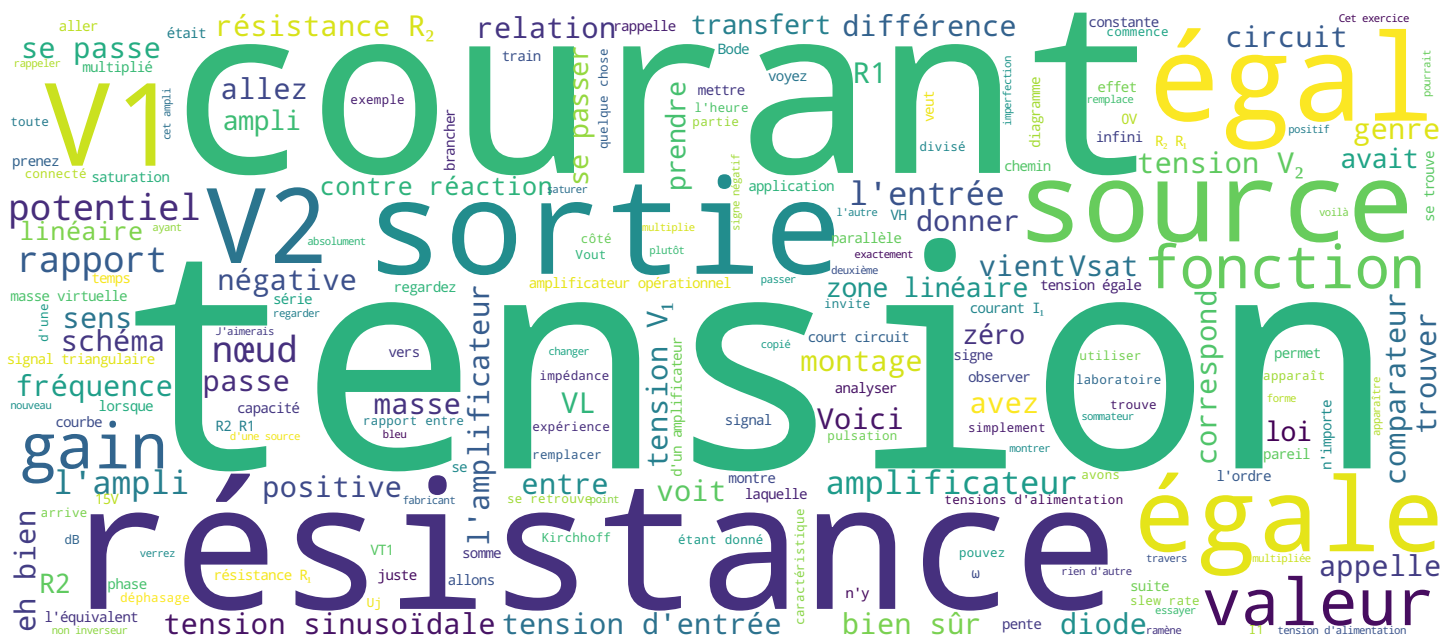


# Amplificateur opérationnel

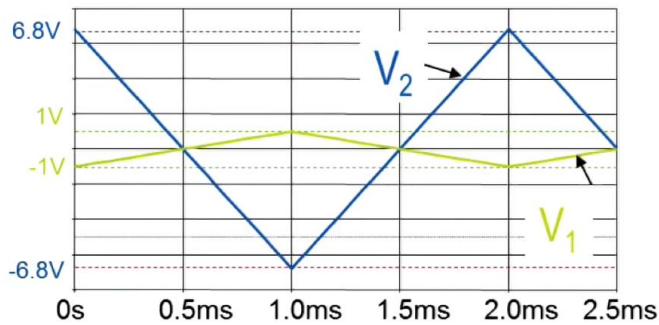
## 2.2 Montage inverseur indépendant de la fréquence

Prof. Maher Kayal

Electronics Laboratory-ELAB

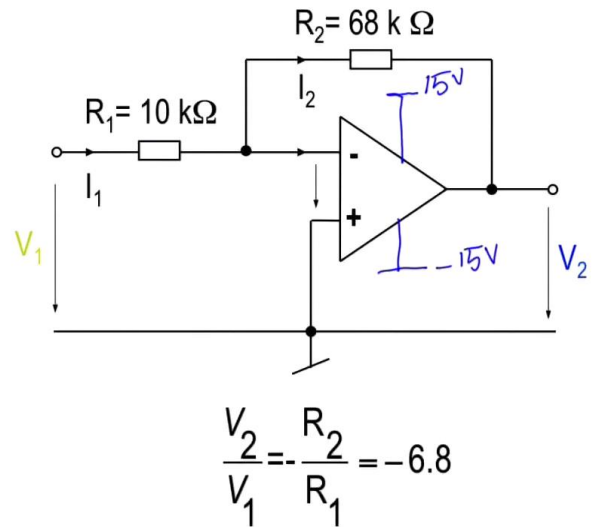


# TP: Amplificateur inverseur



Amplificateur non saturé

$$I_1 = I_2 = \frac{V_1}{R_1} = -\frac{V_2}{R_2}$$



$$\frac{V_2}{V_1} = -\frac{R_2}{R_1} = -6.8$$

Electronique I

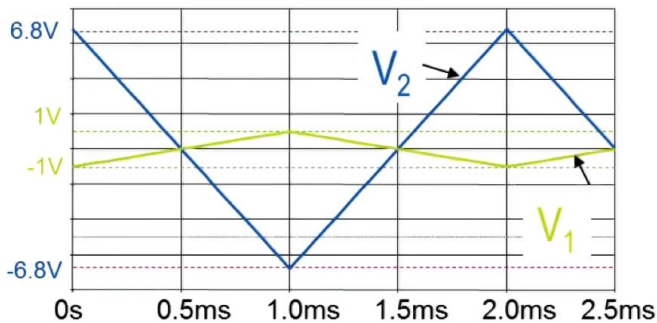
Je vous invite maintenant à faire une expérience. On va faire cette expérience ensemble. Vous allez prendre un amplificateur opérationnel, vous allez vous-même l'alimenter avec deux tensions d'alimentation. Vous allez choisir une tension d'alimentation de l'ordre de 15V, par exemple, positive, et une tension d'alimentation de l'ordre de -15V, négative. Vous allez choisir une résistance  $R_2$  égale à 68 kΩ et une résistance  $R_1$  de 10 kΩ. Faites ce genre de montage. On va analyser ce qu'il va se passer entre la tension de sortie en bleu, la tension d'entrée qui est en jaune, une fois que le rapport entre les deux tensions est égal à -6,8 qui n'est rien d'autre que le rapport de 68 kΩ divisé par 10 kΩ. Voyons voir ce qu'il se passe si vous branchez à l'entrée un signal triangulaire. Ici, j'ai choisi de brancher une tension triangulaire dont l'amplitude est égale à 1V. Et j'observe à la sortie. Regardez comme c'est linéaire, la tension de sortie, par rapport à la tension d'entrée, avec une pente qui est l'opposé de celle de l'entrée. Normal, parce qu'on a un signe négatif et cette tension négative veut dire, pour un signal triangulaire, que lorsque la pente est positive, la pente qu'on verrait à la sortie serait une pente négative.

Notes

Summary

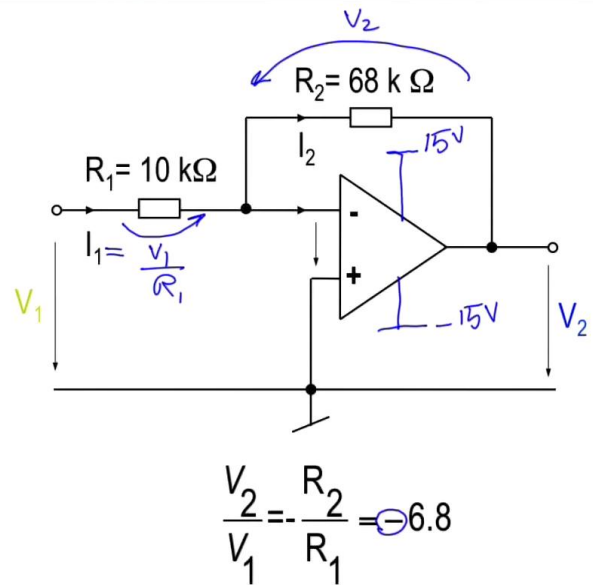


# TP: Amplificateur inverseur



Amplificateur non saturé

$$I_1 = I_2 = \frac{V_1}{R_1} = -\frac{V_2}{R_2}$$



Electronique I

Observons ce qu'il se passe dans les courants de 2. On a une résistance  $R_1$  et  $R_2$ . Le courant  $I_1$ , on vient de le voir, n'est rien d'autre que la tension  $V_1$  qu'on voit ici. Donc ce courant est égal à  $V_1$  divisé par la résistance  $R_1$ . Pareil pour la résistance  $R_2$  parce que la tension  $V_2$  est cette tension qu'on voit là. Donc la tension  $V_2$ , ou la relation entre le courant  $I_2$ , est égale à  $-V_2$  divisé par la résistance  $R_2$ . Observez le sens positif du courant et le sens de la tension en sens opposé, ce qui nous amène à parler de ces signes moins. Quand on regarde les deux courants, et on les égalise tel qu'on l'a vu, votre oscilloscope vous montrerait quelque chose de ce style-là. On va essayer de saturer notre amplificateur. Tout de suite, je vais changer le niveau de la tension à l'entrée et faire en sorte que je pousse mon amplificateur à saturer à une tension de saturation qui est... qui sont les tensions qu'on a alimenté l'ampli avec.

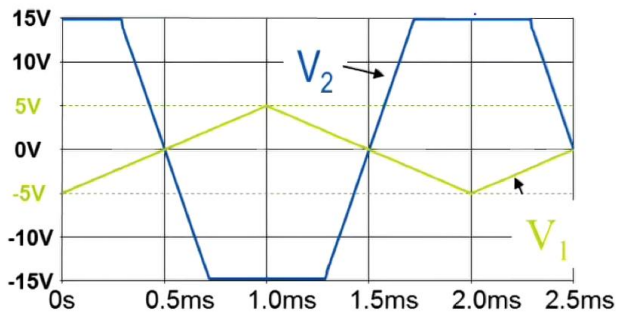
Notes

Summary



1m 29s

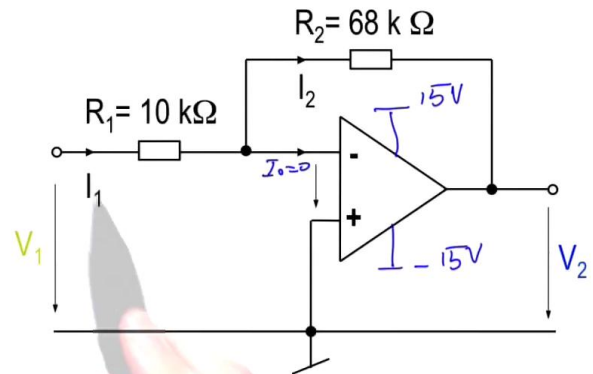
# TP: Amplificateur inverseur



**Amplificateur saturé**  
*Dans la zone de saturation:*

$$V_2 = \pm V_{sat}$$

$$I_1 = I_2, \frac{V_1}{R_1} \neq -\frac{V_2}{R_2}$$



Electronique I

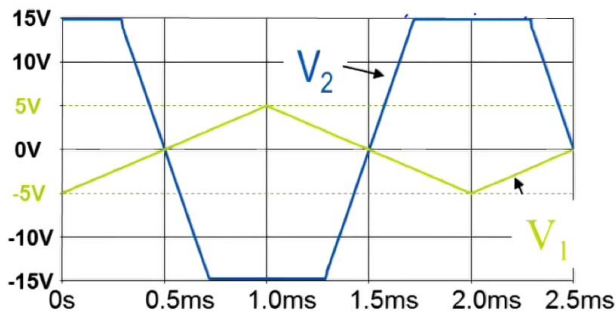
Et voilà ce qu'il va se passer : Lorsque votre amplificateur est saturé, donc j'ai appliqué une tension égale à 5V de valeur de crête. Rappelez-vous qu'on a alimenté à + ou - 15V donc il y avait 15V de côté-là, et -15V de côté-là. Donc, notre amplificateur ne peut pas aller au-delà des rails de l'alimentation. Ses tensions de saturations sont  $V_{sat+} = 15V$  et  $V_{sat-} = -15V$  donc il va taper contre ces tensions d'alimentation et notre ampli va saturer d'un côté et de l'autre. L'ampli n'est donc plus linéaire. On a appliqué une tension linéaire, on s'attend à ce que la sortie soit linéaire, mais vu que l'amplificateur ne peut pas dépasser ces tensions d'alimentation, il sature. Est-ce que je peux toujours dire que la relation  $I_1$  est égale à  $I_2$  ? Absolument pas. Lorsque l'amplificateur est sorti de sa zone linéaire il est devenu saturé. Il est exclu que je puisse parler d'un amplificateur qui se comporte avec une loi linéaire. Je peux toujours dire que  $I_1 = I_2$ , ça va de soit car le courant, ici, est toujours égal à 0. Cependant, ce courant, il va continuer son chemin, mais ce courant-là, ou cette tension-là, n'est plus copié de là à là parce que l'ampli ne se trouve plus dans la zone linéaire dans laquelle  $V^+ = V^-$  donc je ne peux pas dire que  $V_1/R_1 = -V_2/R_2$  étant donné que ce potentiel n'est plus égal à 0.

Notes

Summary



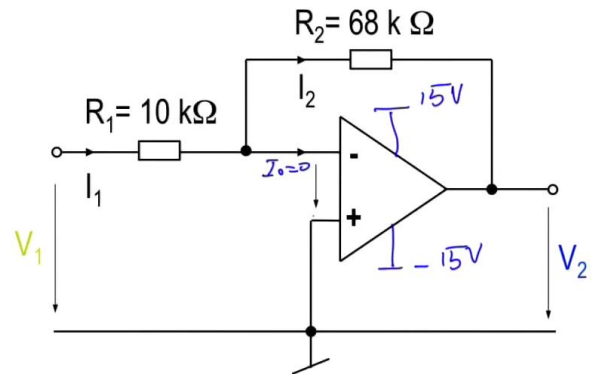
# TP: Amplificateur inverseur



**Amplificateur saturé**  
Dans la zone de saturation:

$$V_2 = \pm V_{sat}$$

$$I_1 = I_2, \frac{V_1}{R_1} \neq -\frac{V_2}{R_2}$$



Electronique I

Donc l'amplificateur est dans la zone saturée, ici. Là, quand l'ampli est dans la zone linéaire, de nouveau il entraîne d'être dans une boucle de réactions négatives, il est resté dans sa zone linéaire donc la relation  $V(\text{out})$  ou  $V_2$  en fonction de  $V_1 = -R_2/R_1$  est appliquée là, par rapport à ça. Mais, quand j'arrive à la saturation, et bien je me retrouve de là à là avec un amplificateur saturé. Faites cette expérience au laboratoire et regardez ce qu'il va se passer. Vous pouvez, bien sûr, brancher d'autres types de signaux, et je vous conseille de brancher une tension sinusoïdale. On va aller voir ce qu'il se passe si, dans votre laboratoire, vous remplacez le signal triangulaire par une tension sinusoïdale, ce qu'on va voir à la sortie.

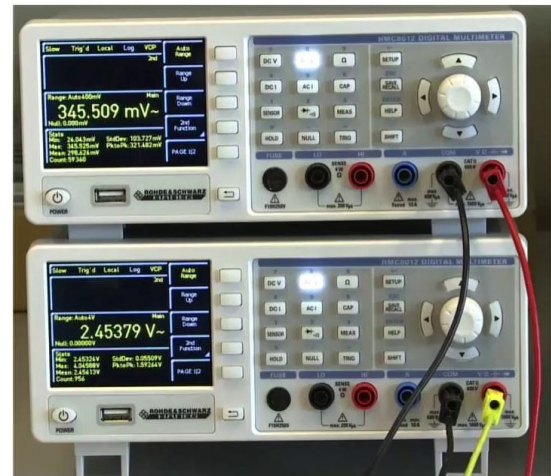
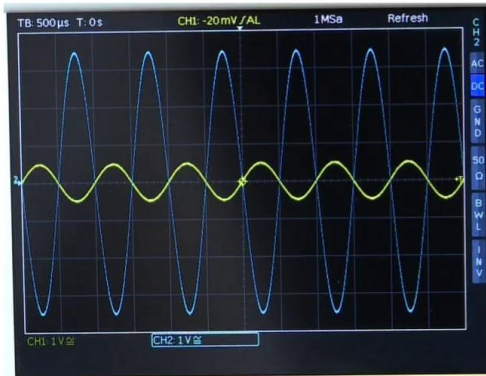
Notes

Summary



4m 13s

# TP: Amplificateur inverseur



Electronique I

Voilà ce qu'on va observer à la sortie d'un amplificateur dans lequel on a été brancher une tension sinusoïdale à l'entrée, que vous voyez avec la couleur jaune, et la tension sinusoïdale qui apparaît à la sortie, absolument avec un déphasage de  $180^\circ$ . La notion de signe - avec une tension sinusoïdale veut dire une inversion de phase. Donc la tension de sortie est inversée de phase. Il y a un déphasage de  $180^\circ$  entre la tension sinusoïdale qui est apparue à l'entrée par rapport à celle qui va être amplifiée, bien sûr, on voit que l'ampli a multiplié par le 6,8 qui était le gain de l'ampli. Vous n'avez qu'à regarder les deux affichages de ces deux tensions, ce sont des valeurs efficaces de la tension d'entrée, la tension d'entrée qui est ici, et la tension de sortie qui est là. Si vous faites le rapport entre ces deux tensions, vous êtes amené à trouver le gain de l'ampli qui est de l'ordre de  $6,8 \text{ k}\Omega$ . Bien sûr, il faut considérer que cette expérience est faite avec des résistances qui ont une certaine tolérance. Donc, la différence s'explique par la tolérance de nos composants.

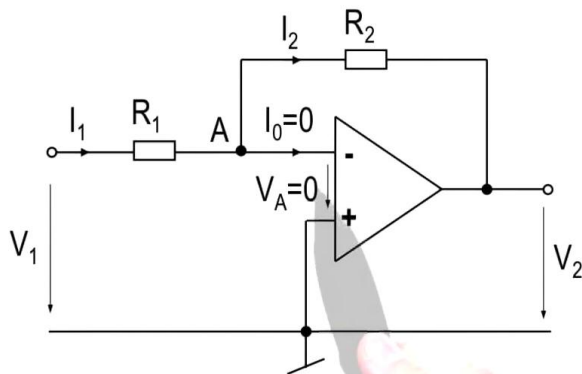
Notes

Summary

5m 01s

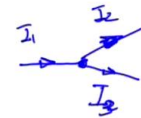


# Exercice: Amplificateur inverseur



$$\frac{V_2}{V_1} = - \frac{R_2}{R_1}$$

$$V_A = 0$$



Electronique I

Voici le dernier schéma qu'on a étudié. C'est un amplificateur qui contient une résistance de contre-réaction, une résistance d'entrée, avec une tension de la sortie qui est toujours l'inverse de la tension de l'entrée. Je voudrais rapidement rappeler que le rapport entre la tension  $V_2 / V_1$  est égal à  $-R_2$  sur la résistance  $R_1$ . Et j'aimerais maintenant montrer la possibilité qui est offerte par l'amplificateur lorsque le potentiel de ce nœud A est égal au potentiel qui est connecté sur la borne positif. Autrement dit, la tension  $V_A = 0$ . C'est extrêmement intéressant comme caractéristique. Parce qu'en analysant ce qu'on observe ici, je vais juste vous rappeler que la loi de Kirchhoff vous dit que quand vous prenez un nœud et vous amenez un courant dans ce nœud-là si ce courant-là, on va l'appeler le courant  $I_1$ , eh bien les courants qui sortent de ce nœud-là sont exactement la somme de ce courant  $I_1$ . Vous avez un courant  $I_1 = I_2 + I_3$ . Cette loi-là est toujours vérifiée. Le courant qui arrive ici, il va repasser par là parce qu'aucun courant ne passe par le nœud  $I_0$  donc ce courant-là est égal à ça + ça. Très simple, facile.

Notes

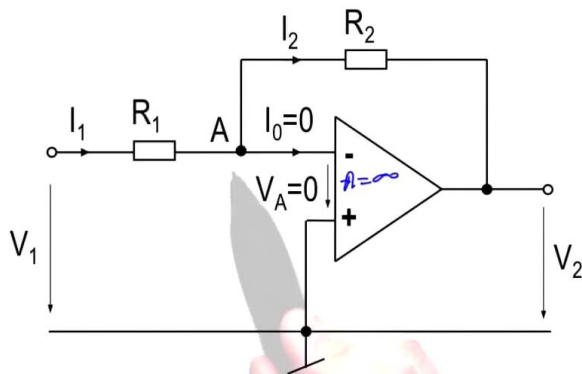
Summary

6m 11s



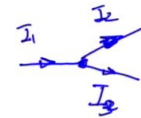


# Exercice: Amplificateur inverseur



$$\frac{V_2}{V_1} = - \frac{R_2}{R_1}$$

$$V_A = 0$$



Electronique I

Mais, dans ce schéma-là, si on regarde ce qu'il se passe dans le potentiel du nœud A, on voit que la différence de potentiel, grâce à la contre-réaction de l'ampli, c'est-à-dire le fait qu'un amplificateur, quand il commence à contre-réactionner il va essayer de trouver une relation linéaire entre cette tension et celle-ci, celle que vous voyez là. La différence de tension est toujours égale à 0. Je rappelle que le gain de cet ampli A est égal à infini. Donc, pour une tension de sortie finie, l'ampli n'est pas saturé, cette tension  $V_2$  divisé par A ramène toujours à une différence de tension qui est égale à 0. Donc, la tension au nœud A est égale à la tension qu'on a ici. En l'occurrence, dans cet exemple-ci, on montre qu'on a connecté à la masse. Donc si ce potentiel est égal à 0V, ce potentiel est aussi donc égal à 0V. Extraordinaire comme caractéristique. Observez ce qu'il se passe. Vous allez avoir un courant qui passe. Ce courant passe par ce chemin-là. Le potentiel dans le nœud-là est égal à ceci, donc est égal à 0V. Il n'y a donc aucune variation de cette tension, indépendamment de ce qu'il se passe entre la tension  $V_1$  qui va apparaître ici, ça, c'est la tension  $V_1$ , et la tension  $V_2$  qui va apparaître ici, ça, c'est la tension  $V_2$ .

Notes

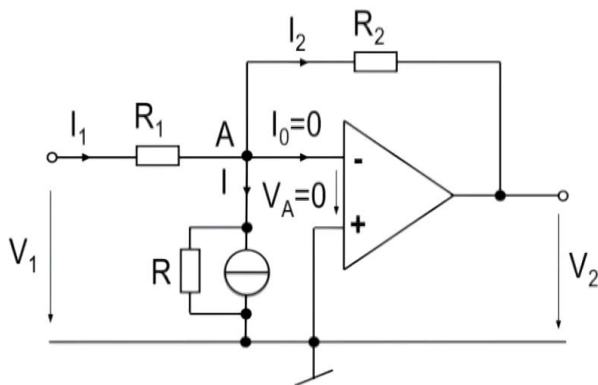
Summary



7m 38s



# Exercice: Amplificateur inverseur



On va exploiter ceci. Si vous arrivez à connecter dans ce nœud-là quoi que ce soit comme source externe qui viendra ajouter du courant, il n'affectera pas la tension. On appelle ça la masse virtuelle. On a créé un court-circuit à la masse en ayant une différence de tension de 0 sans pour autant qu'on applique ça sur le courant. Le courant ne passera pas dans la masse. Donc il ne filera pas dans ce potentiel 0. Il continue son chemin par un autre biais, à travers la résistance  $R_2$ , tout en imposant le potentiel de la masse toujours au nœud A. Donc il n'y a absolument aucun effet de courant qui passe sur ce potentiel parce que l'ampli va gérer le potentiel et le courant continue à appliquer les lois de Kirchhoff qu'on vient de voir ici. Et ça, cette histoire de masse virtuelle, créée par un amplificateur, va être exploitée en long et en large dans des circuiteries. Et on va voir un premier exemple de ceci. Voici le schéma de mon amplificateur inverseur où je viens d'ajouter une source de courant sur ce nœud A qui correspond à la masse virtuelle. Donc, vous vous rappelez bien que le potentiel au nœud A  $V_A$  est vraiment égal à 0.

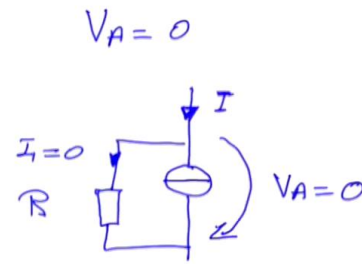
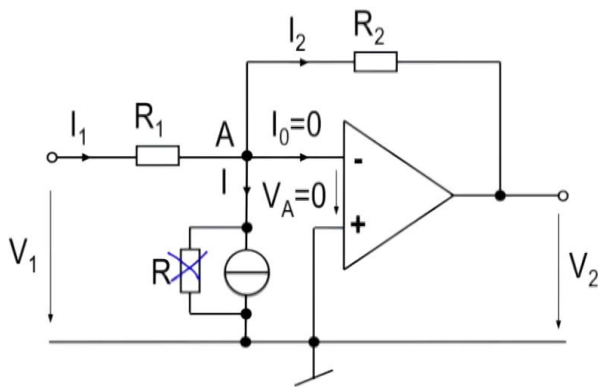
Notes

Summary



9m 01s

# Exercice: Amplificateur inverseur



Electronique I

Quand vous regardez une source de courant connectée à un potentiel  $V_A = 0$ , c'est que n'importe quelle résistance connectée en parallèle, je vais dessiner ma source de courant, cette source de courant se retrouve avec une résistance parallèle et cette résistance parallèle est l'un des défauts d'une source de courant. On n'aime pas cette résistance, mais si elle existe, et vous venez imposer une tension égale à 0, eh bien cette résistance ne peut en aucun cas voir passer un courant dedans. Vous avez une tension égale à 0 aux bornes de cette résistance donc le courant qui la traverse va être  $I = 0$ . Donc tout le courant débité par notre source de courant qui dans cet exemple-là, c'est ce courant  $I$ , c'est celui qu'on voit ici, il va absolument passer dans ce nœud, c'est comme si on créait un court-circuit sur une source de courant. Et le courant de court-circuit nous aide fortement à éliminer cette imperfection et l'existence d'une résistance qui ne va pas du tout tirer du courant de la source principale.

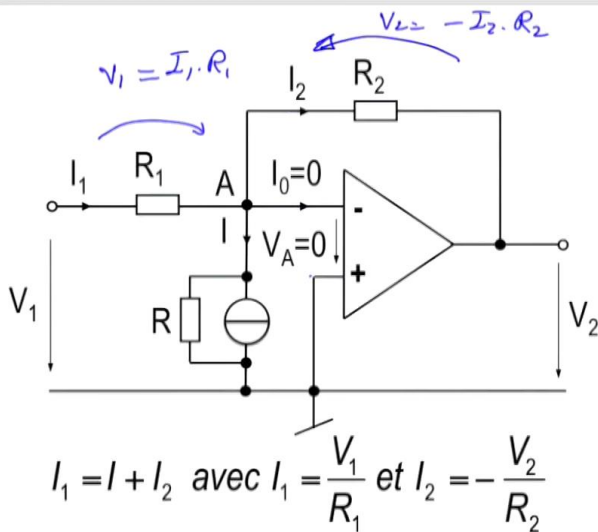
Notes

Summary

10m 20s



# Exercice: Amplificateur inverseur



$$I_1 = I_2 + I$$

$$V_2 = -V_1 \frac{R_2}{R_1} + I R_2$$

Electronique I

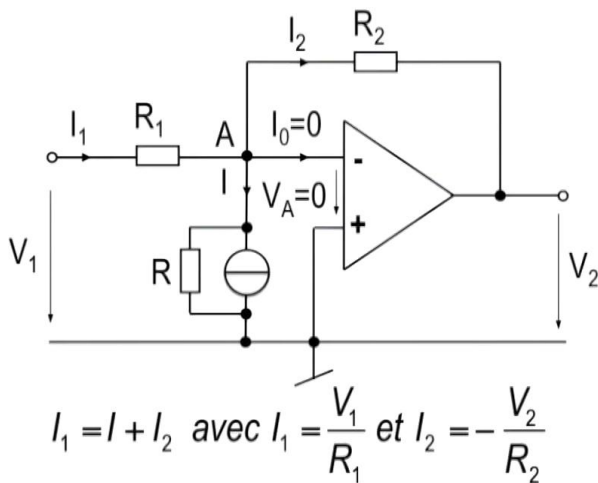
Si on applique la loi de Kirchhoff sur ce qu'on vient de voir, je peux dire que la somme du courant qui passe ici, le courant  $I_1$ , va être égal au courant  $I_2$  + le courant  $I$ . Je vous invite à réfléchir autour de cet exercice-là. Cet exercice vous montre que n'importe quelle source que vous ajoutez ici, vous créez un effet en analysant les relations qu'on avait vues, que la tension  $V_1$ , elle est ici, cette tension  $V_1$  est égale à  $I_1$  multiplié par  $R_1$ , et la tension  $V_2$ , dans l'autre sens,  $V_2$  est égal à  $-I_2$  fois la résistance  $R_2$ . Je vous rappelle que le sens de la tension  $V_2$  est positif dans ce sens-là étant donné que ce potentiel est copié ici et le courant est dans le sens opposé, ce qui m'amène à ajouter ce signe négatif devant la relation. Et le courant  $I$  qui était imposé par cette source qu'on a décidé de brancher à une source de courant qui débite un courant dans ce sens-là. Vous allez voir clairement que le courant qui entre est égal à la somme des deux courants qui sortent. Et vous l'écrivez en copiant la relation  $I_1 = V_1/R_1$  ici pareil pour  $I_2$ . Et vous retrouvez cette relation qui est là.

Notes

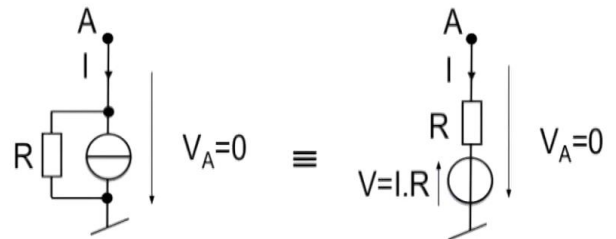
Summary



# Exercice: Amplificateur inverseur



$$V_2 = -V_1 \frac{R_2}{R_1} + I.R_2$$



Electronique I

Ça permet de démontrer que le courant débité par ma source ne fait qu'ajouter un certain courant dans  $I_2$  qui n'influence pas ce qui vient de  $I_1$  parce que ça s'ajoute à  $I_1$  tout en sachant que la tension est restée nulle. Voici le même schéma, la même conclusion, qui nous ramène la tension  $V_2$  par rapport à la tension  $V_1$  multipliée par un rapport de résistance  $R_2/R_1$ , ce qu'on avait découvert avec notre amplificateur, le fait d'avoir ajouté ce courant  $I$ ,  $I$  vient ajouter un courant supplémentaire qui va multiplier la résistance  $R_2$  et se transformer en une tension qui s'ajoute à celle qui est apparue lorsqu'on avait vu la tension  $V_1$  multipliée par  $R_1/R_2$ . C'est rapporté ici. J'aimerais vous rappeler que quand une source de courant telle que celle-ci, vous voulez la convertir en une source de tension elle deviendrait une source de tension en série avec la résistance, tout en respectant la loi de Kirchhoff. Donc, on fait l'équivalent de Thévenin, et l'équivalent de Thévenin dit que ces deux représentations sont les mêmes. La condition, c'est de remplacer la source de courant par une source de tension équivalente égale à  $I \times R$  avec une résistance  $R$  en série.

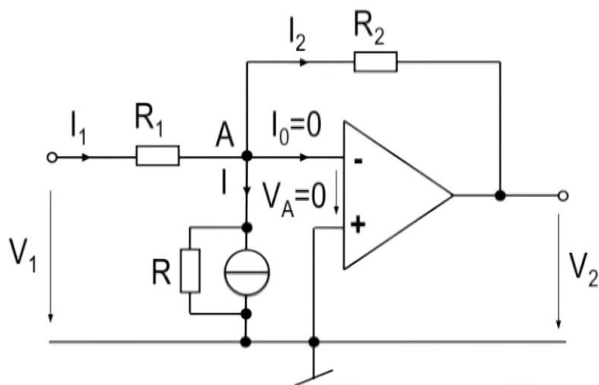
Notes

Summary

12m 58s

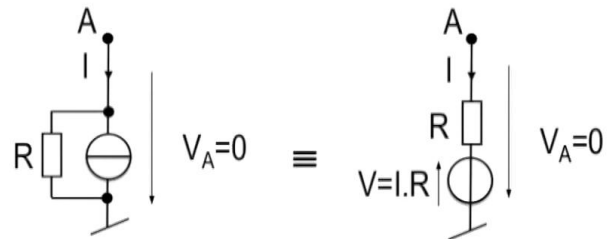


# Exercice: Amplificateur inverseur



$$I_1 = I + I_2 \text{ avec } I_1 = \frac{V_1}{R_1} \text{ et } I_2 = -\frac{V_2}{R_2}$$

$$V_2 = -V_1 \frac{R_2}{R_1} + I.R_2$$



Electronique I

Et rappelez-vous que la tension  $V_A$ , de là à là, est toujours la même. J'ai fait simplement un remplacement par l'équivalent de Thévenin d'une source de courant avec une résistance en parallèle avec une source de tension avec une résistance en série.

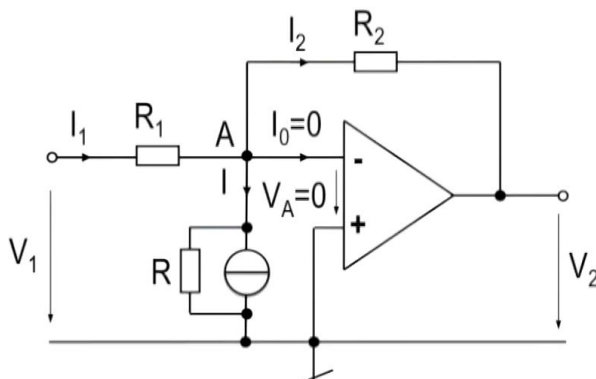
Notes

Summary



14m 17s

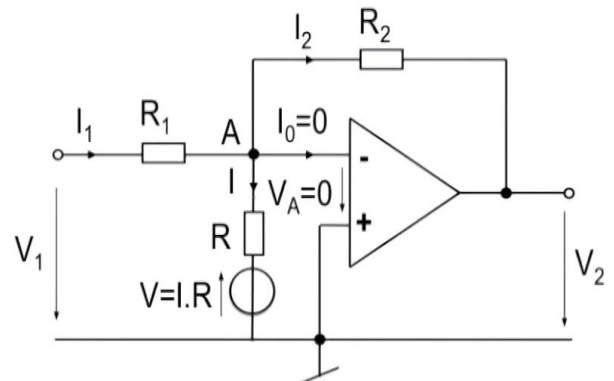
# Exercice: Amplificateur inverseur



$$I_1 = I + I_2 \text{ avec } I_1 = \frac{V_1}{R_1} \text{ et } I_2 = -\frac{V_2}{R_2}$$

$$V_2 = -V_1 \frac{R_2}{R_1} + I.R_2$$

≡



$$V_2 = -V_1 \frac{R_2}{R_1} + V \cdot \frac{R_2}{R}$$

Electronique I

Et voici le schéma équivalent qu'on a obtenu et je vais pouvoir écrire ça et le dessiner en prenant la source de courant et sa résistance et la remplacer par la source de tension avec sa résistance. Cet exercice nous montre, si vous le calculez et le réalisez, que ce schéma-là permet de transformer un effet d'un courant lorsqu'on le remplace par une tension par un effet d'addition. Je vais observer la tension  $V_2$  en fonction, maintenant, d'une source de tension ajoutée et vous verrez que  $V_2 = -V_1 \times R_2/R_1 + I \times R_2$  l'équivalent de cette source  $V \times R_2/R_1$ . On découvre avec ceci un circuit très important qu'on va analyser tout de suite après et qu'on appelle le sommateur. On voit qu'il y a un effet de sommation entre la tension  $V_1$  et la tension  $V$  avec signe près selon les conditions des vecteurs, courants et tensions. Et on voit que ces deux tensions sont pondérées par un rapport  $R_2/R_1$  et  $R_2/R$ .

Notes

Summary

