

Électronique 2

Rétroaction

COMPÉTENCES

A la fin de ce chapitre, je saurai :

- Citer les hypothèses du modèle de l'ALI (résistance d'entrée infinie, résistance de sortie nulle, fonction de transfert du premier ordre en régime linéaire, une saturation de la tension de sortie) et les ordres de grandeur du gain différentiel statique et du temps de réponse.
- Citer les limites du modèle : vitesse limite de balayage, saturation de l'intensité du courant de sortie.
- Pour le montage amplificateur non inverseur
 - Analyser la stabilité du régime linéaire.
 - Établir la conservation du produit gain-bande passante.
- Analyser la stabilité du montage comparateur à hystérésis.
- Identifier la présence d'une rétroaction sur la borne inverseuse comme un indice de probable stabilité du régime linéaire.
- Établir la relation entrée-sortie et l'impédance d'entrée des montages non inverseur, suiveur, inverseur et intégrateur.
- Expliquer l'intérêt, pour garantir leur fonctionnement lors de mises en cascade, de réaliser des filtres de tension de forte impédance d'entrée et de faible impédance de sortie.
- Identifier l'absence de rétroaction ou la présence d'une unique rétroaction sur la borne non inverseuse comme l'indice d'un probable comportement en saturation.
- Établir la relation entrée-sortie d'un comparateur simple.
- Associer, pour un signal d'entrée sinusoïdal, le caractère non-linéaire du système et la génération d'harmoniques en sortie.
- Établir le cycle d'un comparateur à hystérésis.
- Décrire le phénomène d'hystérésis en relation avec la notion de fonction mémoire.

RÉSUMÉ DU COURS

1 Présentation de l'amplificateur linéaire intégré (ALI)

1.1 Découverte

L'ALI est aussi appelé amplificateur opérationnel.

L'ALI est un composant électronique actif¹, donc il doit être alimenté. L'alimentation de l'ALI est symétrique $+V_{cc}$, $-V_{cc}$. Souvent $V_{cc} = 15\text{ V}$.

SCHÉMA Symboles de l'ALI

1.2 Modèle de l'ALI

L'entrée différentielle est la différence de potentiel entre l'entrée non-inverseuse et l'entrée inverseuse : $\epsilon = V_+ - V_-$.

Fonction de transfert de l'ALI

Hypothèses

- Le régime est linéaire

$$A(p) = \frac{S(p)}{\epsilon(p)} = \frac{A_0}{1 + \tau p}$$

Avec

- $A(p)$ la fonction de transfert de l'ALI (sans unité)
- $S(p)$ la sortie de l'ALI (en V)
- $\epsilon(p)$ l'entrée différentielle de l'ALI (en V)
- $A_0 \sim 2 \times 10^5$ le gain statique (sans unité)
- $\tau \sim 1 \times 10^{-2}$ s le temps de réponse (en s)

La fréquence de coupure $\frac{1}{2\pi\tau} \sim 10\text{ Hz}$ est trop faible pour la plupart des applications et le gain est très élevé et ne peut pas être réglé. L'ALI ne peut donc pas être utilisé seul. On utilise l'ALI dans des montages permettant de surmonter ces limitations.

¹Un composant actif est un composant qui fournit de l'énergie au circuit dans lequel il est connecté.



La tension de sortie est bornée :

$$s(t) \in [-V_{sat}, V_{sat}]$$

Avec

- $s(t)$ la sortie de l'ALI (en V)
- $V_{sat} \approx V_{cc}$ la tension de saturation (en V)

Résistance d'entrée La résistance d'entrée est très élevée sur les deux entrées. Le courant d'entrée $i_e = \frac{e}{R}$ est donc très faible.

APPLICATION



Déterminer le courant d'entrée pour l'entrée maximale admissible.

Résistance de sortie La résistance de sortie est très faible. La tension de sortie est donc indépendant du courant de sortie.

1.3 Limitations du modèle de l'ALI

Le modèle présenté dans la partie précédente a des limites.

Vitesse de balayage La dérivée de la tension de sortie est bornée à une valeur appelée **vitesse de balayage** (slew rate en anglais). La tension de sortie ne peut pas croître ou décroître plus rapidement que la vitesse de balayage.

APPLICATION



Que vaut la vitesse de balayage pour l'ALI utilisé en TP ?

Courant de sortie Le courant de sortie est borné et peut donc saturer.

APPLICATION



Quelle résistance peut-on mettre en sortie de l'ALI utilisé en TP tout en restant sûr que le courant de sortie ne sature pas.

2 L'ALI dans un montage avec rétroaction négative.

2.1 Notion de rétroaction

La rétroaction est la prise en compte de la sortie d'un système à son entrée. Le système est alors bouclé.

EXEMPLE

Je fais du vélo au milieu d'une route droite. J'observe ma trajectoire. Je vois que je suis un peu trop à droite. Deux options s'offrent à moi :

- Je peux commander à mon vélo d'aller vers la gauche. Il s'agit d'une rétroaction négative : elle tend à annuler les variations de la sortie. Je vais me rapprocher du milieu de la route.
- Je peux commander à mon vélo d'aller vers la droite. Il s'agit d'une rétroaction positive : elle tend à amplifier les variations de la sortie. Je vais m'éloigner de plus en plus et de plus en plus vite du milieu de la route.





Une rétroaction négative suggère un fonctionnement stable. Une rétroaction positive ou une absence de rétroaction suggère un fonctionnement instable.

APPLICATION



Pour chacune des rétroactions suivantes, dire si elles sont positives ou négatives et dire si elles tendent à stabiliser ou déstabiliser le système.

- Plus il fait chaud, plus l'air contient de vapeur d'eau (qui est un gaz à effet de serre).
- Plus il fait chaud, plus il y a de nuages (qui bloquent une partie du rayonnement solaire).
- Le robinet thermostatique du radiateur s'ouvre davantage lorsqu'il fait froid.

2.2 Le montage amplificateur non-inverseur

Le montage étudié dans cette partie est couramment utilisé pour amplifier des signaux. Amplifier des signaux est une tâche très utile et très répandue.

EXEMPLE

Amplification d'un signal audio, d'un signal en provenance d'un instrument de mesure, ...

SCHÉMA Montage du montage amplificateur non-inverseur

Hypothèses

- circuit dans l'ARQS
- ALI en régime linéaire

Avec

- $S(p)$ la sortie de l'amplificateur non-inverseur (en V)
- $E(p)$ la sortie de l'amplificateur non-inverseur (en V)
- $\epsilon(p)$ l'entrée différentielle de l'ALI (en V)
- A_0 le gain statique de l'ALI (sans unité)
- τ le temps de réponse de l'ALI (en s)
- R_1 et R_2 les résistances de l'amplificateur non-inverseur (en Ω)

SCHÉMA

*Hypothèses*

- circuit dans l'ARQS
- ALI en régime linéaire
- R_1 et R_2 du même ordre de grandeur

Avec

- $H(p) = \frac{S(p)}{E(p)}$ la fonction de transfert de l'amplificateur non-inverseur
- A_0 le gain statique de l'ALI (sans unité)
- τ le temps de réponse de l'ALI (en s)
- R_1 et R_2 les résistances de l'amplificateur non-inverseur (en Ω)

$$H(p) = \frac{1 + \frac{R_2}{R_1}}{1 + \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \frac{\tau}{A_0} p}$$

2.3 Stabilité

Le montage amplificateur non-inverseur est stable.

Si l'ALI est hors saturation, comme son gain est très grand, l'entrée différentielle est quasi-nulle.

Étude d'un montage stable



Hypothèses S'il y a une rétroaction négative

Avec

Le système est généralement stable
et $\epsilon \approx 0$

- ϵ l'entrée différentielle de l'ALI (en V)

2.4 Bande passante

Bande passante du montage amplificateur non-inverseur

Hypothèses

- circuit dans l'ARQS
- ALI en régime linéaire
- R_1 et R_2 du même ordre de grandeur

Avec

- $\Delta\omega$ la bande passante (en $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$)
- A_0 le gain statique de l'ALI (sans unité)
- τ le temps de réponse de l'ALI (en s)
- $H_0 = 1 + \frac{R_2}{R_1}$ le gain statique de l'amplificateur non-inverseur (sans unité)

$$\Delta\omega = \frac{A_0}{\tau H_0}$$

APPLICATION

Calculer la bande passante d'un amplificateur non-inverseur ayant un gain de 100 réalisé avec un ALI utilisé en TP.

La bande passante de l'amplificateur non-inverseur est considérablement plus grande que celle de l'ALI. Le gain de l'amplificateur non-inverseur peut être réglé par les résistances R_1 et R_2 . Ceci palie le défaut de l'ALI comme amplificateur.

Le produit gain bande-passante $H_0 \times \Delta\omega = \frac{A_0}{\tau}$ ne dépend que de l'ALI. Pour cette raison, le produit gain bande-passante figure sur la notice de l'ALI (*gain-bandwidth product*).

2.5 Impédance d'entrée

Impédance d'entrée

Avec

$$\underline{Z}_e = \frac{\underline{e}}{\underline{i}_e}$$

- \underline{Z}_e l'impédance d'entrée (en Ω)
- \underline{e} la tension d'entrée (en V)
- \underline{i}_e le courant d'entrée (en A)

APPLICATION

Déterminer l'impédance d'entrée de l'amplificateur non-inverseur.

Il est parfois nécessaire d'associer plusieurs filtres en cascade. Il est alors nécessaire que chaque filtre ne perturbe pas celui placé en amont et ne soit pas facilement perturbé par celui placé en aval. Pour cela, on cherche à concevoir des filtres ayant une impédance d'entrée élevée et une impédance de sortie faible.

3 L'ALI dans un montage avec rétroaction positive : le comparateur à hystérésis négatif.

3.1 Présentation du montage

SCHÉMA Montage comparateur à hystérésis négatif

3.2 Étude de la stabilité

Fonction de transfert du comparateur à hystérésis négatif

10

Hypothèses

- circuit dans l'ARQS
- ALI en régime linéaire
- R_1 et R_2 du même ordre de grandeur

Avec

- $H(p) = \frac{S(p)}{E(p)}$ la fonction de transfert du comparateur à hystérésis négatif
- A_0 le gain statique de l'ALI (sans unité)
- τ le temps de réponse de l'ALI (en s)
- R_1 et R_2 les résistances du comparateur à hystérésis (en Ω)

$$H(p) = \frac{1}{\frac{R_1}{R_1+R_2} - \frac{\tau}{A_0}p}$$

Le comparateur à hystérésis est un montage instable. Sa sortie diverge, ou plutôt atteint rapidement la saturation. Ainsi $s(t) = \pm V_{sat}$.

Étude d'un montage instable

♥

Hypothèses De manière générale, s'il y a une rétroaction positive ou pas de rétroaction

Le système est généralement instable et la sortie a deux valeurs possibles :

- si $\epsilon > 0$ alors $s(t) = V_{sat}$
- si $\epsilon < 0$ alors $s(t) = -V_{sat}$

Avec

- ϵ l'entrée différentielle de l'ALI (en V)
- $s(t)$ la sortie de l'ALI (en V)

Le comparateur à hystérésis n'étant pas un système linéaire, il ne peut pas être décrit par une fonction

de transfert.

3.3 Cycle d'hystérésis

Cycle d'hystérésis du comparateur à hystérésis négatif

11

SCHÉMA



Avec

- R_1 et R_2 les résistances du comparateur à hystérésis (en Ω)
- V_{sat} est la tension de saturation de l'ALI (en V)

3.4 Fonction mémoire

En physique, le mot « hystérésis » renvoie à la notion de mémoire : l'état du système ne dépend pas que de l'état actuel de l'entrée mais aussi de son état passé.

Effet mémoire du comparateur à hystérésis

12

- $e < -\frac{R_1}{R_1+R_2}V_{sat}$ force la sortie à V_{sat}
- $e > \frac{R_1}{R_1+R_2}V_{sat}$ force la sortie à $-V_{sat}$
- $e \in \left[-\frac{R_1}{R_1+R_2}V_{sat}, \frac{R_1}{R_1+R_2}V_{sat}\right]$ conserve la valeur précédente de la sortie (effet mémoire)

Avec

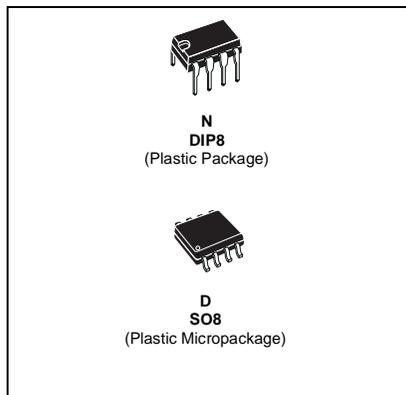
- R_1 et R_2 les résistances du comparateur à hystérésis (en Ω)
- V_{sat} la tension de saturation de l'ALI (en V)
- e l'entrée du comparateur à hystérésis négatif (en V)



TL081 TL081A - TL081B

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)

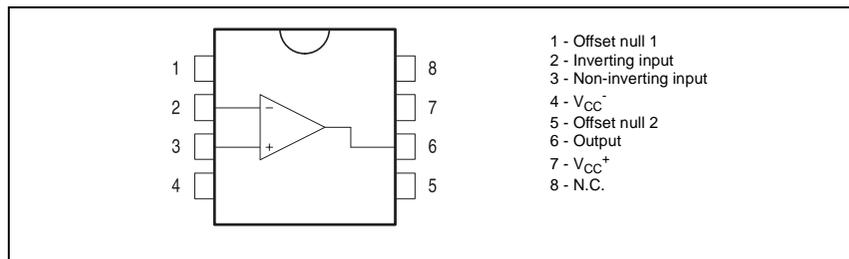


DESCRIPTION

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

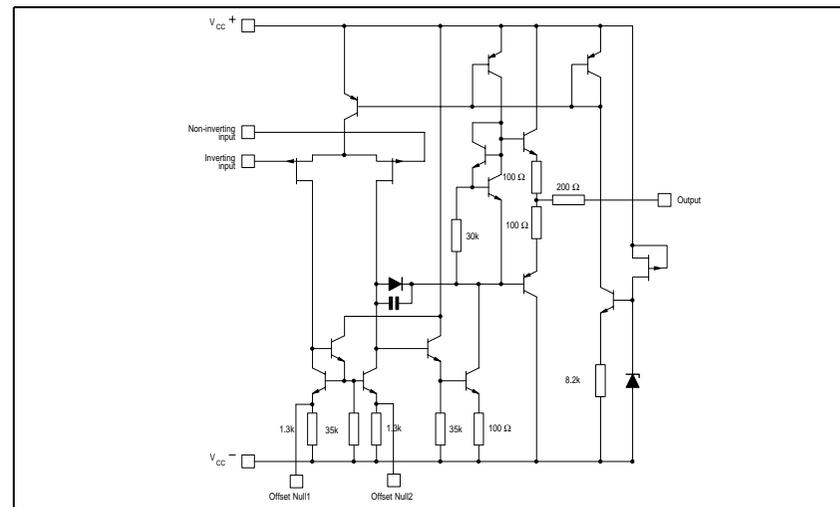
Part Number	Temperature Range	Package	
		N	D
TL081M/AM/BM	-55°C, +125°C	•	•
TL081I/AI/BI	-40°C, +105°C	•	•
TL081C/AC/BC	0°C, +70°C	•	•

Example : TL081CD, TL081IN

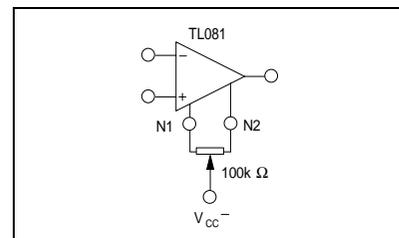
N = Dual In Line Package (DIP)
D = Small Outline Package (SO) - also available in Tape & Reel (DT)

TL081 - TL081A - TL081B

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.



TL081 - TL081A - TL081B

ELECTRICAL CHARACTERISTICS

V_{CC} = ±15V, T_{amb} = +25°C (unless otherwise specified)

Symbol	Parameter	TL0811,M,AC,AI,AM,BC,BI,BM			TL081C			Unit
		Min.	Typ.	Max.	Min.	Typ.	Max.	
V _{io}	Input Offset Voltage (R _S = 50Ω) T _{amb} = +25°C		3	10		3	10	mV
	TL081 TL081A TL081B		3 1	6 3				
	T _{min} ≤ T _{amb} ≤ T _{max}			13		7	13	
	TL081 TL081A TL081B			5				
DV _{io}	Input Offset Voltage Drift		10			10		μV/°C
I _{io}	Input Offset Current - note 1) T _{amb} = +25°C		5	100		5	100	pA nA
	T _{min} ≤ T _{amb} ≤ T _{max}			4			10	
I _{ib}	Input Bias Current -note 1 T _{amb} = +25°C		20	200		20	400	nA
	T _{min} ≤ T _{amb} ≤ T _{max}			20			20	
A _{vd}	Large Signal Voltage Gain (R _L = 2kΩ, V _o = ±10V) T _{amb} = +25°C	50	200		25	200		V/mV
	T _{min} ≤ T _{amb} ≤ T _{max}	25			15			
SVR	Supply Voltage Rejection Ratio (R _S = 50Ω) T _{amb} = +25°C	80	86		70	86		dB
	T _{min} ≤ T _{amb} ≤ T _{max}	80			70			
I _{CC}	Supply Current, no load T _{amb} = +25°C		1.4	2.5		1.4	2.5	mA
	T _{min} ≤ T _{amb} ≤ 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 = 50Ω) T _{amb} = +25°C	80	86		70	86		dB
	T _{min} ≤ T _{amb} ≤ T _{max}	80			70			
I _{os}	Output Short-circuit Current T _{amb} = +25°C	10	40	60	10	40	60	mA
	T _{min} ≤ T _{amb} ≤ T _{max}	10		60	10		60	
±V _{opp}	Output Voltage Swing T _{amb} = +25°C	10	12		10	12		V
	RL = 2kΩ	12	13.5		12	13.5		
	RL = 10kΩ	10			10			
	T _{min} ≤ T _{amb} ≤ T _{max}	12			12			
SR	Slew Rate (T _{amb} = +25°C) V _{in} = 10V, R _L = 2kΩ, C _L = 100pF, unity gain	8	16		8	16		V/μs
t _r	Rise Time (T _{amb} = +25°C) V _{in} = 20mV, R _L = 2kΩ, C _L = 100pF, unity gain		0.1			0.1		μs
K _{ov}	Overshoot (T _{amb} = +25°C) V _{in} = 20mV, R _L = 2kΩ, C _L = 100pF, unity gain		10			10		%
GBP	Gain Bandwidth Product (T _{amb} = +25°C) V _{in} = 10mV, R _L = 2kΩ, C _L = 100pF, f = 100kHz	2.5	4		2.5	4		MHz
R _i	Input Resistance		10 ¹²			10 ¹²		Ω

TL081 - TL081A - TL081B

Symbol	Parameter	TL0811,M,AC,AI,AM,BC,BI,BM			TL081C			Unit
		Min.	Typ.	Max.	Min.	Typ.	Max.	
THD	Total Harmonic Distortion (T _{amb} = +25°C), f = 1kHz, R _L = 2kΩ, C _L = 100pF, A _v = 20dB, V _o = 2V _{pp}		0.01			0.01		%
e _n	Equivalent Input Noise Voltage R _S = 100Ω, f = 1KHz		15			15		nV √Hz
∅m	Phase Margin		45			45		degrees

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

MÉTHODES

1 Identifier si les connections d'un ALI suggèrent un fonctionnement stable ou instable

1. Y a-t-il des composants ou des fils reliant la sortie et l'entrée non-inverseuse? Cela suggère un fonctionnement instable.
2. Y a-t-il des composants ou des fils reliant la sortie et l'entrée inverseuse? Cela suggère un fonctionnement stable.
3. S'il n'y a pas de composants ou de fils entre la sortie et les entrées, cela suggère un fonctionnement instable.

2 Déterminer la fonction de transfert d'un montage contenant un ALI en fonctionnement stable

1. Commencer par écrire $\epsilon = V_+ - V_- = 0$.
2. Souvent le théorème du pont diviseur de tension est utile. Si on ne peut pas l'utiliser, utiliser la loi des nœuds en tension.

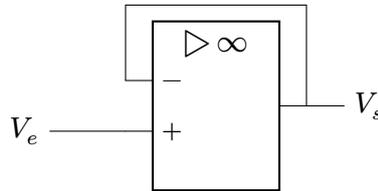
3 Déterminer la caractéristique (v_s, v_e) d'un montage contenant un ALI en fonctionnement instable

1. La sortie vaut soit V_{sat} soit $-V_{sat}$.
2. Pour savoir ce que vaut la sortie, il faut savoir si l'entrée différentielle $\epsilon = V_+ - V_-$ est positive ou négative.
3. Il est parfois nécessaire (pour les montages avec hystérésis) de supposer une valeur initiale pour la sortie.

TD

1 Montage suiveur

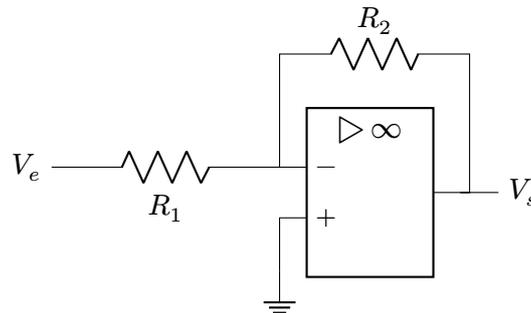
On considère le montage ci-dessous, appelé montage suiveur. L'ALI est supposé idéal.



1. L'ALI a-t-il un fonctionnement stable ou instable ?
2. Exprimer la fonction de transfert du montage. Justifier le nom du montage.
3. Exprimer l'impédance d'entrée du montage.

2 Montage amplificateur inverseur

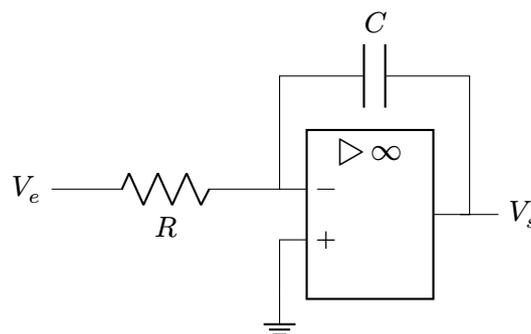
On considère le montage suivant, appelé montage amplificateur inverseur. L'ALI est supposé idéal.



1. L'ALI a-t-il un fonctionnement stable ou instable ?
2. Exprimer la fonction de transfert du montage. Justifier le nom du montage.
3. Exprimer l'impédance d'entrée du montage.

3 Montage intégrateur

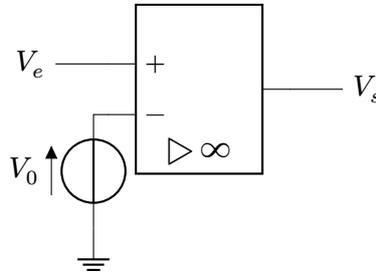
On considère le montage suivant, appelé montage intégrateur. L'ALI est supposé idéal.



1. L'ALI a-t-il un fonctionnement stable ou instable ?
2. Exprimer la fonction de transfert du montage. Tracer le diagramme de Bode.
3. À partir de la fonction de transfert, déterminer l'équation différentielle vérifiée par la tension de sortie et la tension d'entrée. Justifier le nom du montage.

4 Montage comparateur simple

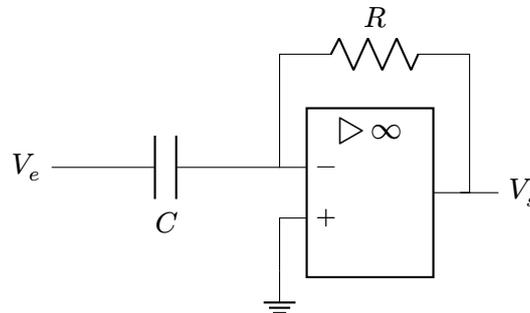
On s'intéresse au montage suivant, appelé montage comparateur simple. L'ALI est supposé idéal.



1. L'ALI a-t-il un fonctionnement stable ou instable ?
2. Dresser la caractéristique (V_s, V_e) du montage. Justifier le nom du montage.
3. Quelle est l'impédance d'entrée du montage.

5 Dérivateur

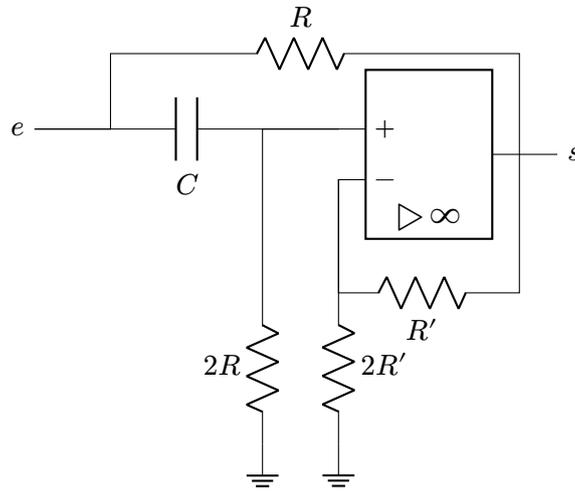
On s'intéresse au montage suivant, appelé montage dérivateur. L'ALI est supposé idéal.



1. L'ALI a-t-il un fonctionnement stable ou instable ?
2. Exprimer la fonction de transfert du montage. Tracer le diagramme de Bode.
3. À partir de la fonction de transfert, déterminer l'équation différentielle vérifiée par la tension de sortie et la tension d'entrée. Justifier le nom du montage.

6 Simulateur d'impédance

On s'intéresse au montage suivant. L'ALI est supposé idéal.

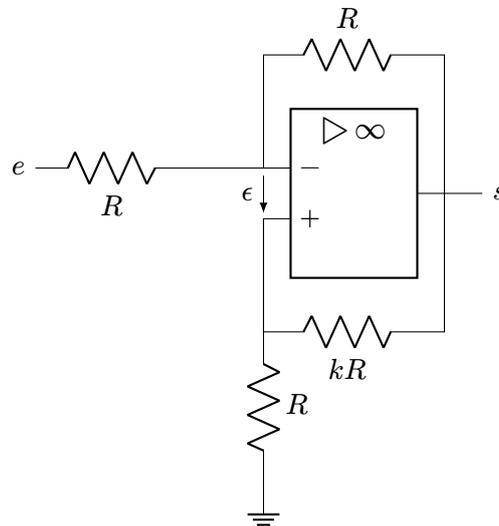


1. Le système a-t-il un fonctionnement stable ou instable ?
2. Déterminer la fonction de transfert du montage.
3. Calculer l'impédance d'entrée du montage. Démontrer que cette impédance est équivalente à celle d'une bobine réelle dont on précisera l'inductance L et la résistance r .

7 Compétition de rétroactions

On s'intéresse au montage ci-dessous. L'ALI est supposé **non idéal**, de fonction de transfert

$$H(p) = \frac{A_0}{1 + \tau p}$$



1. Établir la fonction de transfert du système.
2. Sous quelle condition sur k le système est-il stable ?