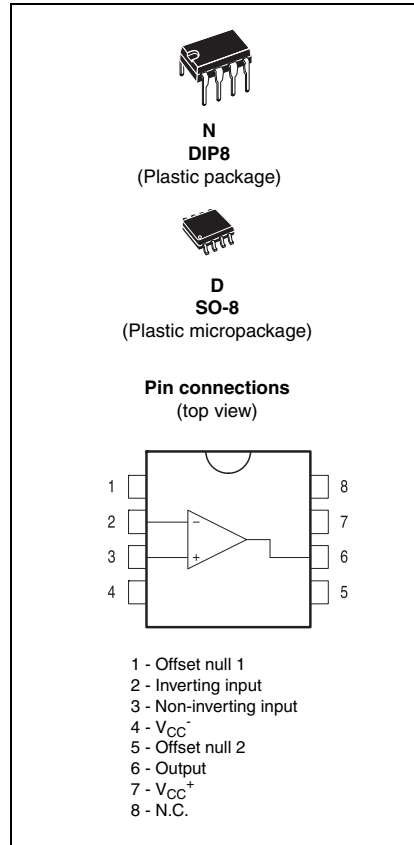
Features

- Wide common-mode (up to V_{CC}^+) and differential voltage range
- Low input bias and offset current
- Output short-circuit protection
- High input impedance JFET input stage
- Internal frequency compensation
- Latch-up free operation
- High slew rate: 16 V/ μ s (typ)

Description

The TL081, TL081A and TL081B are high-speed JFET input single operational amplifiers incorporating well matched, high-voltage JFET 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.



1 Schematic diagram

Figure 1. Schematic diagram

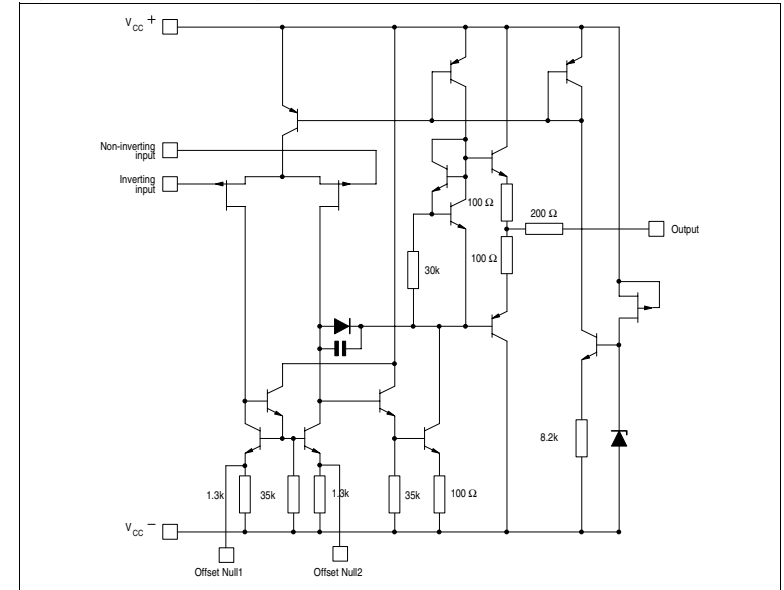
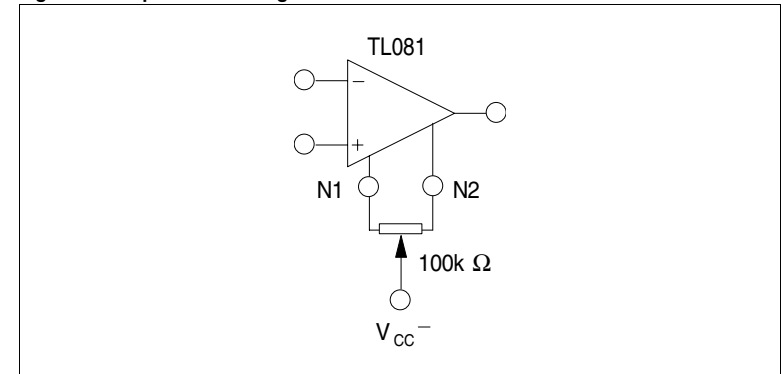


Figure 2. Input offset voltage null circuit



3 Electrical characteristics

Table 3. $V_{CC} = \pm 15V$, $T_{amb} = +25^\circ C$ (unless otherwise specified)

Symbol	Parameter	TL081, AC, AI, BC, BI			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
	TL081		3	6				
	TL081A		1	3				
	TL081B			13			13	
	$T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$			7				
	TL081A			5				
	TL081B							
DV_{io}	Input offset voltage drift		10			10		$\mu V/^\circ C$
I_{io}	Input offset current ⁽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 ⁽¹⁾ $T_{amb} = +25^\circ C$		20	200		20	400	nA
	$T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$			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	± 11	+15 -12		± 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 $T_{amb} = +25^\circ C$	10	12		10	12		V
	$R_L = 2k\Omega$	12	13.5		12	13.5		
	$R_L = 10k\Omega$							
	$T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$	10			10			
	$R_L = 2k\Omega$	12			12			
	$R_L = 10k\Omega$							
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/ μs

Table 3. $V_{CC} = \pm 15V$, $T_{amb} = +25^\circ C$ (unless otherwise specified) (continued)

Symbol	Parameter	TL081, AC, AI, BC, BI			TL081C			Unit
		Min.	Typ.	Max.	Min.	Typ.	Max.	
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		μs
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}		Ω
THD	Total harmonic distortion ($T_{amb} = +25^\circ C$), $F = 1kHz$, $R_L = 2k\Omega$, $C_L = 100pF$, $A_v = 20dB$, $V_o = 2V_{pp}$		0.01			0.01		%
e_n	Equivalent input noise voltage $R_S = 100\Omega$, $F = 1kHz$		15			15		$\frac{nV}{\sqrt{Hz}}$
ϕ_m	Phase margin		45			45		degrees

1. The input bias currents are junction leakage currents which approximately double for every $10^\circ C$ increase in the junction temperature.