

L'AMPLIFICATEUR OPÉRATIONNEL DOCUMENTATION

1. Présentation

L'amplificateur opérationnel peut être considéré comme un composant. C'est, en réalité, un circuit complexe constitué de plusieurs transistors et de plusieurs résistances. Le tout est miniaturisé et installé dans un circuit intégré.

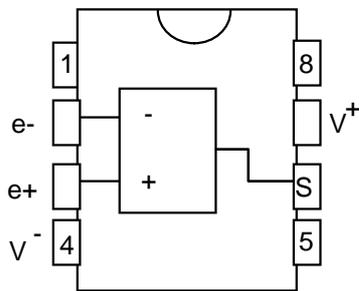
Les techniques d'intégration permettent d'obtenir un composant très proche de l'idéal. De ce fait l'amplificateur opérationnel est simple à utiliser et les montages sont faciles à mettre au point.

2. Aspect extérieur

Extérieurement, l'amplificateur opérationnel se présente sous la forme d'un boîtier de circuit intégré qui comporte souvent huit broches.

Il existe des boîtiers qui contiennent deux, trois ou quatre amplificateurs opérationnels.

2.1. Le brochage



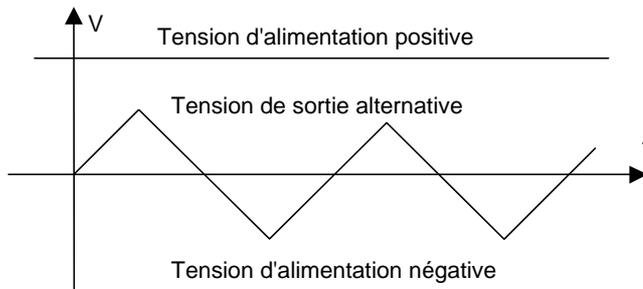
Vue de dessus

Le circuit intégré est toujours représenté vu de dessus. La première broche est repérée soit par une encoche soit par un trait.

Ce boîtier ne contient qu'un seul composant. La broche V+ reçoit l'alimentation positive, la broche V- reçoit l'alimentation négative. Attention il n'y a pas de broche de masse.

3. La particularité des amplificateurs opérationnels

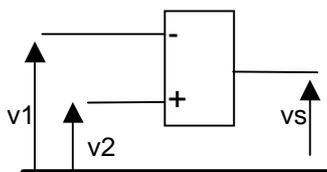
Les amplificateurs opérationnels sont alimentés par une alimentation symétrique¹.



Grâce à l'alimentation symétrique, l'amplificateur opérationnel peut travailler, très simplement, avec une tension alternative.

4. Les schémas classiques

4.1. Le comparateur



C'est le montage le plus simple. Il utilise la formule de définition de l'amplificateur opérationnel c'est à dire :

$$v_s = A \cdot (v_2 - v_1)$$

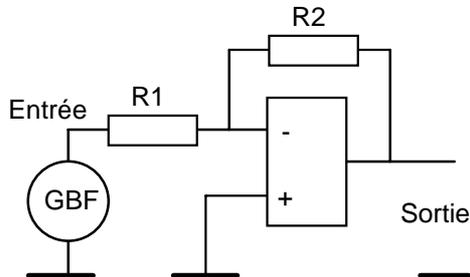
La tension de sortie ne peut prendre que l'une des deux valeurs V^+ ou V^-

¹ Voir l'annexe

Questions :

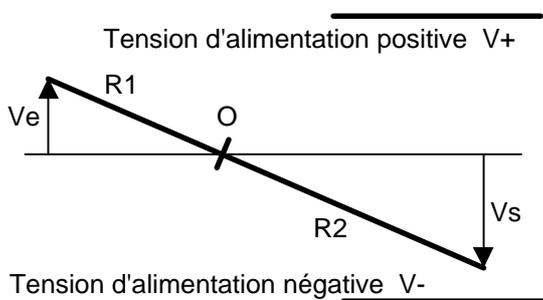
- Le coefficient A étant un nombre positif très grand, tracez la caractéristique $v_s = f(v_1)$ avec v_2 fixé. On connaît la valeur des tensions d'alimentation.
- Expliquez pourquoi on nomme ce montage **comparateur**

4.2. L'amplificateur inverseur



On remarque que les alimentations ne sont pas représentées. Elles doivent cependant être câblées.

4.2.1. Explication graphique du fonctionnement



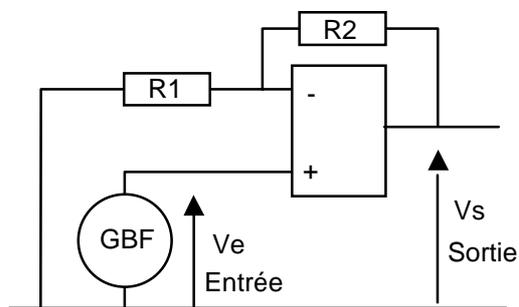
Je donne cette explication à titre de curiosité, elle n'est pas à apprendre par cœur.

Considérons deux segments alignés, le premier d'une longueur représentant R_1 et l'autre d'une longueur représentant R_2 . Ils sont libres en rotation autour de O .

Questions :

- En appliquant le théorème de Thalès, vous pouvez retrouver la relation qui lie V_s à V_e . Les résistances sont connues. Attention aux signes.
- Pour quelle raison appelle-t-on ce montage amplificateur inverseur ?
- V_e est une tension alternative sinusoïdale d'amplitude 1V, $R_2 = 2.R_1$. Dessinez V_e et V_s en fonction du temps dans un même repère.
- Quelle est la plus grande valeur que peut prendre V_s ? Quelle est la plus petite ?
- Quelle est la plus grande valeur² que peut prendre V_e ? Quelle est la plus petite ?

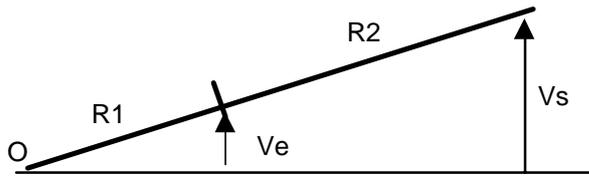
4.3. L'amplificateur non-inverseur



Le second montage classique est un amplificateur non-inverseur.

² V_e peut prendre n'importe quelle valeur compatible avec les possibilités de l'amplificateur opérationnel. Mais au-delà d'une certaine valeur, le modèle n'est plus valable.

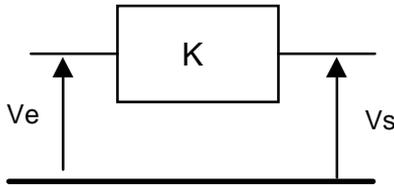
4.3.1. Explication graphique du fonctionnement



De la même manière que ci-dessus, le théorème de Thalès permet de trouver la relation liant V_s à V_e .

Répondre aux mêmes questions que précédemment.

4.4. La fonction réalisée par les deux montages précédents

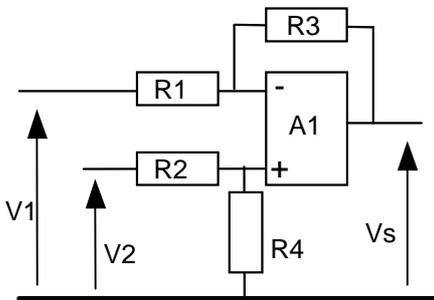


La fonction est la multiplication de la tension d'entrée par un coefficient réel³ K.

K est négatif pour le montage inverseur

K est positif pour le montage non-inverseur.

4.5. Le soustracteur



Le calcul de ce montage constitue un exercice parfait pour l'étude du théorème de superposition.

Si les résistances sont égales, la relation liant les tensions est :

$$V_s = V_2 - V_1$$

Si les résistances sont inégales la relation se complique, mais son établissement reste simple.

5. Les caractéristiques de l'amplificateur opérationnel idéal

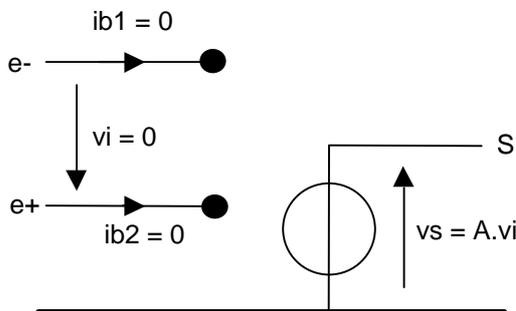
Ce sont ces caractéristiques que vous utiliserez toujours pour faire vos calculs. La principale difficulté est de savoir si le montage étudié fonctionne régime en linéaire ou saturé.

5.1. Fonctionnement linéaire ou saturé

Le moyen simple est de regarder où se fait le retour de la sortie vers l'entrée. Si le retour se fait vers l'entrée moins, le montage a de grandes chances de fonctionner en régime linéaire⁴. Les deux montages ci-dessus sont dans ce cas. Le comparateur fonctionne en régime saturé.

5.2. Modèle équivalent en fonctionnement linéaire

J'appelle v_i la tension différentielle d'entrée, certains la nomment ε .



Questions :

- Que représentent les lettres S, e-, e+ ?
- Donnez l'expression de v_i en fonction de v_{e+} et de v_{e-} , les tensions des entrées par rapport à la masse.
- Replacer le modèle équivalent dans le symbole rectangulaire de l'amplificateur opérationnel.
- Que représente le cercle ?
- Quelle est la résistance de sortie du modèle ?
- Quelles sont les résistances d'entrées ?

³ Vous verrez en terminale que le coefficient K peut être plus complexe

⁴ Sauf en cas d'entrée trop grande

6. Les méthodes de calcul des montages linéaires

6.1. Présentation

Un montage fonctionnant en régime linéaire possède les caractéristiques suivantes :

Présence d'une partie du circuit qui ramène une fraction de la tension de sortie vers l'entrée : c'est la **contre réaction**.

La tension de sortie peut prendre toute valeur entre V_+ et V_- . (les tensions d'alimentation)

La tension différentielle d'entrée est si faible qu'on peut la négliger.

Les courants d'entrées sont nuls.

6.2. La phrase magique

Cette phrase décrit, de manière qualitative⁵, le fonctionnement des montages. Son utilisation réclame un peu de réflexion.

L'amplificateur opérationnel fait ce qu'il peut pour maintenir la tension différentielle d'entrée nulle, s'il y parvient le montage fonctionne en linéaire sinon il fonctionne en saturé.

Exemple : considérons le montage non-inverseur. L'entrée plus est soumise à v_e . L'entrée moins reçoit une fraction de la tension de sortie⁶. Si v_e augmente, alors v_s doit augmenter également.

Questions :

- Pourquoi v_s doit-il augmenter quand v_e augmente ? (appliquez la phrase magique)
- Retrouver l'expression liant la tension de sortie à la tension d'entrée en utilisant la phrase magique (connaissez-vous la formule du diviseur de tension ?)
- Vérifiez avec ce que vous avez trouvé au § 4.

6.3. L'étude des tensions et des courants

C'est la méthode classique qui convient bien pour les montages simples. On applique la loi d'additivité des tensions et la loi d'additivité des courants. Le principe est d'utiliser le fait que la tension différentielle d'entrée est nulle pour appliquer la loi des tensions, et le fait que les courants d'entrées sont nuls pour appliquer la loi des courants.

Exercice : appliquez cette méthode pour calculer la relation liant la tension de sortie à la tension d'entrée du montage inverseur. *Conseils : dessinez toutes les flèches tensions et toutes les flèches courant, simplifiez en utilisant les caractéristiques de l'amplificateur opérationnel idéal.*

Il ne reste plus qu'à appliquer les théorèmes généraux de l'électricité.

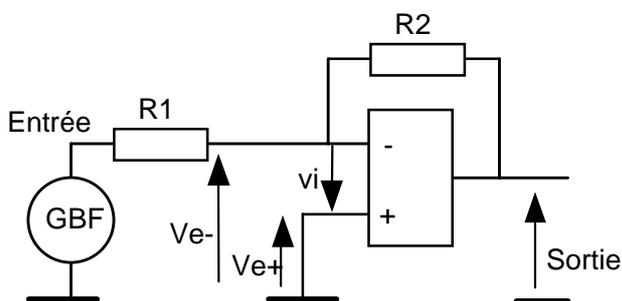
6.4. Le théorème de superposition

Dans un circuit linéaire, le courant créé dans une branche par plusieurs sources indépendantes agissant simultanément, est égal à la somme des courants produits dans cette même branche par les différentes sources agissant isolément.

Même chose pour la tension.

6.5. Application du théorème de superposition

Considérons le montage inverseur



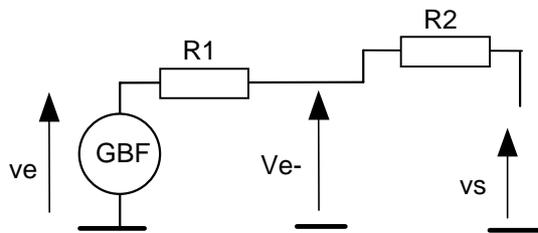
v_i est la tension différentielle d'entrée. Notez bien le sens positif.

Il s'agit de trouver la relation liant la tension de sortie à la tension d'entrée et aux résistances.

Le principe de résolution consiste à exprimer v_i en fonction de V_{e+} et de V_{e-} . Étant donné que le montage fonctionne en régime linéaire, la tension v_i est nulle. On arrive ainsi à l'expression cherchée. Cette expression n'est valable que dans la mesure où v_i est nulle c'est-à-dire que le montage reste dans le domaine linéaire.

⁵ c'est à dire sans calculs

⁶ R1 et R2 forment un diviseur de tension



On peut calculer $V_{e-} = f(v_e, v_s, R_1, R_2)$ par le théorème de superposition.

Annulons v_s , on se trouve en face d'un diviseur de tension $(V_{e-})_1 = \alpha \cdot v_e$

Annulons v_e , nous voyons de nouveau un diviseur de tension $(V_{e-})_2 = \beta \cdot v_s$

Donc $V_{e-} = \alpha \cdot v_e + \beta \cdot v_s$

Dans ce montage, $V_{e+} = 0V$ alors $v_i = (V_{e+}) - (V_{e-}) = -(\alpha \cdot v_e + \beta \cdot v_s)$

Dans la mesure où le montage reste dans le domaine linéaire, $v_i = 0$ donc $v_s = -\frac{\alpha}{\beta} \cdot v_e$

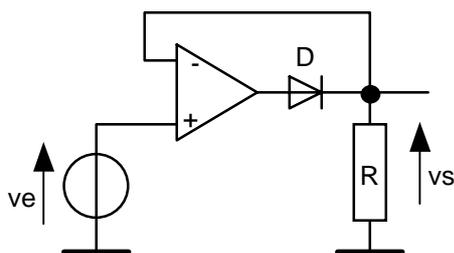
Remarquez la technique qui consiste à utiliser des symboles α et β à la place des expressions, lourdes, en fonction de R_1 et R_2 . Cette technique permet d'alléger les calculs et d'éviter les erreurs.

Questions

- Dessinez les schémas qui mettent en évidence la présence de diviseurs de tension lors de l'application du théorème de superposition.
- Donnez les expressions de α et de β en fonction de R_1 et R_2 .
- Donnez l'expression de v_s en fonction de v_e .
- Appliquez cette méthode au calcul de l'expression du montage soustracteur.
- Trouvez l'expression liant R_1, R_2, R_3, R_4 pour que l'expression se mette sous la forme : $v_s = k \cdot (v_{e2} - v_{e1})$

7. Les montages utiles

7.1. Avec une diode

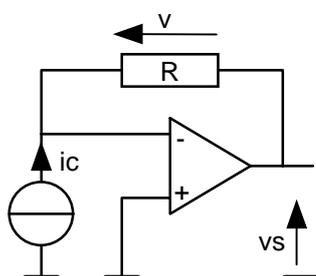


Ce montage peut s'étudier avec la phrase magique. R est une résistance de rappel.

Questions :

- Donnez l'expression liant v_s à v_e .
- La diode D est réelle donc imparfaite. Rappelez quelles sont ses imperfections.
- Expliquez, toujours par l'application de la phrase magique, comment l'amplificateur opérationnel lutte contre ces imperfections.
- Quel résultat obtient-on ? (C'est-à-dire quel est le modèle équivalent à ce montage ?)

7.2. Avec un générateur de courant



Ce montage fonctionne en régime linéaire.

Questions :

- Quelle est la tension aux bornes du générateur de courant ?
- Quelle est l'intensité du courant traversant R ? Pourquoi ?
- Quelle est la relation entre v_s et i_c ?
- Ce montage porte le nom de **convertisseur courant-tension**. Pouvez-vous le justifier ?

8. Les montages fonctionnant en régime saturé

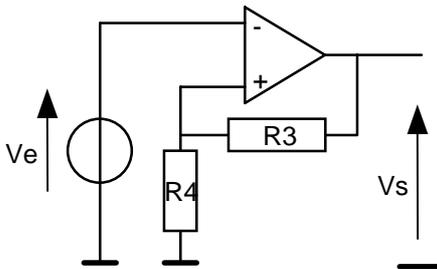
8.1. Présentation

Un montage saturé, ne peut plus s'étudier par les méthodes ci-dessus. En effet, la tension différentielle d'entrée n'est plus nulle, la tension de sortie ne peut prendre que l'une des valeurs V_+ ou V_- .

Le principe de l'étude est de déterminer les instants où la tension de sortie bascule de V_+ à V_- ou de V_- à V_+ . La frontière de basculement est marquée par le passage par 0 de la tension différentielle d'entrée.

8.2. Le comparateur à hystérésis version 1

Un phénomène physique périodique présente un hystérésis lorsqu'il "n'emprunte par le même chemin à l'aller et au retour".



vous pouvez remarquer que le circuit $R_3 R_4$ ramène une partie de la tension de sortie vers l'entrée + c'est le signe d'un fonctionnement en régime saturé.

La tension (V_{e+}) est égale à $\gamma.V_s$ avec $V_s \in \{V_- ; V_+\}$

La tension différentielle d'entrée est égale à

$$v_i = \gamma.V_s - V_e$$

Comme V_s peut prendre deux valeurs, cette équation va présenter deux formes.

Questions :

- Quelles sont ces deux formes ?
- Indiquez quelles sont les frontières de basculement.

8.3. Technique d'étude des systèmes saturés

Le paragraphe précédent nous permet de déterminer deux points mais pas la forme de la caractéristique de sortie.

Voyons une méthode d'étude de ce genre de montage. Le fonctionnement est cyclique, il faut "l'ouvrir" afin de l'étudier.

Nous allons utiliser la relation entre le signe de la tension différentielle d'entrée et celui de la tension de sortie. Quand la tension différentielle d'entrée est positive, la tension de sortie l'est aussi et réciproquement.

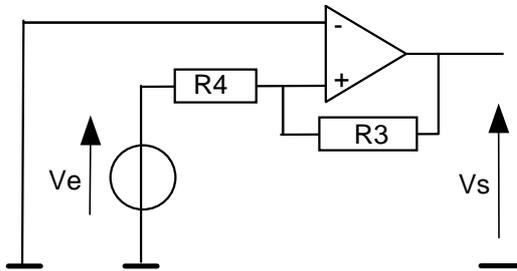
Commençons notre étude quand la tension de sortie est égale à V_+ et dressons un tableau à l'aide des équations du § précédent.

V_s	(V_+)	
équ	$\gamma (V_+) - V_e > 0$	
v_i	$v_i > 0$	
V_e	$V_e < \gamma (V_+)$	
V_s		(V_-)
équ		$\gamma (V_-) - V_e < 0$
v_i		$v_i < 0$
V_e		$V_e > \gamma (V_-)$

Questions :

- Tracez l'allure de la caractéristique $V_s = f(V_e)$ du comparateur à hystérésis version 1
- Donnez l'expression de la largeur de l'hystérésis.
- Simplifiez cette équation sachant que souvent, $|V_-| = V_+ = E$
- De quelle façon peut-on régler la largeur de l'hystérésis pour une alimentation donnée ?

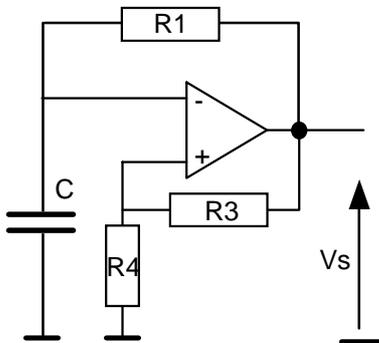
8.4. Le comparateur à hystérésis version 2



Étudiez cette deuxième version du comparateur à hystérésis

9. Oscillateur

En association avec un réseau RC, un comparateur à hystérésis constitue un oscillateur délivrant une tension rectangulaire.



Question :

- Le comparateur utilisé ici est la version 1, est-il possible d'employer la version 2 ?
- La fréquence du signal produit dépend du réseau RC mais aussi du rapport $R_4/(R_3+R_4)$
- Je vous donne une représentation graphique qui vous permet de calculer la demi-période pour un rapport $R_4/(R_3+R_4)$ de $2/3$.
- Pour utiliser ce graphe, lire les feuilles "555-exponentielles"

