

Rétroaction

Extrait du programme

La partie 2.1 « Rétroaction » illustre quelques propriétés relatives à la rétroaction sur l'exemple de l'amplificateur linéaire intégré. 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 évoquée en travaux pratiques afin d'identifier les distorsions harmoniques traduisant un comportement non linéaire du système étudié. Les limitations associées aux courants de polarisation et la tension de décalage ne sont pas étudiées.

Notions et contenus	Capacités exigibles
2.1. Rétroaction	
Modèle de l'ALI parfait 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.	Citer les hypothèses du modèle et les ordres de grandeur du gain différentiel statique et du temps de réponse. Distinguer les différents régimes de fonctionnement.
Limites du modèle : vitesse limite de balayage, saturation de l'intensité du courant de sortie.	Détecter, dans un montage à ALI, les manifestations de la vitesse limite de balayage et de la saturation de l'intensité du courant de sortie.
ALI idéal (parfait de gain infini) en régime linéaire.	Identifier la présence d'une rétroaction sur la borne inverseuse comme un indice de stabilité du régime linéaire. Établir la relation entrée-sortie des montages non inverseur et suiveur. 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.
ALI idéal en régime saturé.	Établir la relation entrée-sortie du comparateur simple. Associer, pour une entrée sinusoïdale, le caractère non-linéaire du système et la génération d'harmoniques en sortie. Établir le cycle d'un comparateur à hystérésis.

Sommaire

EXTRAIT DU PROGRAMME	1
SOMMAIRE	2
1 MODELE DE L'ALI	3
1.1 COMPOSANT ELECTRONIQUE	3
1.2 PROPRIETES ESSENTIELLES	3
1.3 REGIMES DE FONCTIONNEMENT	5
1.4 MODELE IDEAL DE L'ALI	5
1.5 LIMITES DU MODELE.....	7
2 ALI IDEAL EN REGIME LINEAIRE	8
2.1 MONTAGE SUIVEUR (TP-COURS 1)	8
2.2 MONTAGE AMPLIFICATEUR NON INVERSEUR (TP-COURS 2)	14
3 ALI IDEAL EN REGIME SATURE (TP-COURS 3)	17
3.1 FONCTION COMPAREUR SIMPLE	17
3.2 FONCTION COMPAREUR A HYSTERESIS	19
4 QUESTIONS DE COURS	22
5 EXERCICES	23
5.1 MISE EN CASCADE.....	23
5.2 ETUDE D'UN AMPLIFICATEUR INVERSEUR	23
5.3 MANIPULATION D'UN COMPAREUR A HYSTERESIS	24
5.4 MONTAGE A PLUSIEURS ALI : L'AMPLI D'INSTRUMENTATION	25
5.5 INTEGRATEUR REALISE A L'AIDE D'UN AMPLIFICATEUR LINEAIRE INTEGRE.....	25
6 DM POUR LE 02/01/2023	26
7 ANNEXE : NOTICE DU TL081	28

1 Modèle de l'ALI

1.1 Composant électronique

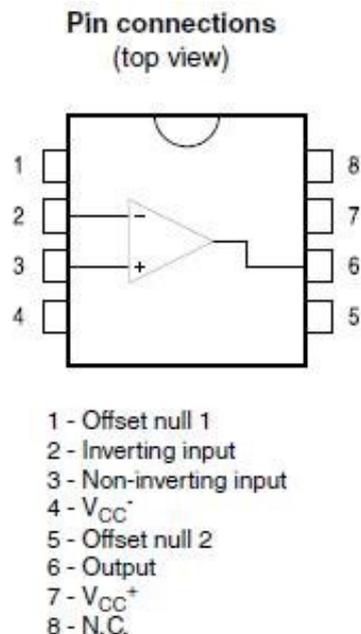
L'ALI se présente sous la forme d'une puce électronique, de surface 11 mm x 6,6 mm, dont la notice est fournie. Il est emballé dans un boîtier DIP (Dual in-line package). Il comporte 8 pattes et une encoche semi-circulaire, qui permet de les distinguer.

La référence du circuit est TL081. Tous les constructeurs utilisent la même référence pour une même fonction, qui est ici celle d'amplificateur opérationnel. Il est composé de transistors principalement.

Le brochage des pattes est donné :

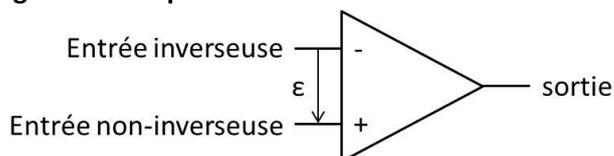
- Offset Null 1 : permet de compenser les petits défauts en tension, dus à la construction (non utilisé ici)
- Inverting input : c'est l'entrée inverseuse, que l'on repèrera sur le schéma par le signe (-)
- Non-inverting input : c'est l'entrée non-inverseuse, repérée par le signe (+)
- V_{CC}^- : tension d'alimentation négative de la puce, en général -15V
- Offset Null 2 : idem à Offset Null 1 (non utilisé ici)
- Output : sortie
- V_{CC}^+ : tension d'alimentation positive de la puce, en général +15V
- NC : ne sert à rien

Comme on peut le voir ici l'amplificateur opérationnel doit être alimenté pour fonctionner, ce qui en fait un composant actif.



L'alimentation est la première chose à brancher lors d'un montage électronique.

Toutefois, elle n'est pas représentée sur les schémas électriques, dans lesquels l'ALI est symbolisée par un triangle entre deux entrées et une sortie :



1.2 Propriétés essentielles

(A retrouver dans la notice en annexe)

1.2.1 Courants de polarisation nuls

Les courants de polarisation ou encore courants d'entrée i_+ et i_- d'un ALI sont nuls : $i_+ = i_- = 0A$.

1) Expliquer à partir de la notice le fait que l'on puisse considérer ces courants comme nuls.

1.2.2 Résistance de sortie nulle

La valeur de la tension de sortie s est indépendante du courant débité en sortie de l'ALI. L'étage de sortie de l'ALI est donc assimilable à une source idéale de tension. On parle de **résistance de sortie nulle** pour ce modèle.

1.2.3 Fonction de transfert du premier ordre en régime linéaire

La fonction de transfert de l'amplificateur opérationnel relie l'entrée différentielle, notée ε , et la sortie, notée s . **L'entrée différentielle** est la différence entre les potentiels des entrées non-inverseuse et inverseuse, noté respectivement v_+ et v_- tel que : $\varepsilon = v_+ - v_-$.

La fonction de transfert est aussi appelée **gain différentiel** car il opère sur l'entrée différentielle. En première approche, on la définit comme un passe-bas du premier ordre :

$$\underline{A}(j\omega) = \frac{\underline{s}(j\omega)}{\underline{\varepsilon}(j\omega)} = \frac{A_{vd}}{1 + j\tau\omega} \quad \text{avec} \quad \begin{cases} A_{vd} \approx 2 \cdot 10^5 \\ \tau \approx 5 \cdot 10^{-2} \text{ s} \end{cases}$$

- 2) Retrouver les valeurs du gain statique dans la notice. Tracer le diagramme de Bode en amplitude de la fonction de transfert.

1.2.4 Saturation de la tension de sortie

La tension maximale que délivre l'amplificateur opérationnel en sortie reste limitée : elle ne peut dépasser en valeur absolue la tension d'alimentation V_{CC}^+ . Cette tension maximale de sortie est communément appelée **tension de saturation**, notée V_{sat} . Elle est inférieure à la tension d'alimentation : $|V_{sat}| < |V_{CC}^+| = 15V$.

La tension de sortie est donc limitée à l'intervalle $[-V_{sat}, +V_{sat}]$.

1.2.5 Synthèse

Le **modèle de l'ALI** parfait est donné par les propriétés suivantes :

- Courants de polarisation nuls $i_+ = i_- = 0A$
- Résistance de sortie nulle
- Fonction de transfert du premier ordre en régime linéaire $A_d(j\omega) = \frac{s(j\omega)}{\varepsilon(j\omega)} = \frac{A_{vd}}{1+j\tau\omega}$
- Saturation de la tension de sortie à V_{sat}

1.3 Régimes de fonctionnement

Les propriétés précédemment exposées du modèle de l'ALI nous permettent de comprendre que la sortie n'est liée à l'entrée par la fonction de transfert du premier ordre que dans un domaine précis, appelé **plage de linéarité**. On supposera ici que l'on peut assimiler la fonction de transfert à son gain statique dans la gamme de fréquence étudiée : $\underline{A}(j\omega) \approx A_{vd}$.

Au-delà, la tension de sortie atteint en valeur absolue la tension de saturation : **domaine de saturation**.

On distingue 3 domaines :

- la plage de linéarité (1) : $|\varepsilon| < \frac{V_{sat}}{A_{vd}}$, le signal de sortie est proportionnel à ε .
- la zone de saturation positive (2) : $\varepsilon \geq \frac{V_{sat}}{A_{vd}}$ alors $s = V_{sat} \approx V_{CC}^+$
- la zone de saturation négative (3) : $\varepsilon \leq -\frac{V_{sat}}{A_{vd}}$ alors $s = -V_{sat} \approx V_{CC}^-$

3) Représenter la caractéristique d'un ALI.

1.4 Modèle idéal de l'ALI

4) A partir des valeurs typiques de la tension de saturation et du gain statique, montrer qu'en régime linéaire la tension différentielle est inférieure à une valeur que l'on précisera. Conclure.

De plus, le gain de la fonction de transfert est très grand et peut être considéré infini, soit : $A_{vd} \rightarrow \infty$.

5) Représenter la caractéristique d'un ALI idéal.



On distingue alors les 3 domaines suivants :

- la plage de linéarité (1) : $|s| < V_{sat} \Rightarrow \varepsilon = 0$ ou $v_+ = v_-$
- la zone de saturation positive (2) : $\varepsilon > 0 \Rightarrow s = V_{sat}$
- la zone de saturation négative (3) : $\varepsilon < 0 \Rightarrow s = -V_{sat}$

Le **modèle de l'ALI idéal** rajoute au modèle précédent les propriétés suivantes :

- Fonction de transfert en régime linéaire assimilée à son gain statique infini $\underline{A} = A_{vd} \rightarrow +\infty$
- On en déduit l'égalité des tensions d'entrée en régime linéaire $v_+ = v_-$

1.5 Limites du modèle

1.5.1 Saturation de l'intensité du courant de sortie

L'intensité du courant délivré en sortie est, elle aussi, limitée. Elle est expérimentalement obtenue en court-circuitant la sortie avec un ampèremètre, afin de faire débiter une intensité maximale qu'on mesure.

6) Quelle est la valeur de l'intensité du courant délivré en sortie dans la notice ?

1.5.2 Vitesse de balayage

La vitesse de balayage σ ou slew rate SR fait partie des propriétés de l'ALI. Cette vitesse de balayage provient d'un condensateur au sein du circuit intégré. Celui-ci est utile pour obtenir le comportement d'un filtre du premier ordre avec une fréquence de coupure suffisamment faible. Il vient donc limiter la rapidité du circuit.

7) Retrouver la valeur de la vitesse de balayage dans la notice. En déduire sa signification.

On pose donc : $\sigma = \left| \frac{ds}{dt} \right|_{max}$

Cette limitation est particulièrement visible lors des phases de commutations des montages comparateurs. Elle se manifeste par l'apparition de portions rectilignes de pente $\pm \sigma$ sur l'oscillogramme de la tension de sortie.

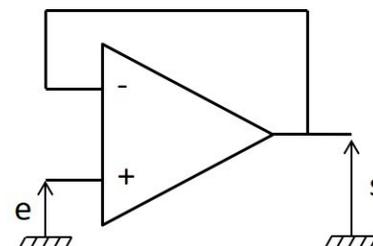
2 ALI idéal en régime linéaire

2.1 Montage suiveur (TP-cours 1)

2.1.1 Schéma

On raisonne sur le circuit suivant. La tension d'entrée $e(t)$ est générée par un générateur basses fréquences (GBF). Les tensions d'entrée $e(t)$ et $s(t)$ peuvent être visualisées sur un oscilloscope.

La présence d'une rétroaction sur la borne inverseuse indique que l'on aura affaire à un circuit stable en régime linéaire.

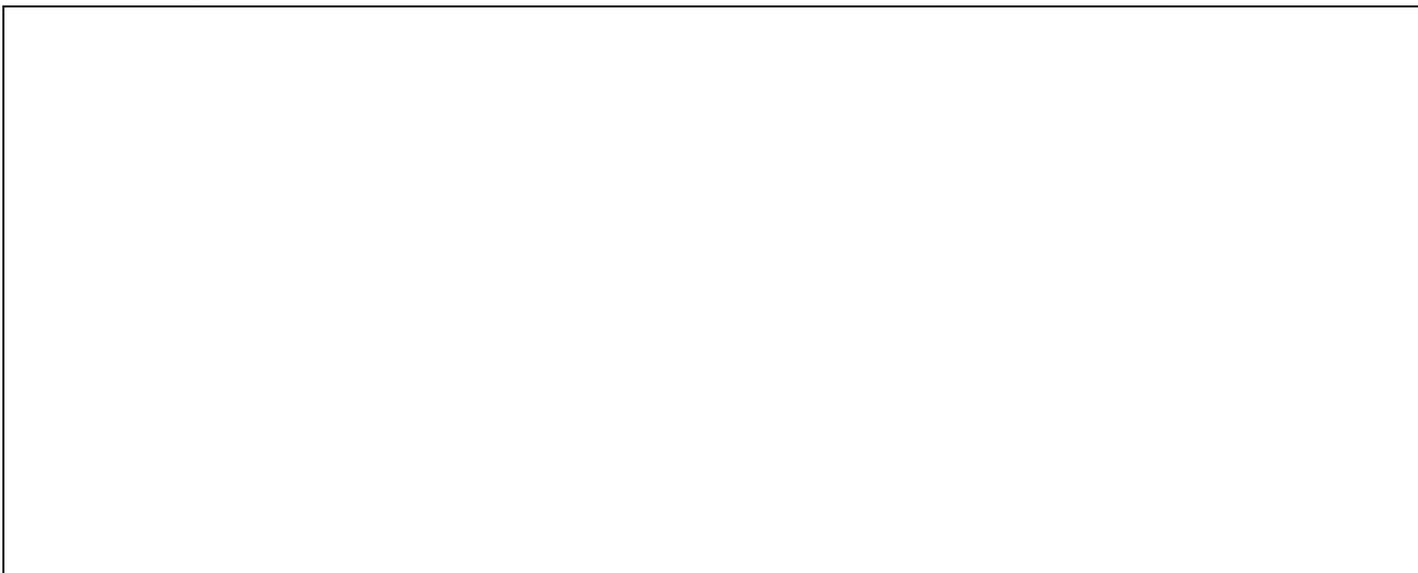


2.1.2 Modèle idéal de l'ALI

8) Donner la relation liant s à e en régime linéaire. On utilisera les hypothèses simplificatrices du modèle **idéal** en régime linéaire.

9) Donner la caractéristique entrée-sortie du suiveur faisant apparaître les différents régimes de fonctionnement de l'ALI idéal.

10) Réaliser le circuit précédent. Observer sa tension d'entrée sinusoïdale $e(t)$ d'amplitude $E_0 = 5\text{ V}$ et de fréquence $f = 1\text{ kHz}$, ainsi que sa tension de sortie $s(t)$ sur l'oscilloscope. Vérifier le comportement prévu.



11) En augmentant l'amplitude du signal d'entrée, observer la saturation du signal de sortie. En passant en mode XY, retrouver la caractéristique entrée-sortie de l'amplificateur.



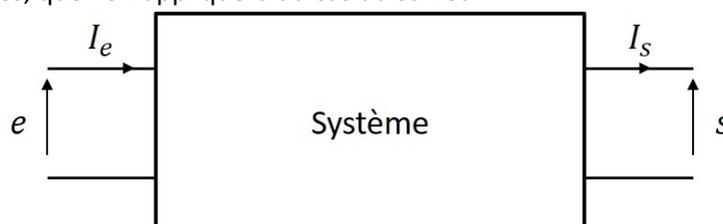
2.1.3 Impédances d'entrée et de sortie

2.1.3.1 Modélisation du circuit

On donnera dans cette partie des définitions générales, que l'on appliquera au cas du suiveur.

Pour les définitions générales, on s'appuie sur la modélisation suivante d'un système avec :

- e : la tension d'entrée
- I_e : le courant d'entrée
- s : la tension de sortie
- I_s : le courant de sortie

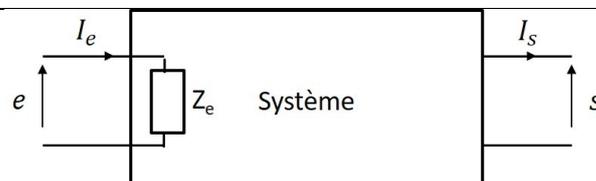


2.1.3.2 Impédance d'entrée

Définition :

L'impédance d'entrée Z_e d'un système est le rapport entre la tension d'entrée et l'intensité du courant d'entrée.

$$Z_e = \frac{e}{I_e}$$



12) Dans le cas du suiveur, quelle est son impédance d'entrée ?

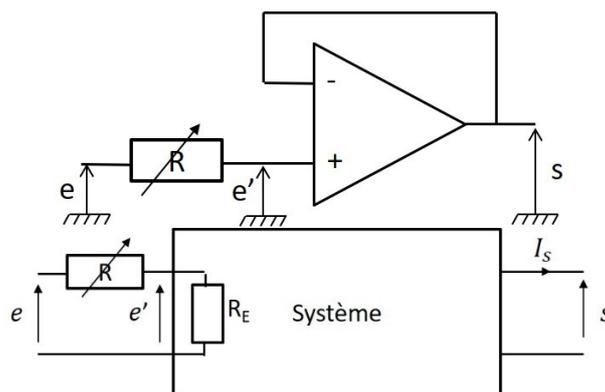
On se propose de réaliser le montage suivant :

La tension d'entrée $e = 10\text{ V}$ continue est générée par un générateur basses fréquences (GBF).

Les tensions d'entrée e et e' peuvent être visualisées sur un oscilloscope.

R est une résistance réglable. On utilisera les boîtes à décades à disposition.

La modélisation équivalente à notre circuit est donnée ci-contre.

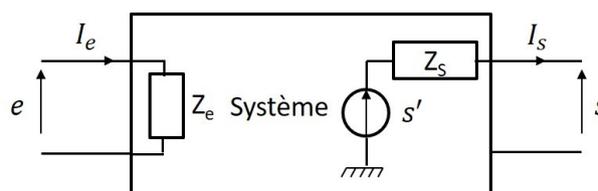


13) Exprimer e' en fonction de e . Exprimer R_E en fonction de R dans le cas où $e' = e/2$.

14) Réaliser le circuit précédent. Faire varier R jusqu'à obtenir $e' = e/2$ sur l'oscilloscope. En déduire la valeur de R_E . Conclure.

2.1.3.3 Impédance de sortie

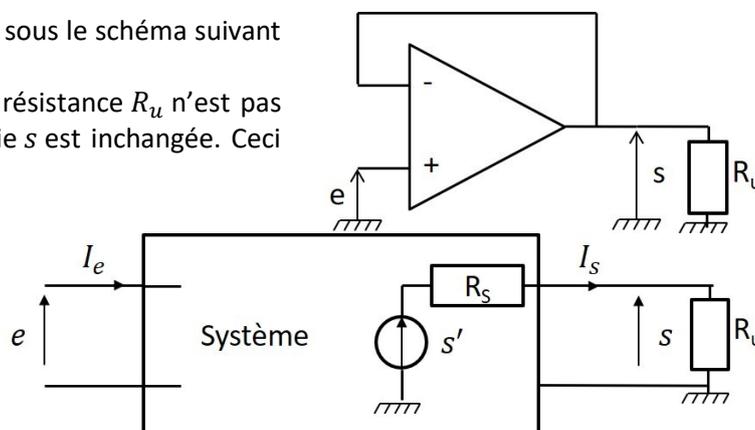
La modélisation en sortie du montage peut se faire à l'aide d'un générateur de Thévenin (générateur de tension s' en série avec l'impédance de sortie, Z_s).



Un circuit électronique n'est jamais utilisé seul. La sortie est toujours reliée à une charge, cela peut être un autre circuit, une résistance, ou même juste l'oscilloscope.

Ainsi, le circuit étudié en Q10 peut être représenté sous le schéma suivant avec R_u , la résistance d'entrée de l'oscilloscope.

On peut montrer pour ce circuit, que tant que la résistance R_u n'est pas trop faible, i.e. $I_s < I_{OS}$ (cf Q7), la tension de sortie s est inchangée. Ceci est lié à l'impédance de sortie du montage.



La modélisation équivalente à notre circuit est donnée ci-contre.

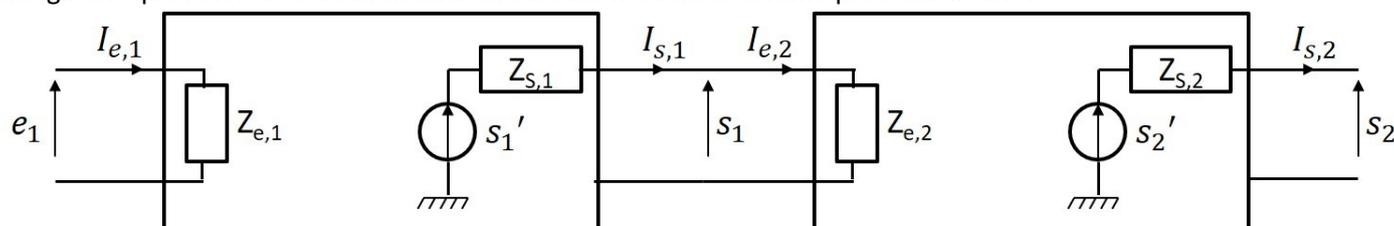
15) A quelle condition sur la résistance de sortie R_s est-ce que la tension de sortie, s , reste indépendante de la résistance R_u ?

2.1.3.4 Conclusion et intérêt

Dans un circuit à base d'ALI :

- si l'entrée du circuit se fait directement sur une des entrées (inverseuse ou non inverseuse) de l'ALI, alors l'impédance d'entrée du circuit est infinie : $Z_e \rightarrow \infty$
- si la sortie du circuit se fait directement en sortie de l'ALI, alors l'impédance de sortie du circuit est nulle : $Z_s = 0$

Imaginons que l'on mette deux circuits en cascade modélisés comme précédemment :



On pose :

- $\underline{H}_1 = \frac{s_1}{e_1}$ et $\underline{H}_2 = \frac{s_2}{e_2}$ les fonctions de transferts de chacun des circuits quand ils sont utilisés séparément,
- $\underline{H} = \frac{s_2}{e_1}$ la fonction de transfert du montage avec les deux circuits en cascade

Le premier circuit est chargé en sortie par le second et sa tension de sortie s_1 s'en trouve modifiée. Mais si $s_1 = e_2$ est modifiée, alors s_2 l'est aussi.

Ainsi : $\underline{H} \neq \underline{H}_1 \underline{H}_2$

On ne peut retrouver l'égalité que si : $Z_{s,1} = 0$ ou $Z_{e,2} \rightarrow \infty$.

Pour garantir le fonctionnement lors de mise en cascade, il faut réaliser des filtres de tension de forte impédance d'entrée et de faible impédance de sortie.

2.1.4 Limites du modèle

2.1.4.1 Saturation de l'intensité du courant de sortie

On se propose de réaliser le montage suivant :

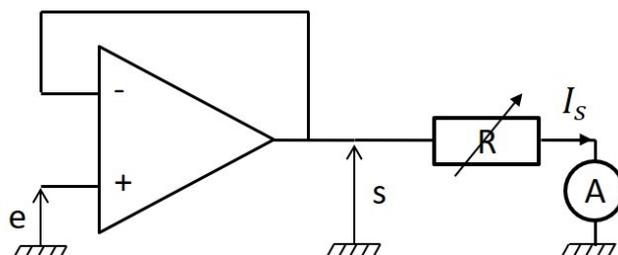
La tension d'entrée $e = 5\text{ V}$ continue est générée par un générateur basses fréquences (GBF).

Les tensions d'entrée e et s peuvent être visualisées sur un oscilloscope.

R est une résistance réglable. On utilisera les boîtes à décades à disposition.

On place un ampèremètre en série avec la boîte à décades.

16) Exprimer I_s en fonction de e et R .



17) Réaliser le circuit précédent. En partant d'une valeur initiale de R suffisamment grande (environ $10\text{ k}\Omega$), diminuer petit à petit sa valeur tout en observant la valeur du courant donné par l'ampèremètre.

18) En déduire la valeur de la saturation de l'intensité du courant de sortie. Evaluer l'incertitude sur cette mesure.

19) Lorsque l'on a atteint la saturation en courant, mesurer la tension de sortie. Commenter.

2.1.4.2 Vitesse de balayage

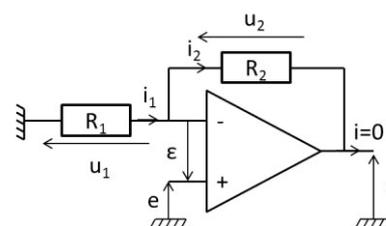
20) On reprend le circuit de la Q10. On augmente maintenant progressivement la fréquence du signal d'entrée. Observer la déformation du signal de sortie sur l'oscilloscope si on augmente trop la fréquence.

21) En déduire la valeur de la vitesse limite de balayage. Evaluer l'incertitude sur cette mesure.

2.2 Montage amplificateur non inverseur (TP-cours 2)

2.2.1 Schéma

Ce montage est conçu pour amplifier la tension d'entrée. On raisonne sur le circuit suivant.



2.2.2 Modèle idéal de l'ALI

22) Comment peut-on savoir que ce montage sera stable en régime linéaire ?

23) Donner la relation liant s à e en régime linéaire. On utilisera les hypothèses simplificatrices du modèle **idéal** en régime linéaire.

24) Donner la caractéristique entrée-sortie de l'amplificateur. On fera apparaître les zones de saturation.

25) Quelles sont les valeurs des impédances d'entrée et de sortie de ce montage ?

26) Réaliser le circuit précédent. Observer sa tension d'entrée $e(t)$ d'amplitude $E_0 = 0,1V$ et de fréquence $f = 1kHz$, ainsi que sa tension de sortie $s(t)$ sur l'oscilloscope. On prendra pour résistances $R_1 = 1k\Omega$ et $R_2 = 100k\Omega$. Vérifier le comportement amplificateur prévu.

27) En augmentant l'amplitude du signal d'entrée, observer la saturation du signal de sortie. En passant en mode XY, retrouver la caractéristique entrée-sortie de l'amplificateur.

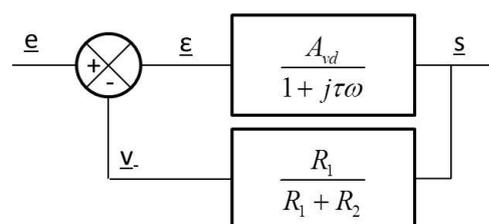
2.2.3 Fonction de transfert du circuit (ALI non idéal)

28) En revenant dans la zone de régime linéaire du montage, augmenter maintenant la fréquence du signal d'entrée. Le signal de sortie est-il toujours amplifié ? Qu'observe-t-on ? Mesurer la fréquence pour laquelle $|s(t)| = \frac{s_{\max}}{\sqrt{2}}$. Comment pourrait-on appeler cette fréquence ? Définir alors la bande passante du montage.

Rappel : On définit la bande passante de l'amplificateur comme la gamme de pulsation pour laquelle : $|H| > \frac{|H|_{\max}}{\sqrt{2}}$, soit pour un passe-bas du premier ordre : $BP = [0, \omega_c]$.

29) Rappeler la fonction de transfert reliant l'entrée différentielle ε de l'ALI à sa tension de sortie s . Commenter alors ce que vous avez observé expérimentalement en Q28.

Il est d'ailleurs possible de représenter le circuit par un schéma-bloc typique d'un système bouclé avec rétroaction (voir SII).



Stabilité du montage :

Imaginons qu'une perturbation électromagnétique provoque une augmentation de la tension de sortie s . La valeur du potentiel v_- se trouve instantanément accrue. Et par l'intermédiaire du pont diviseur de tension, ε décroît. Donc cela induit une diminution de s . Le système bouclé a réagi spontanément pour corriger l'effet de la perturbation.

Ceci est dû à la rétroaction sur la borne inverseuse.

On dira qu'une rétroaction négative est stabilisatrice.

3 ALI idéal en régime saturé (TP-cours 3)

3.1 Fonction comparateur simple

3.1.1 Caractéristique

Il est souvent utile de comparer la valeur instantanée d'un signal $e(t)$ à un niveau de référence.

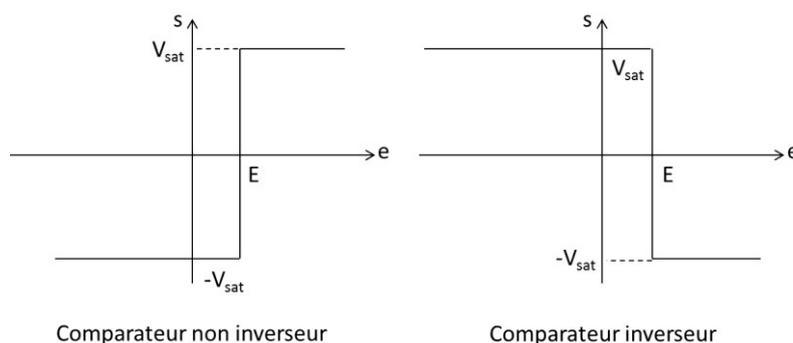
Exemple : détecteur de lumière qui commande un dispositif d'éclairage.

Le signal issu du capteur est comparé à une valeur correspondant à la pénombre et déclenche le relais alimentant les lampes, en fonction du résultat de cette comparaison.

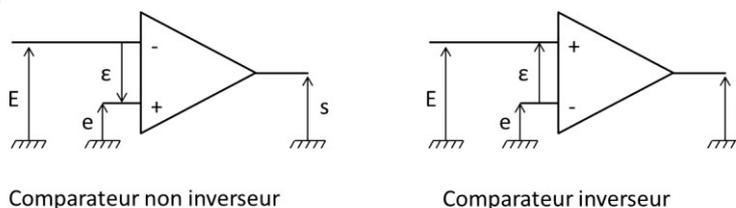
Lien utile : <https://famillecoq.pagesperso-orange.fr/physique/tp/applets/electrnsignal/compsimple.htm>

On note E , la tension de seuil du comparateur simple.

La caractéristique entrée-sortie d'un tel opérateur est donnée dans la figure suivante :



Ces comparateurs simples peuvent être réalisés à l'aide des circuits suivants :



30) En supposant les ALI idéaux en régime saturé, retrouver les caractéristiques entrée-sortie des deux comparateurs.

31) Vérifier par un montage la caractéristique du comparateur simple non inverseur. On pourra prendre une tension de seuil de 0 V. On spécifiera les réglages utilisés à l'oscilloscope. En faisant varier l'offset de la tension d'entrée, observer le changement de rapport cyclique.

3.1.2 Génération d'harmoniques

Pour un système linéaire, on peut définir la notion de fonction de transfert. Le signal de sortie a alors exactement le même nombre d'harmoniques que le signal d'entrée, bien qu'elles puissent être atténuées ou amplifiées.

Ce système non linéaire enrichit le spectre du signal de sortie de fréquences absentes du signal d'entrée.

32) Pour le comparateur non inverseur précédent, quel est le signal de sortie si le signal d'entrée est sous la forme $e(t) = E_0 \cos(\omega t)$: avec $E = 0V$? Observer le spectre des deux signaux.

3.2 Fonction comparateur à hystérésis

(vient du mot grec qui veut dire retard)

3.2.1 Caractéristiques

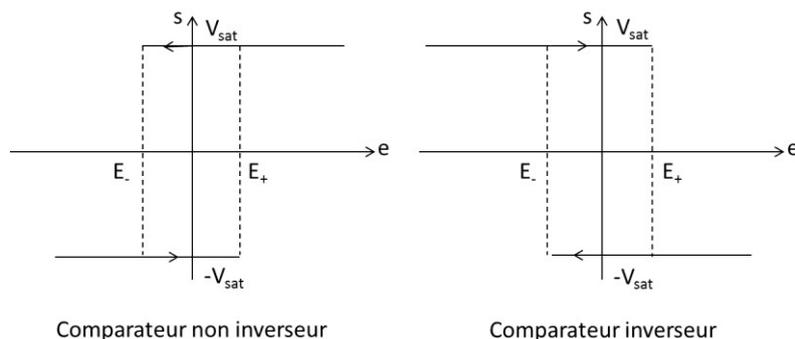
Les comparateurs simples peuvent se révéler insuffisants pour assurer certaines comparaisons.

Exemple : dispositif de commande d'éclairage

S'il a son capteur de lumière placé dans une zone où la luminosité varie autour de la valeur ambiante, le dispositif risque de déclencher l'allumage puis l'extinction plusieurs fois de suite. Il est alors judicieux de recourir à un comparateur à deux seuils, appelé comparateur à hystérésis.

Lien utile : <https://famillecoq.pagesperso-orange.fr/physique/tp/applets/electrosignal/comphyst.htm>

La caractéristique entrée-sortie d'un tel opérateur est donnée dans la figure suivante.



Deux tensions de seuil sont utilisées : E_- et E_+

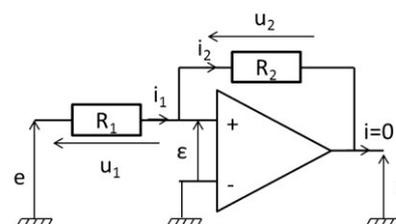
- si $e \leq E_-$, la sortie du comparateur non inverseur est $-V_{sat}$

- si $e \geq E_+$, la sortie du comparateur non inverseur est V_{sat}

- si $E_- < e < E_+$, la sortie du comparateur non inverseur dépend de l'évolution antérieure du signal d'entrée, comme l'indique les flèches sur la caractéristique.

3.2.2 Montage comparateur à hystérésis non inverseur

On raisonne sur le circuit suivant comparateur non inverseur. Attention l'ALI ne fonctionne pas en régime linéaire.



33) Montrer que : $\varepsilon = \frac{R_1}{R_1+R_2} s + \frac{R_2}{R_1+R_2} e$

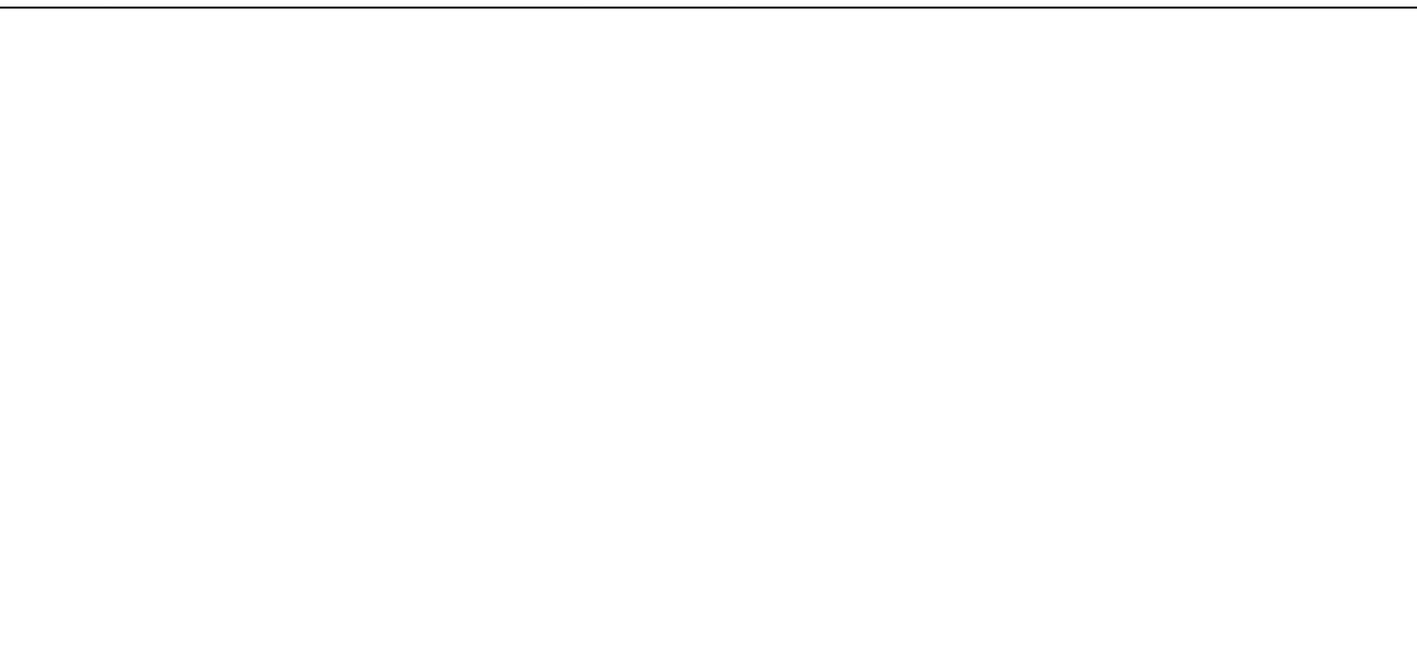
3.2.3 Stabilité du montage

Imaginons qu'une perturbation électromagnétique provoque une augmentation de la tension de sortie s . La valeur du potentiel v_+ se trouve instantanément accrue et ε croît. Donc si le montage est en régime linéaire, cela induit une augmentation de s . Le système bouclé entrainera ainsi une saturation de la tension de sortie. Le montage ne peut plus alors être considéré comme linéaire, car la sortie étant bloquée à $\frac{+}{-}V_{sat}$ n'est plus proportionnelle à l'entrée.

On dira qu'une rétroaction positive est déstabilisatrice.

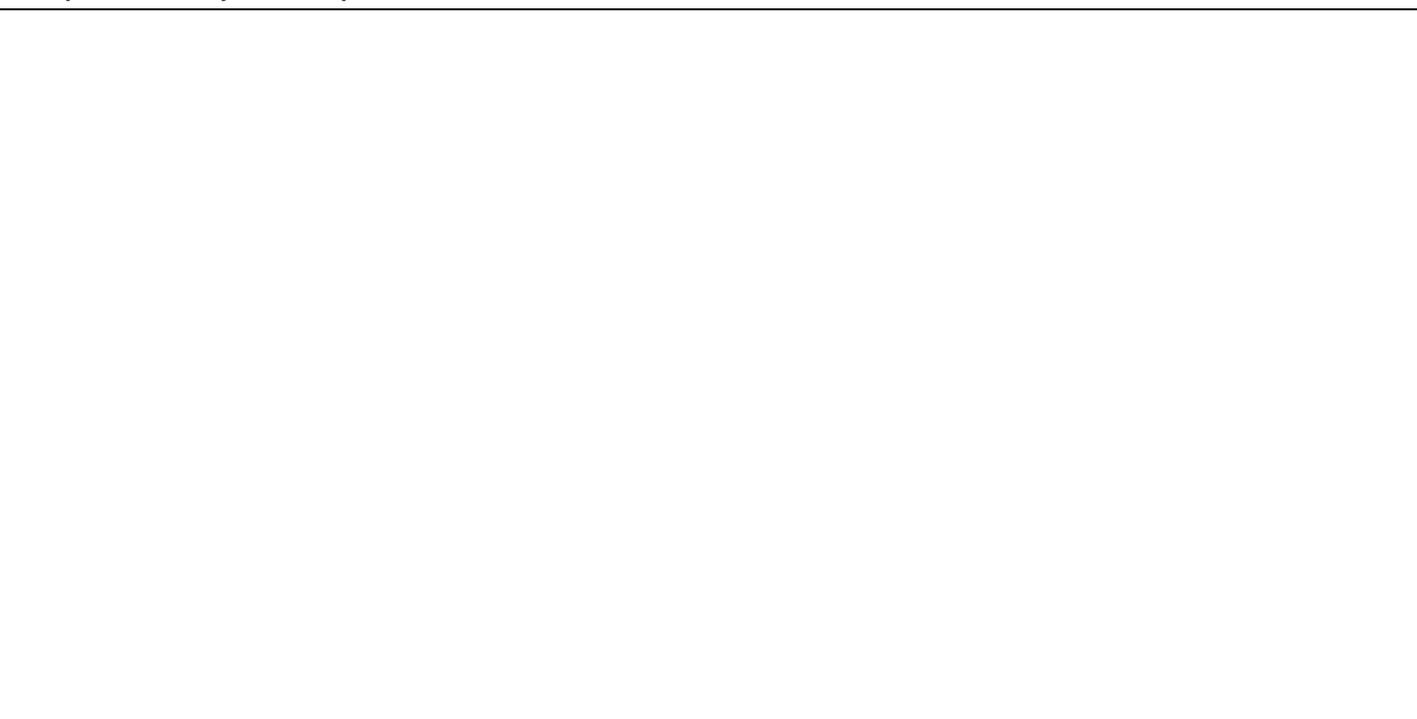
3.2.4 Modèle idéal d'ALI

34) En supposant l'ALI idéal en régime saturé, trouver les deux tensions de seuil du cycle d'hystérésis du comparateur non inverseur. Tracer alors le cycle du comparateur.



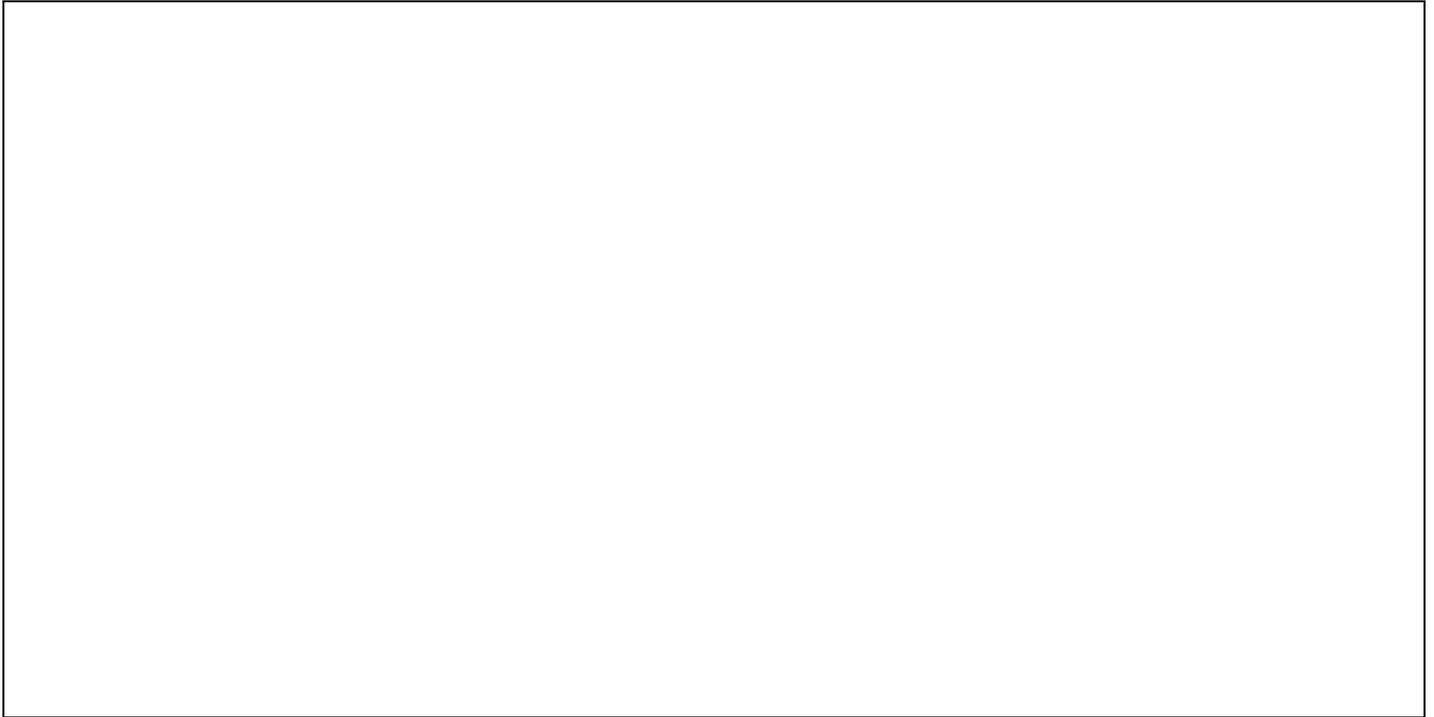
3.2.4.1 Manipulations

35) En réalisant le montage du comparateur à hystérésis non inverseur pour $R_1 = 1k\Omega$ $R_2 = 10k\Omega$, vérifier les tensions de seuil déterminées précédemment. Observer les tensions en mode temporel et en mode XY. Dans quel sens le cycle est-il parcouru ?



3.2.5 Vitesse de balayage

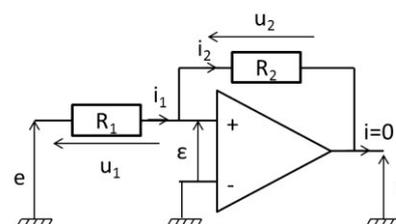
36) En zoomant sur le signal de sortie, observer l'effet de la vitesse de balayage. Faire une mesure de la vitesse de balayage.



4 Questions de cours

- 1) Donner les hypothèses du modèle de l'ALI parfait.
- 2) Donner la fonction de transfert régissant le comportement d'un ALI en régime linéaire. On donnera des ordres de grandeur du gain différentiel statique et du temps de réponse d'un ALI en régime linéaire.
- 3) Tracer la caractéristique de l'ALI. Comment est-elle modifiée si on fait l'hypothèse d'un ALI idéal ? On justifiera son tracé.
- 4) Donner deux limites au modèle de l'ALI parfait et expliquez-les.
- 5) Comment peut-on savoir si un montage à ALI est stable en régime linéaire ?
- 6) Etablir la relation entrée-sortie du montage suivant. Comment le nomme-t-on ?
- 7) Etablir la relation entrée-sortie du montage suivant. Comment le nomme-t-on ?
- 8) Etablir la relation entrée-sortie du montage suivant. Comment le nomme-t-on ?
- 9) Pour une entrée sinusoïdale sur un comparateur, quelle est la forme du signal de sortie ? Que peut-on dire de son spectre ?
- 10) Établir le cycle d'un comparateur à hystérésis.

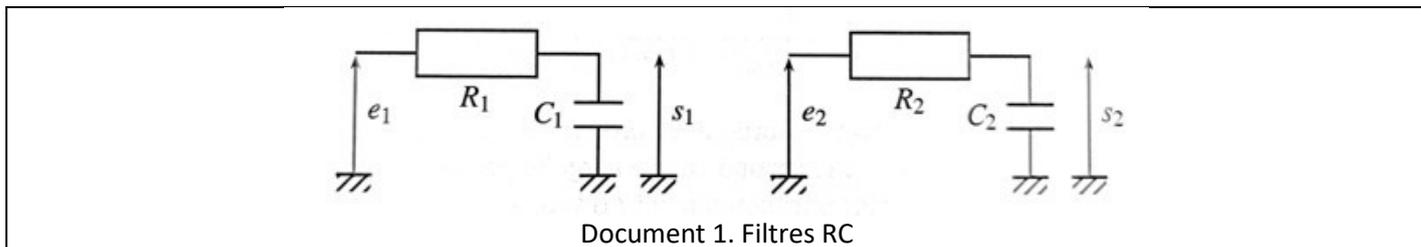
On raisonne sur le circuit suivant comparateur non inverseur. En supposant l'ALI idéal en régime saturé, trouver les deux tensions de seuil du cycle d'hystérésis du comparateur non inverseur. Tracer alors son cycle d'hystérésis.



5 Exercices

5.1 Mise en cascade

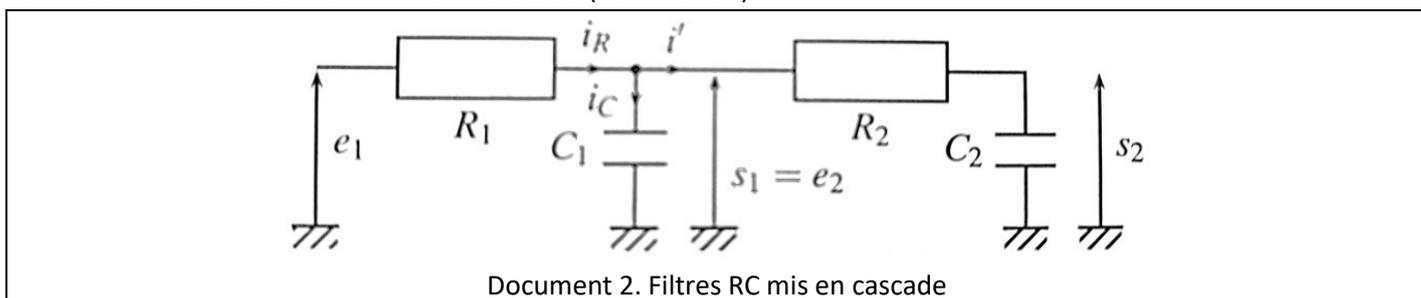
On s'intéresse à la mise en cascade de deux filtres RC.



Document 1. Filtres RC

1) Rappeler la fonction de transfert de chacun des filtres. On notera : $\underline{H}_1 = \frac{S_1}{E_1}$ et $\underline{H}_2 = \frac{S_2}{E_2}$

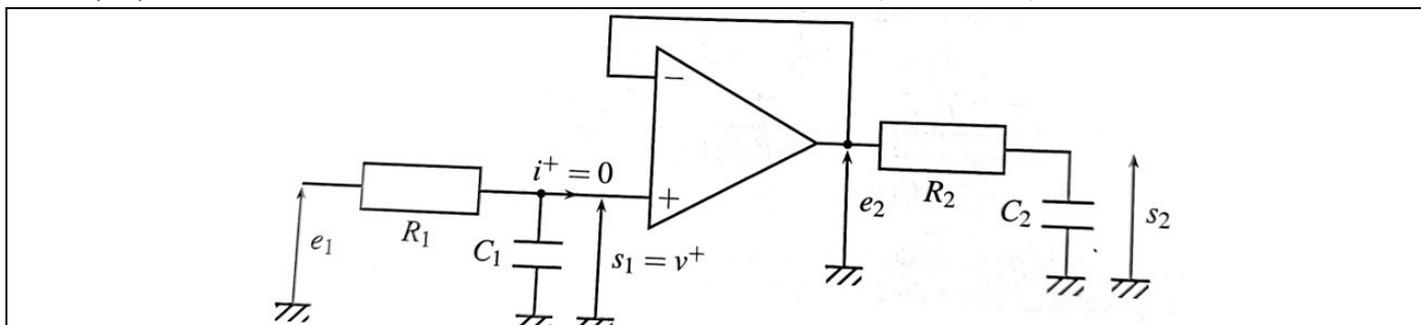
On met maintenant ces deux filtres en cascade (document 2).



Document 2. Filtres RC mis en cascade

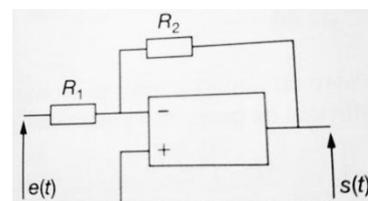
2) Déterminer la fonction de transfert $\underline{H} = \frac{S_2}{E_1}$. Commenter.

On se propose maintenant d'intercaler entre les deux filtres un suiveur (document 3).



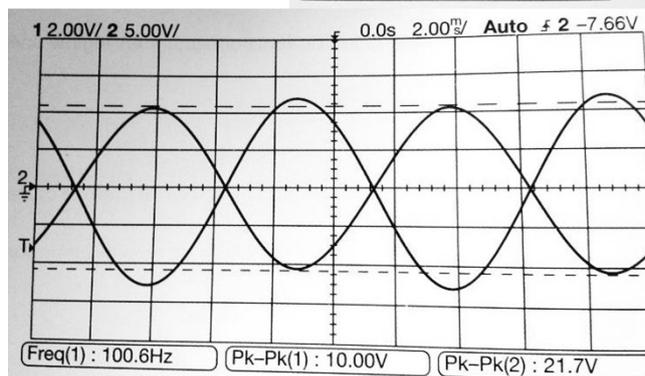
5.2 Etude d'un amplificateur inverseur

Un amplificateur intégré linéaire est associé à deux résistors $R_1 = 33k\Omega$ et $R_2 = 68k\Omega$ comme indiqué sur la figure suivante.

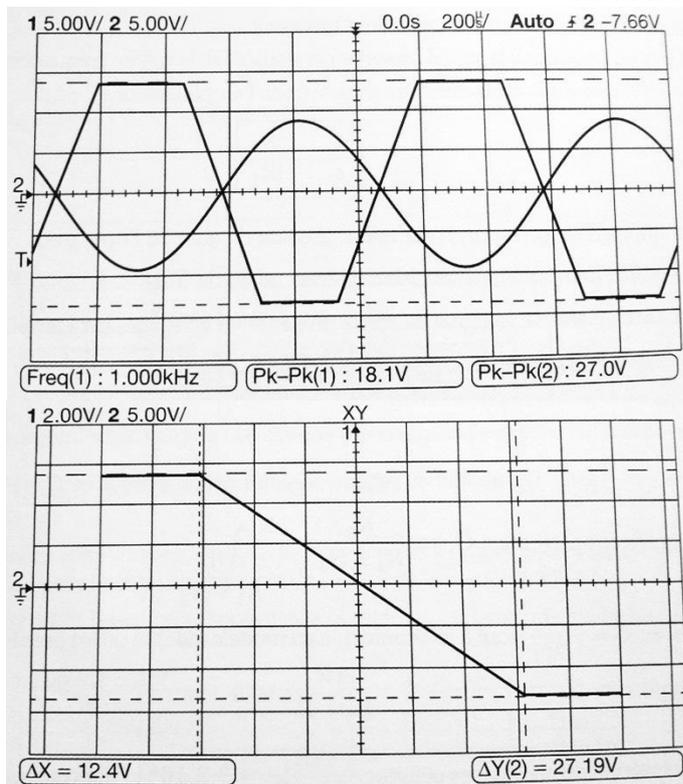


En appliquant un signal sinusoïdal d'amplitude crête à crête égale à 10,0 V de fréquence 100 Hz à l'entrée de cet opérateur, on obtient les oscillogrammes de la figure suivante. L'amplitude crête à crête du signal de sortie s'avère égale à 21,7V.

1) Commenter la forme des signaux et leur déphasage. Les observations quantitatives sont-elles conformes aux attentes, compte tenu des valeurs de résistances utilisées ?



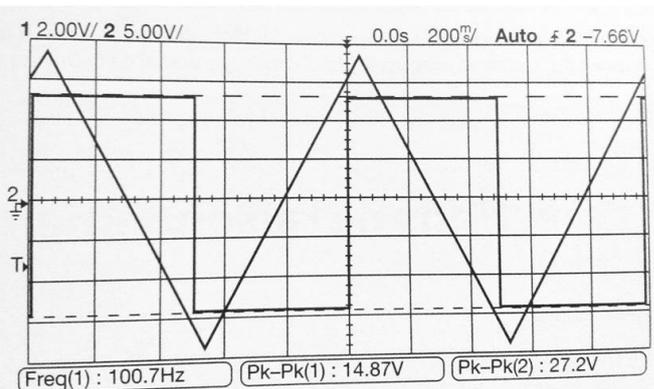
2) Dans un deuxième temps, l'utilisateur applique un signal sinusoïdal d'amplitude crête à crête égale à 18,1 V, de fréquence 1,0 kHz à l'entrée du même dispositif et obtient les oscillogrammes suivants. L'amplitude crête à crête du signal de sortie s'avère égale à 27,0 V. Quel phénomène est apparu ? Que peut-on en déduire comme renseignement de l'amplitude crête à crête relevée en sortie ?



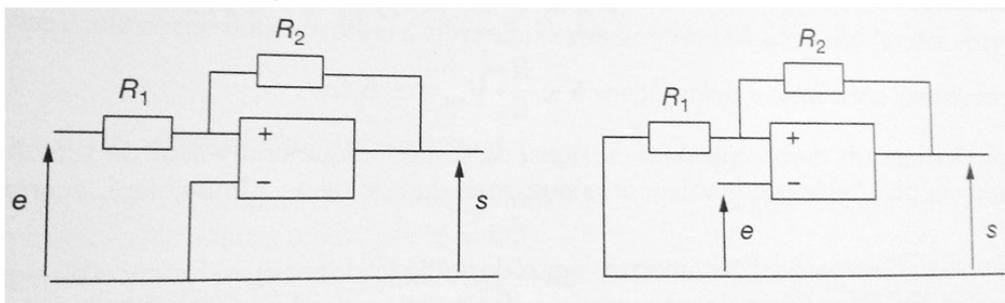
3) Avec les mêmes signaux, mais en sélectionnant le mode XY, le manipulateur obtient la trace représentée à la figure suivante. Expliquer. Quelle propriété de l'opérateur peut-on déduire de l'indication des curseurs : $\Delta X = 12,4V$ et $\Delta Y = 27,2V$?

5.3 Manipulation d'un comparateur à hystérésis

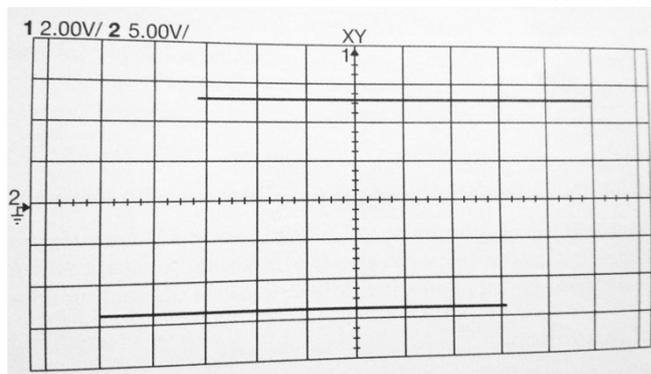
Un comparateur à hystérésis a permis le relevé des oscillogrammes de la figure suivante, lorsque le signal d'entrée est un signal de forme triangulaire d'amplitude crête à crête égale à 14,9 V et de fréquence 100Hz.



1) Laquelle des deux structures de la figure suivante a été utilisée ?



- 2) Les valeurs de résistances utilisées sont $R_1 = 33k\Omega$ et $R_2 = 68k\Omega$. Les observations sont-elles cohérentes avec ce choix, sachant que l'amplitude crête à crête mesurée en sortie est égale à 27,2 V ?
- 3) Quel mode de visualisation à l'oscilloscope permet d'obtenir la courbe représentée sur la figure suivante ?
- 4) Pour cette dernière courbe, l'utilisation d'un signal d'entrée sinusoïdal aurait-elle donné le même relevé ?



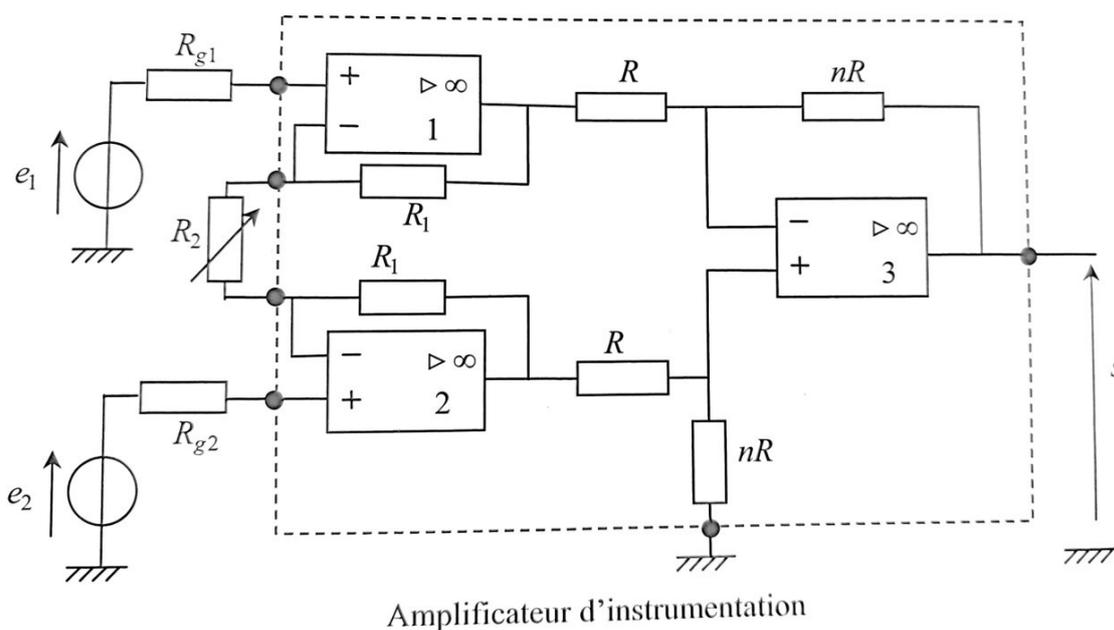
5.4 Montage à plusieurs ALI : l'ampli d'instrumentation

L'amplificateur d'instrumentation existe sous forme de circuit intégré (en pointillé sur le schéma). Il a de nombreuses utilisations : il est appliqué par exemple à l'électrocardiographe pour mesurer la différence de potentiel entre 2 électrodes placées sur le corps humain. Le but est d'effectuer une amplification différentielle de tension de la forme :

$$s = A_0(e_2 - e_1)$$

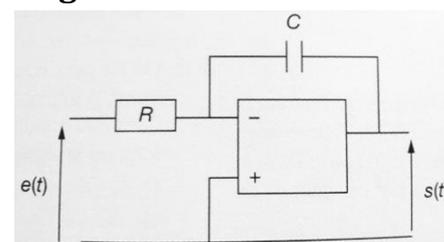
L'ALI seul effectue déjà cette opération entre V_+ et V_- , mais avec un facteur d'amplification A_0 beaucoup trop important, ce qui le fait sturer.

- 1) Les ALI sont considérés idéaux de gain infini. Exprimer s en fonction de e_1 , e_2 et des résistances. Que vaut A_0 ?
- 2) Le facteur d'amplification dépend-il de R_{g1} et R_{g2} ? Commentez.
- 3) Quelle est l'utilité de rendre la résistance R_2 variable ?



5.5 Intégrateur réalisé à l'aide d'un amplificateur linéaire intégré

On considère l'opérateur de la figure suivante couramment appelé intégrateur-inverseur. On se propose de déterminer l'influence, sur sa fonction de transfert, de la variation de gain différentiel de l'amplificateur linéaire intégré avec la fréquence. On utilisera les valeurs $R = 1\text{ k}\Omega$ et $C = 100\text{ nF}$.



- 1) Dans le modèle d'ALI idéal, quelle est la fonction de transfert $\underline{H} = \frac{s}{e}$ de l'opérateur ?
- 2) Quel type d'opération effectue ce circuit ? Retrouver l'équation différentielle reliant l'entrée à la sortie.

6 DM pour le 02/01/2023

Etude du thermostat du réfrigérateur

Le thermostat d'un réfrigérateur permet de régler la température du compartiment à réfrigérer. A partir d'une valeur de consigne en température T_{con} donnée, il indique via un relais au compresseur s'il doit se mettre en marche ou pas. Pour éviter de solliciter trop fréquemment le compresseur, celui-ci ne doit se mettre en marche que si la température mesurée dépasse un certain seuil, noté T_+ . Il fonctionnera jusqu'à ce que la température mesurée descende en dessous d'un autre seuil, noté T_- . On a ainsi : $T_- < T_{con} < T_+$. Un exemple de montage électrique réalisant cette fonction est donné sur la **Figure 1**.

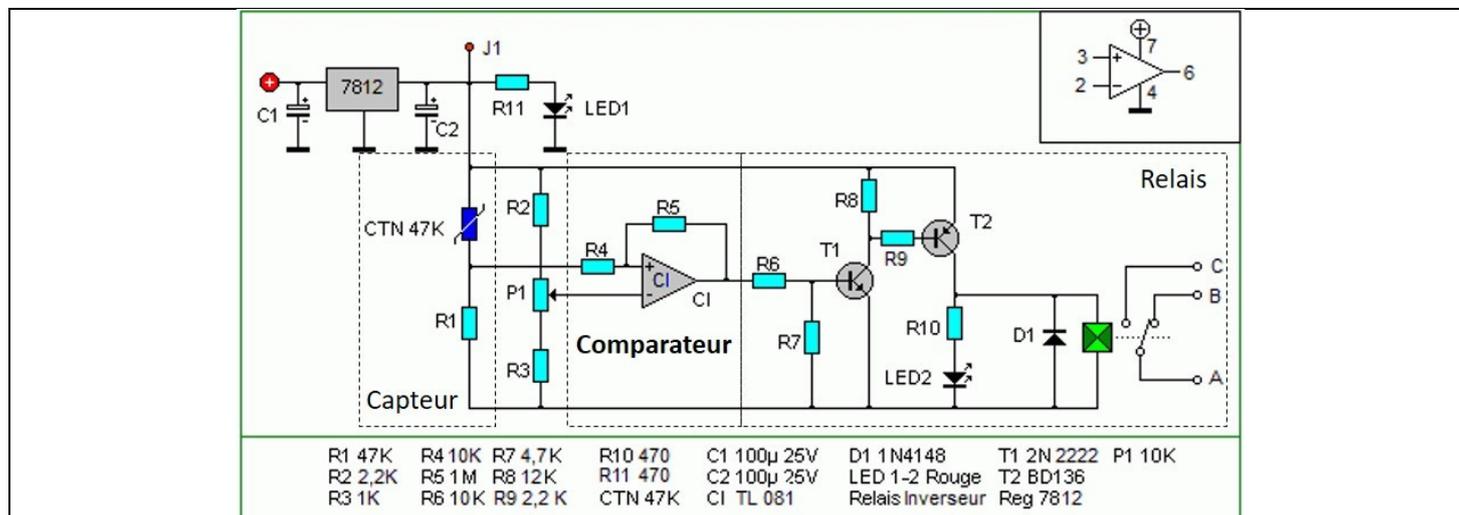


Figure 1. Schéma électrique d'un thermostat (source : <http://www.electronique-3d.fr/Thermostat.html>)

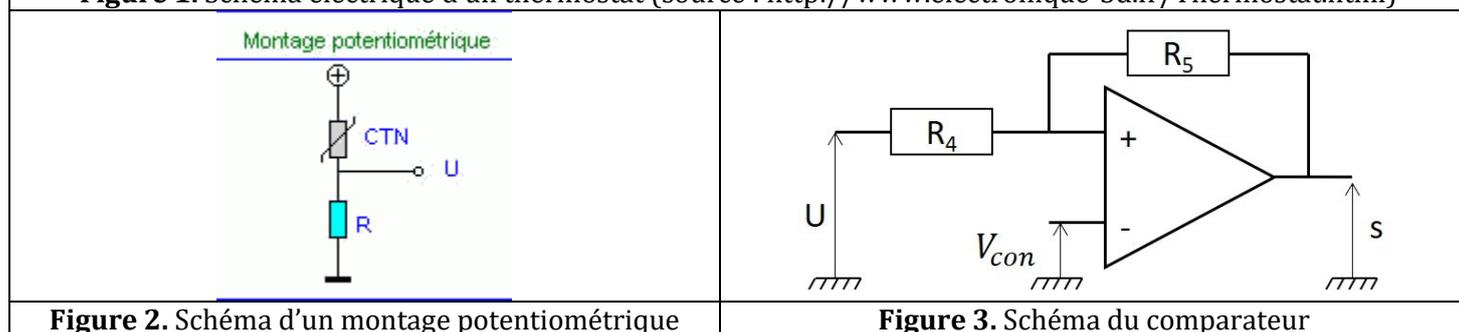


Figure 2. Schéma d'un montage potentiométrique

Figure 3. Schéma du comparateur

Etude du capteur

Le capteur de température est ici basé sur une thermistance, appelée CTN pour Coefficient de Température Négatif. En effet, sa résistance R_{CTN} diminue quand la température augmente, ce que l'on modélisera par $R_{CTN} = \alpha T_{mes}$. Ce capteur va alors délivrer une tension proportionnelle à la température mesurée T_{mes} via un montage potentiométrique, expliqué en **Figure 2**.

1. En imaginant que le montage potentiométrique est alimenté en $V_{J1} = 12\text{ V}$ (potentiel au point J1 sur la **Figure 1**), exprimer la tension U en fonction de V_{J1} , $R = R_1$ et R_{CTN} , la résistance de la CTN. Relier alors la tension U à la température mesurée T_{mes} . On précisera le signe de α .

La présence de R_2 en parallèle de la CTN permet de linéariser l'expression précédente sous la forme :

$$U = U_0 + \beta T_{mes} \text{ avec } U_0 > 0 \text{ et } \beta < 0 \text{ en } V/^\circ\text{C}$$

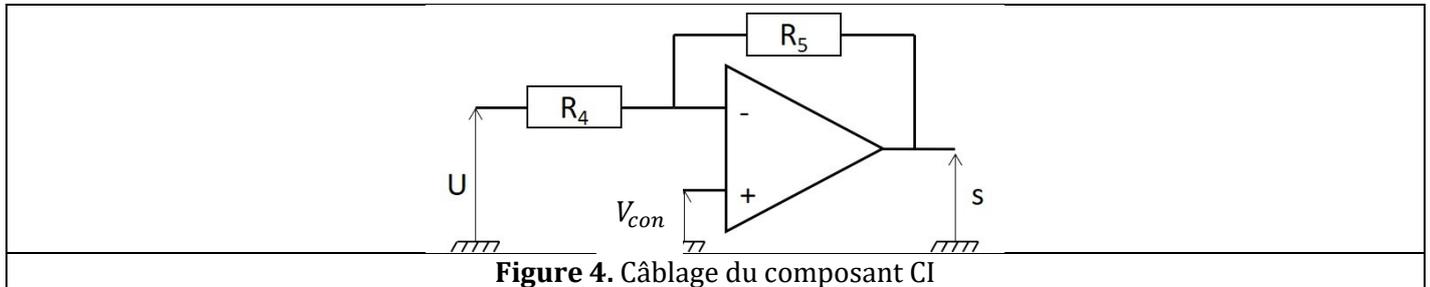
Etude du comparateur

La température de consigne T_{con} est ajustée à l'aide du potentiomètre P1. On obtient alors sur l'entrée inverseuse du composant CI une tension V_{con} qui lui est proportionnelle. On étudie alors le circuit comparateur de la **Figure 1**, simplifié sur la **Figure 3**.

2. Comment appelle-t-on le composant CI (**Figure 1**) ?
Si on le suppose idéal, tracer la caractéristique entrée-sortie de ce composant.
3. Comment appelle-t-on ce type de comparateur ? Déterminer ses tensions de seuil e_+ et e_- en fonction de V_{con} , R_4 , R_5 et V_{sat} , la tension de saturation du composant CI.
Tracer la caractéristique entrée-sortie $s = f(U)$ du comparateur.

4. Prenons le cas où la température mesurée T_{mes} augmente. Comment varie la tension U ? Comparer la tension U à la tension de seuil e_- lorsque la température mesurée T_{mes} dépasse la température T_+ . Que se passe-t-il alors au niveau de la tension de sortie s du composant CI? Que fait le compresseur?
5. Prenons le cas inverse où la température mesurée T_{mes} diminue. Expliquer alors le fonctionnement du thermostat si T_{mes} passe en-dessous de T_- .
6. En fonction des données en **Figure 1**, retrouver les valeurs de U_0 et β pour que $T_- = 4^\circ C$ et $T_+ = 6^\circ C$. On supposera de plus que $V_{sat} = 10 V$ et $V_{con} = 5 V$.

Le thermostat tout juste acheté, le technicien s'aperçoit qu'il ne fonctionne pas. En y regardant de plus près, il voit que le composant CI a été monté à l'envers comme sur la **Figure 4**.



7. Expliquer quel est le problème : pourquoi ce montage ne fonctionne-t-il pas en comparateur? Quelle est la fonction réalisée par ce montage?

7 Annexe : Notice du TL081

Schematic diagram TL081

1 Schematic diagram

Figure 1. Schematic diagram

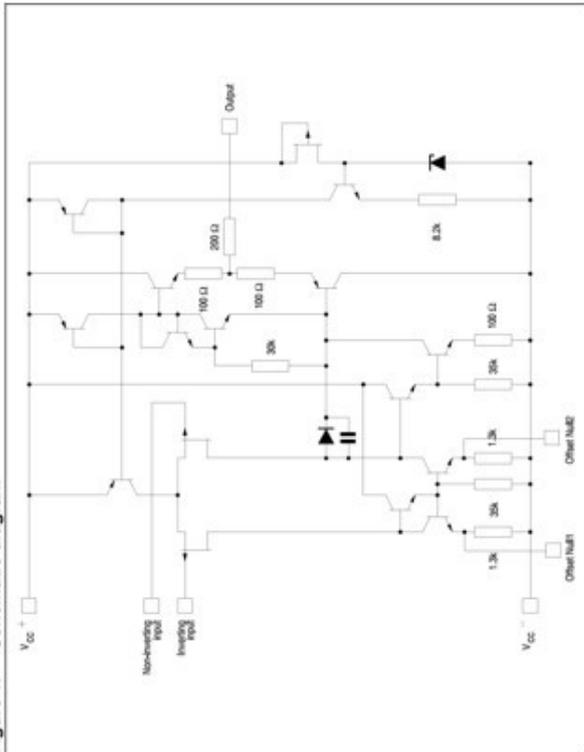
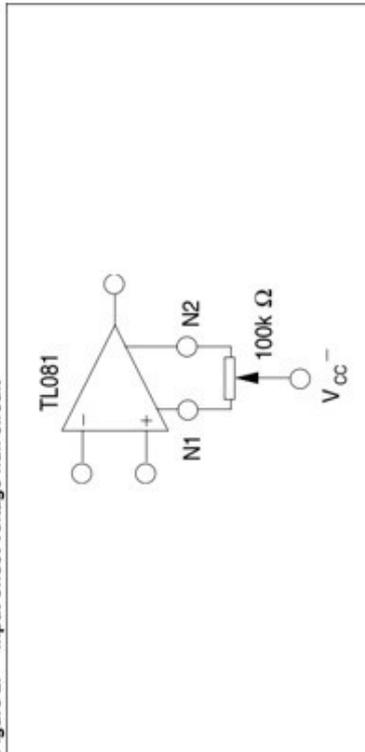


Figure 2. Input offset voltage null circuit



2/15



TL081

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.

N
DIP8
(Plastic package)

D
SO-8
(Plastic micropackage)

Pin connections
(top view)

- 1 - Offset null 1
- 2 - Inverting input
- 3 - Non-inverting input
- 4 - V_{CC}^-
- 5 - Offset null 2
- 6 - Output
- 7 - V_{CC}^+
- 8 - N.C.

June 2008

Rev 3

1/15

www.st.com

TL081 Electrical characteristics

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

Symbol	Parameter	TL081I, 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		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	$\frac{nV}{\sqrt{Hz}}$
\varnothing_m	Phase margin						45	degrees

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

TL081

3 Electrical characteristics

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

Symbol	Parameter	TL081I, AC, AI, BC, BI			TL081C			Unit
		Min.	Typ.	Max.	Min.	Typ.	Max.	
V_{io}	Input offset voltage ($R_S = 50\Omega$) TL081 TL081A TL081B $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$		3 3 1	10 6 3		3 3 13	10	mV
DV_{io}	Input offset voltage drift		10				10	$\mu V/^{\circ}C$
I_o	Input offset current (1) $T_{amb} = +25^{\circ}C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$		5	100		5	100	pA
I_b	Input bias current (1) $T_{amb} = +25^{\circ}C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$		20	200		20	400	nA
A_{vd}	Large signal voltage gain ($R_L = 2k\Omega$, $V_o = \pm 10V$) $T_{amb} = +25^{\circ}C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$		50	200		25	200	V/mV
SVR	Supply voltage rejection ratio ($R_S = 50\Omega$) $T_{amb} = +25^{\circ}C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$		80	86		70	86	dB
I_{CC}	Supply current, no load $T_{amb} = +25^{\circ}C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$		1.4	2.5		1.4	2.5	mA
V_{com}	Input common mode voltage range		± 11	-12		± 11	-12	V
CMR	Common mode rejection ratio ($R_S = 50\Omega$) $T_{amb} = +25^{\circ}C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$		80	86		70	86	dB
I_{os}	Output short-circuit current $T_{amb} = +25^{\circ}C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$		10	40		10	40	mA
$\pm V_{opp}$	Output voltage swing $T_{amb} = +25^{\circ}C$ $T_{min} \leq T_{amb} \leq T_{max}$		10	12		10	12	V
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

