

Si votre écran ne se présente pas comme ceci, [cliquez là](#)

I. LES DIPÔLES.

A. DÉFINITIONS. CLASSIFICATION.

Un **dipôle** est un **système accessible par deux bornes** dans lequel peut **circuler un courant électrique**.

Pour qu'un courant puisse circuler dans un dipôle, il faut brancher celui-ci sur un autre dipôle.

La classification actif / passif est difficile à faire, car quelle que soit la définition utilisée, on trouve toujours un contre exemple ! Par exemple, un critère énergétique (les actifs peuvent fournir de l'énergie, contrairement aux passifs) élimine les semi-conducteurs de la catégorie des actifs

Les définitions proposées ne sont donc pas à prendre comme argent comptant. Elles donnent une tendance qui sera entachée d'exceptions !

Nous allons étudier ici des dipôles de base . Dans la pratique, on trouvera ces dipôles tels quels, mais on pourra aussi en construire d'autres en associant en série et en parallèle ces dipôles de base. Pour que l'élément ainsi créé soit un dipôle, il doit répondre à la définition donnée ci-dessus.

1. Dipôle passif.

Si on branche ensemble deux dipôles identiques et qu'**aucun courant permanent ne passe** entre les deux dipôles quel que soit le sens du branchement, ces dipôles sont passifs. Ex : résistances, thermistances, selfs, condensateurs

Il va circuler du courant dans un dipôle passif si on applique une différence de potentiel entre ses bornes.

Réciproquement, si on fait circuler un courant dans ce dipôle, il va apparaître une tension à ses bornes.

2. Dipôle actif.

Si on branche un dipôle sur une résistance et qu'un courant permanent circule, alors ce dipôle est actif. ex : pile, accumulateur, alternateur

Bien qu'ils ne répondent pas intrinsèquement à la définition ci-dessus, on classera également dans cette catégorie les semi-conducteurs et circuits intégrés ayant des caractéristiques de générateurs : diodes, zéners, transistors

- Source de tension parfaite.

La représentation est la suivante :

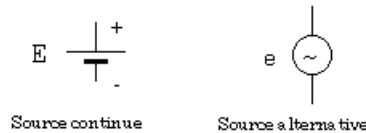


Fig. 1. Sources de tension parfaites.

Une source de tension est un dipôle actif ; elle peut être continue ou alternative. Dans tous les cas, un dipôle est une source de tension s'il maintient la **même tension** entre ses bornes, et ce **quel que soit le courant qu'il débite ou qu'il absorbe** ; c'est une source de tension continue si cette tension est fixe dans le temps, et une source de tension alternative si la tension varie dans le temps de façon périodique.

- Source de courant parfaite.

La définition est la même que pour la source de tension, sauf que la source de courant débite le **même courant quel que soit la tension présente à ses bornes**.

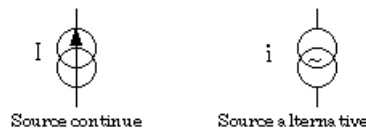


Fig. 2. Sources de courant parfaites

- Sources réelles.

Une source de tension réelle aura en réalité une impédance série non nulle, et une source de courant réelle une impédance parallèle non nulle. Les schémas deviennent :

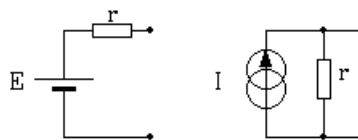


Fig. 3. Sources de tension et courant réelles.

3. Dipôle linéaire.

Un dipôle est linéaire si la relation entre la tension à ses bornes et le courant qui y circule est linéaire. Ex : résistance.

B. CONVENTIONS DE SIGNE.

Les conventions de signe communément admises pour représenter la tension aux bornes d'un dipôle et le courant y circulant font la différence entre générateurs et récepteurs.

Il faut noter ici que le sens du courant ainsi défini est totalement **arbitraire dans l'absolu** , et ne représente qu'une **convention**. En pratique, physiquement, c'est la circulation des électrons qui forme le courant, et celle-ci se fait dans le sens opposé au sens de circulation conventionnel du courant !

Lorsqu'on calcule les éléments d'un circuit électrique, **on peut se fixer une convention différente** , mais il faut garder la **même pour tout le circuit** électrique étudié.

- Convention générateur.

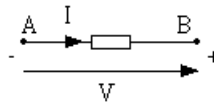


Fig. 4. Dipôle générateur.

Un dipôle est **générateur** lorsqu'il **fournit de l'énergie** (même de manière très temporaire) au circuit sur lequel il est connecté.

Dans ce cas, le courant **sort par le pôle positif** du dipôle générateur. Les flèches représentant tension et courant sont dans le même sens.

- Convention récepteur.

Un dipôle est un **récepteur** quand il **consomme de l'énergie** (fournie par le circuit sur lequel il est connecté).

Dans ce cas, courant et tension sont orientés en sens inverse. Le pôle positif du dipôle est celui par lequel **rentre le courant**.

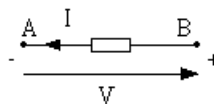


Fig. 5. Dipôle récepteur

- Attention à la méprise !

Actif n'est pas synonyme de générateur, pas plus que passif n'est synonyme de récepteur, même si c'est le cas le plus fréquent. Il y a de nombreuses exceptions.

Certains dipôles passifs (dits réactifs : selfs, condensateurs) peuvent avoir **temporairement** un comportement de générateur et suivront cette convention de signe, alors que des dipôles actifs sont parfois utilisés comme récepteurs : on utilisera alors cette convention.

Si dans un schéma, le calcul du courant circulant dans un dipôle actif et de la tension présente à ses bornes indiquent que le courant **rentre** par le pôle **positif** , alors ce dipôle est utilisé en récepteur.

Exemple de composant passif utilisé comme générateur : le condensateur réservoir, très utilisé en électronique (filtrage des alimentations, découplage).

Exemple de composant actif utilisé comme récepteur : batterie en phase de charge.

C. ASSOCIATION DE DIPÔLES.

Quand on connecte deux dipôles ensemble, ils présentent la même tension à leurs bornes (!), et le courant entrant dans l'un est égal au courant sortant de l'autre (dans une boucle fermée sans connections avec l'extérieur, le courant circule dans un seul sens !)

1. Association passif / actif.

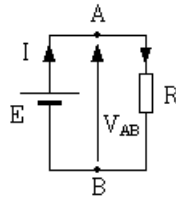


Fig. 6. Association passif/actif

Ce cas justifie la différence de conventions entre générateur et récepteur : la tension aux bornes des deux dipôles étant la même, il y en aura forcément un avec le courant dans le même sens que la tension et l'autre avec le courant en sens inverse ! L'un délivre de l'énergie que l'autre absorbe.

2. Association actif / actif.

Dans le cas où l'on branche deux dipôles actifs ensemble, on ne peut pas toujours dire à priori si un des deux sera récepteur, et si oui, lequel. Dans ce cas, on fixe arbitrairement le sens du courant dans la boucle. Après le calcul, si le courant est positif, l'hypothèse était justifiée, sinon, le sens du courant réel est l'inverse de celui qui a été fixé.

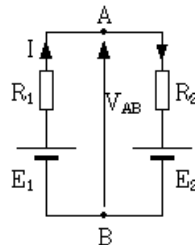


Fig. 7. Association actif/actif

Le courant ainsi orienté sortira par le pôle positif du dipôle générateur. L'autre dipôle actif est utilisé en récepteur (courant entrant par le pôle positif).

D. CARACTÉRISTIQUE STATIQUE D'UN DIPÔLE.

1. Définition.

La caractéristique statique permet de décrire **tous** les points de fonctionnement possibles **en continu** du dipôle : quand on applique une tension à ses bornes, le courant est défini, et vice versa. La représentation de la caractéristique est une courbe dans le plan (I, U).

2. Quadrants.

Le domaine (I, U) est partagé par les axes en quatre quadrants :

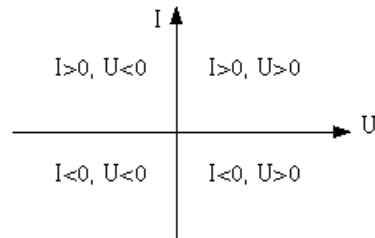


Fig. 8. Les 4 quadrants d'une caractéristique.

Par habitude ou pour simplifier, on ne représente souvent que le premier quadrant ($I > 0$, $U > 0$). En fait, la plupart des dipôles ont une caractéristique qui occupe au moins deux quadrants.

Les conventions $I > 0$ et $U > 0$ indiquent que les sens des courants sont conformes aux normes générateur ou récepteur selon le dipôle.

Pour certains dipôles, on est amenés à préciser la caractéristique complète : par exemple, certaines alimentations stabilisées réglables de laboratoire ont un domaine de fonctionnement spécifié dans un, deux ou quatre quadrants (on a des caractéristiques différentes en fonction du réglage) ; leur comportement en sera différent.

3. Dipôle passif.

- Résistance.

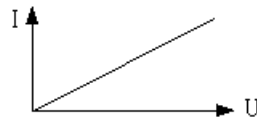


Fig. 9. Caractéristique de résistance.

La relation $I = f(U)$ est linéaire (loi d'Ohm). La pente de la droite est égale à $1/R$.

- Dipôle passif non linéaire.



Fig. 10. Caractéristique non linéaire.

La relation $I = f(U)$ est quelconque. Ex : varistance, certains capteurs utilisés en instrumentation

4. Dipôle actif utilisé comme récepteur.

Les composants actifs utilisés comme récepteurs sont très employés dans l'électronique analogique : on leur accordera une importance particulière.

Les raisonnements qui suivent sont faits avec des sources continues. Le raisonnement est strictement le même avec des sources alternatives.

- Source de tension continue parfaite.

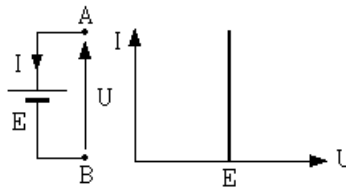


Fig. 11. Source de tension continue parfaite.

Une source de tension parfaite impose une tension constante aux bornes du dipôle sur lequel elle est branchée, et ce quel que soit le courant qu'elle absorbe. La caractéristique est verticale.

- Source de tension avec résistance série.

La tension augmente quand le courant imposé au dipôle augmente. C'est la chute de tension créée aux bornes de R par le courant qui est responsable de cette augmentation.

La pente de la courbe est égale à l'inverse de la résistance interne du générateur, soit $1 / R$.

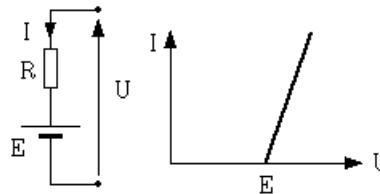


Fig. 12. Source de tension quelconque.

Il convient de noter que dans ce cas, la caractéristique est contenue dans un seul quadrant : si on prolongeait la caractéristique dans le quadrant $I < 0$, la source serait génératrice, et plus réceptrice comme on en a fait l'hypothèse ! C'est vrai pour tous les cas du paragraphe I.D.4.

- Source de courant continu parfaite.

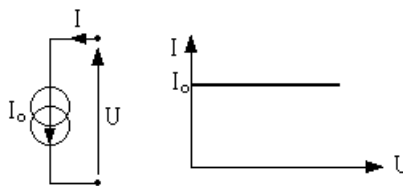


Fig. 13. Source de courant parfaite.

Un générateur de courant parfait impose un courant constant dans le dipôle sur lequel il est branché, quelle que soit la tension présente à ses bornes. La caractéristique obtenue est horizontale.

- Source de courant avec résistance parallèle.

Lorsque la tension aux bornes de la source de courant augmente, le courant qu'elle absorbe augmente, avec une pente égale à $1 / R$. En effet, la résistance interne en parallèle avec la source de courant absorbe un courant proportionnel à U qui vient s'ajouter à I_0 .

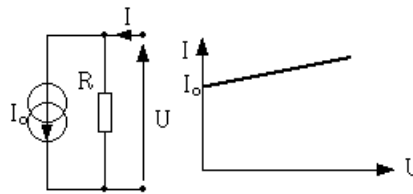


Fig. 14. Source de courant quelconque.

E. DROITE DE CHARGE D'UN GÉNÉRATEUR.

Un générateur (dans le sens générateur d'énergie) est susceptible de faire circuler un courant dans un dipôle passif. Il peut être intéressant de voir quelle tension ou quel courant il va délivrer dans un dipôle passif lorsque l'impédance de celui-ci varie.

Nous prendrons le cas général des générateurs avec résistances internes.

- Générateur de tension continue.

Si on fait varier la résistance de charge R_{ch} de 0 à l'infini, le courant dans la charge va passer du courant de court-circuit (valeur maxi égale à : $I_{cc} = E_g/R_g$ pour une tension $U = 0$) à une valeur nulle correspondant à la tension à vide E_g du générateur. La courbe reliant ces deux points est une droite de pente $-1/R_g$, R_g étant la résistance interne du générateur : c'est la droite de charge du générateur.

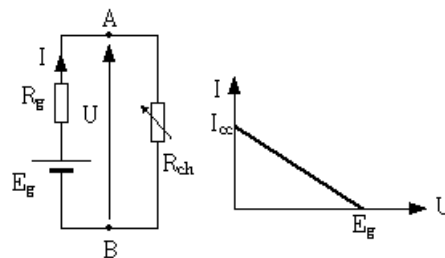


Fig. 15. Droite de charge d'un générateur de tension.

- Générateur de courant continu.

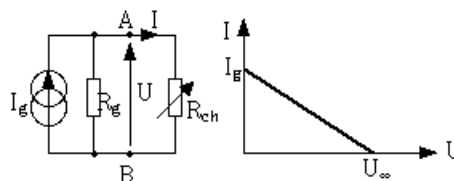


Fig. 16. Droite de charge d'un générateur de courant.

Si on fait varier la résistance de charge R_{ch} de 0 à l'infini, la tension aux bornes du générateur de courant va passer de 0 (avec un courant de court-circuit égal à I_g) à une valeur maxi $U = R_g I_g$ pour un courant débité nul. La pente de la droite de charge reliant ces deux points est égale à $-1/R_g$.

- Remarque.

Si on compare les deux figures précédentes, on remarque une étrange similitude des droites de charges du générateur de tension et de celui de courant ! En fait, à partir du

moment où un générateur présente une impédance série interne non nulle ou une impédance parallèle non infinie, la notion de générateur de courant ou de tension s'estompe. Il existe d'ailleurs une [transformation mathématique](#) qui permet de faire la conversion générateur de tension / générateur de courant. Toutefois, en fonction de la valeur de la pente de la droite de charge, on parlera plutôt de générateur de courant ou bien de générateur de tension.

Par exemple, une batterie d'automobile présente une impédance série interne tellement faible qu'il serait ridicule de parler de générateur de courant, et à fortiori, de faire des calculs avec ce formalisme.

F. POINT DE POLARISATION.

Si on associe un dipôle récepteur avec un dipôle générateur, on aura une tension et un courant bien déterminés dans ces dipôles. Ce point doit appartenir à la fois à la caractéristique du dipôle récepteur et à la droite de charge du dipôle générateur. C'est le point P d'intersection des deux courbes (Voir Fig. 17.).

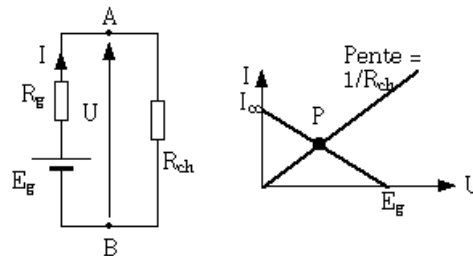


Fig. 17. Point de polarisation d'une résistance.

Ce point de fonctionnement en continu est appelé point de polarisation du dipôle récepteur.

G. DIPÔLES NON LINÉAIRES.

1. NÉCESSITÉ DE LINÉARISER.

Pour calculer les tensions et courants de circuits électriques simples composés de générateurs et de résistances, on applique la loi d'Ohm et on obtient un système d'équations linéaires permettant de trouver la solution.

Les composants à semi-conducteurs ont, quant à eux, des caractéristiques non linéaires. Or, dans un circuit complexe, on trouvera souvent les valeurs de courants et tensions en résolvant un système de plusieurs équations à plusieurs inconnues. La résolution de tels problèmes est très difficile quand on a affaire à des équations non linéaires.

Pour pallier cet inconvénient, on va s'arranger pour utiliser les composants non linéaires sur une très petite portion de leur caractéristique, et on va assimiler cette portion à une droite (droite qui sera la tangente à la caractéristique au niveau de la portion utilisée).

On va ainsi définir des paramètres **dynamiques** (ou **différentiels**) du composant non linéaire, ces paramètres étant **utilisables uniquement sur la portion de caractéristique étudiée** ; on pourra utiliser ces paramètres classiquement, et leur appliquer la loi d'ohm et les théorèmes classiques de l'électricité. Le système d'équations sera alors linéaire, donc simple à résoudre avec des outils classiques.

2. RÉSISTANCE DIFFÉRENTIELLE.

Très souvent, en électronique, on doit polariser le montage, et ensuite, on applique un signal alternatif à l'entrée de ce montage pour qu'il y soit traité.

Pour ce qui suit, et conformément à ce qui a été dit précédemment, on va faire l'hypothèse que le signal alternatif est **de faible amplitude comparé aux tensions de polarisation** : on parle de régime des petits signaux.

Supposons qu'au départ, on polarise le dipôle Z_{ch} avec un générateur de tension continu (E_g, R_g). Le point de polarisation P_o correspond au courant I_o et à la tension E_o ($e = 0$).

Si on rajoute au générateur de polarisation (E_g, R_g) un générateur alternatif e avec $e \ll E_g$, on déplace la droite de charge qui correspond alors au générateur équivalent (E_g+e, R_g). A un instant donné, le nouveau point de polarisation est alors $P(E_o+\Delta E, I_o+\Delta I)$.

Si ΔE est suffisamment petit, on peut considérer que P se déplace sur la tangente de la caractéristique en P_o .

A une petite variation ΔE de E_o va correspondre une petite variation ΔI de I_o .

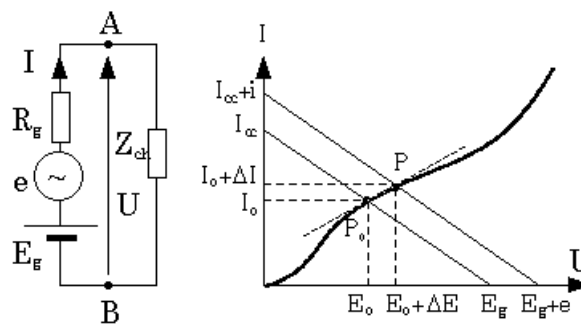


Fig. 18. Résistance dynamique.

Par définition, on pose :

$$r_s = \Delta E / \Delta I \quad [1]$$

r_o est la résistance **dynamique** (ou **différentielle**) du dipôle au point de polarisation P_o (E_o, I_o). Ceci revient à assimiler localement la caractéristique à sa tangente.

Pour des petites variations autour d'un point de polarisation donné, on linéarise le dipôle, et grâce à la notion de résistance dynamique, on a une loi d'Ohm simple. Ceci va permettre de simplifier grandement les calculs.

ATTENTION : la résistance dynamique est une caractéristique du point de polarisation considéré. Si on modifie la polarisation, la résistance dynamique va varier. Cette notion n'a de sens que pour des petits signaux alternatifs ($e \ll E_g$).

Ces **notions** de **petits signaux** et de paramètres **différentiels** sont **absolument incontournables** pour étudier un montage amplificateur en électronique.

II. LES QUADRIPÔLES.

Nous n'allons pas entrer ici dans les détails de cette théorie, mais juste indiquer ce qui nous sera utile pour l'étude des transistors.

A. DÉFINITION.

Un quadripôle est une boîte noire à quatre bornes dans laquelle des courants électriques peuvent circuler ; cette boîte comporte deux bornes d'entrée et deux bornes de sortie :

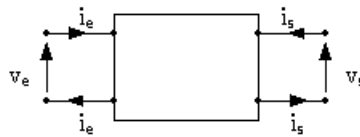


Fig. 19. Représentation d'un quadripôle.

La **condition** pour que cette boîte noire soit un quadripôle est que le **courant entrant par une des bornes d'entrée** (resp. de sortie) soit **égal au courant sortant par l'autre borne d'entrée** (resp. de sortie).

Quatre paramètres électriques caractérisent alors le quadripôle : tension et courant d'entrée v_e et i_e , et tension et courant de sortie v_s et i_s .

Deux de ces variables sont indépendantes. Les autres y sont liées par les paramètres du quadripôle.

B. PARAMÈTRES HYBRIDES.

Vu qu'on a quatre variables dont deux indépendantes, il y a plusieurs possibilités pour écrire les équations liant ces variables. Nous choisirons ici les équations faisant intervenir les paramètres hybrides, ce qui est le formalisme le plus simple pour décrire le fonctionnement des transistors.

On démontre que l'on peut écrire :

$$\begin{cases} v_e = h_{11} i_e + h_{12} v_s \\ i_s = h_{21} i_e + h_{22} v_s \end{cases} \quad [2]$$

On peut mettre ce système sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} v_e \\ i_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_e \\ v_s \end{bmatrix} \quad [3]$$

La matrice de transfert est appelée matrice hybride du quadripôle.

La signification des paramètres est la suivante :

h_{11} est l'impédance d'entrée du quadripôle avec la sortie en court-circuit.

h_{12} est un coefficient adimensionnel quantifiant la réaction de la sortie sur l'entrée.

h_{21} est le gain en courant avec sortie en court-circuit.

h_{22} est l'admittance de sortie avec entrée à vide.

C. SCHÉMA ÉQUIVALENT.

A partir des paramètres définis précédemment, on peut donner un schéma électrique

équivalent du quadripôle ; ce schéma ne fait intervenir que des composants classiques de l'électricité (voir Fig. 20).

Ce schéma est typiquement celui qui sera utilisé pour représenter le transistor en petits signaux alternatifs.

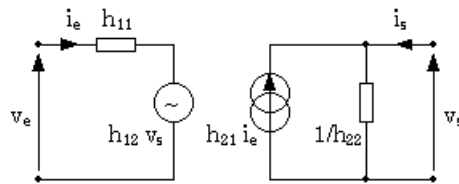


Fig. 20. Schéma équivalent d'un quadripôle.

III. LES INDISPENSABLES.

En électronique, il existe des conventions un peu différentes de ce qu'on trouve en électricité, et aussi des utilisations spécifiques de certains composants passifs . Nous allons étudier ces particularités dans ce paragraphe.

A. MODÉLISATION.

Les schémas électroniques font intervenir des composants ayant un comportement simple à décrire mathématiquement (R, L, C), et d'autres ayant un comportement plus complexe. C'est le cas notamment des semi-conducteurs.

De manière à pouvoir modéliser les circuits utilisant ces composants et prévoir leur fonctionnement, on est amenés à faire un schéma équivalent des composants complexes, ce schéma étant bâti à partir de composants simples : résistances, sources de tension, de courant ([GIF 8ko](#))

Par exemple, on pourra modéliser une diode zéner avec un générateur de tension parfait et une résistance série.

Il faudra garder à l'esprit que ce n'est qu'un **schéma équivalent, sous certaines hypothèses bien définies**. Il ne saurait être question d'appliquer le résultat obtenu par le calcul hors de ces hypothèses !

Exemple : bien qu'on puisse modéliser une diode zéner par un générateur de tension, si on branche une telle diode sur une ampoule, il ne se passera rien ! Ce composant n'est pas l'équivalent d'une pile ou d'un accumulateur.

Cette remarque volontairement grossière reste valable pour la modélisation en général, quel que soit le domaine de la physique considéré.

B. APPROXIMATIONS.

Lorsqu'on fera des calculs sur un circuit électronique, on sera guidés en permanence par leur précision :

les composants (résistances, condensateurs, transistors) font l'objet de dispersions (résistances à 5% par exemple).

les hypothèses de calcul conduisent à des simplifications (linéarisation, petits signaux)

le résultat désiré le sera avec une précision plus ou moins élevée.

Par conséquent, aussi savantes que puissent paraître les équations permettant de résoudre un circuit, on aura toujours présent à l'esprit que :

elles sont fausses !

elles sont inapplicables à des composants réels.

Elles sont fausses car bâties sur des hypothèses représentant des approximations, et inutilisables telles quelles car il faudra tenir compte de la dispersion des composants et des valeurs normalisées (on ne trouve pas toutes les valeurs de résistances dans le commerce par exemple).

Dans ce cas, dans la majeure partie des problèmes d'électronique, on se contentera de déterminer un ordre de grandeur des paramètres permettant de dimensionner les composants. On pourra dans ce cadre faire un maximum de simplifications. On adoptera souvent pour ce faire la **règle du dixième** : si deux paramètres s'ajoutent dans une équation, et que l'un soit plus de dix fois plus petit que l'autre, alors, on va le négliger. Exemple :

$$\text{si } I \gg 10i, \text{ alors } I + i \approx I \quad [4]$$

En partant du constat qu'un calcul rigoureux est infaisable, et que de toutes façons, il ne servirait à rien, le meilleur calcul sera le plus simple !

C. REPRÉSENTATION DES SCHÉMAS.

En général, et contrairement à ce qui se pratique en électricité, on ne représentera pas toutes les connections entre les composants d'un schéma électronique. On omettra souvent les générateurs de tension continue, et de ce fait, le rebouclage des points où ils sont connectés avec la masse.

De même, pour mieux comprendre le fonctionnement d'un montage, on tâchera (dans la mesure du possible) de bâtir le schéma en mettant le potentiel le plus élevé en haut de la feuille et de respecter une échelle des potentiels décroissants lorsqu'on dessinera les éléments du haut vers le bas de la feuille. En procédant ainsi, on aura les flèches de représentation des potentiels dans le même sens, et des courants descendants : la compréhension en sera largement accrue.

D. MASSE.

La masse est le potentiel de référence (fixé par convention à 0) du montage électronique : un potentiel n'est pas défini dans l'absolu, on parle toujours de différence de potentiel.

Dans un montage électronique, quand on parlera du potentiel d'un point, il sera sous entendu que ce potentiel est référencé à la masse du montage.

La masse sera en général le pôle moins de l'alimentation continue servant à polariser le montage. Cette règle est uniquement une coutume, elle ne sera pas systématiquement respectée sur les schémas rencontrés !

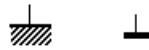


Fig. 21. Représentations de la masse.

E. TERRE.

La terre est une connexion physique au sol (à la terre !). Contrairement aux croyances souvent énoncées, en aucun cas ce potentiel ne peut être considéré comme référence absolue, car il est différent d'un endroit de la Terre (la planète) à un autre. De plus, le câble de liaison du laboratoire au sol présente une impédance non nulle : si un courant parasite circule dans ce câble, il va y créer une chute de potentiel ; on aura une différence de potentiel entre la prise de terre du labo et le sol.

La **fonction d'une terre** est la **sécurité** : elle permet de **protéger les utilisateurs d'équipement sous tension**, et aussi d'évacuer les courants induits par la foudre.



Fig. 22. Représentations de la terre.

F. INTERRUPTEURS.

Ils permettent d'introduire une coupure dans un circuit électrique. Nous allons étudier ici le comportement d'un interrupteur parfait.

1. Interrupteur ouvert.

Lorsque l'interrupteur est ouvert, aucun courant ne circule dans la boucle, et toute la tension se retrouve sur l'interrupteur (U_2 est nul, car le courant I est nul).

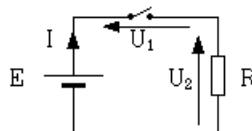


Fig. 23. Interrupteur ouvert dans une boucle.

La caractéristique de l'interrupteur ouvert se confond avec l'axe horizontal : le courant est nul quelle que soit la tension à ses bornes :

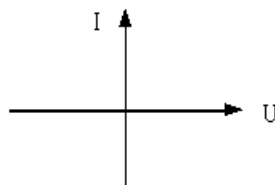


Fig. 24. Caractéristique d'un interrupteur ouvert.

2. Interrupteur fermé.

Lorsque l'interrupteur est fermé, le courant peut circuler librement, la tension à ses bornes étant nulle ; on suppose celui-ci parfaitement conducteur, exempt de toute impédance parasite.

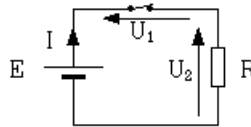


Fig. 25. Interrupteur fermé dans une boucle.

La caractéristique de l'interrupteur fermé se confond avec l'axe vertical : tension nulle quel que soit le courant qui circule à travers :

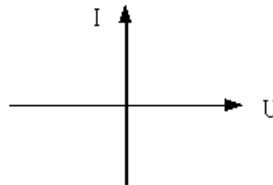


Fig. 26. Caractéristique d'un interrupteur fermé.

G. DIVISEUR DE TENSION.

C'est le montage fondamental de l'électronique :

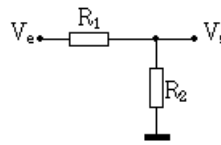


Fig. 27. Diviseur de tension.

Plutôt que d'appliquer la [loi des mailles](#), on utilisera cette propriété au maximum ; les calculs en seront très souvent simplifiés.

La formule donnant la tension de sortie Vs en fonction de la tension d'entrée du pont Ve est la suivante :

$$V_s = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_e \quad [5]$$

En fait, on s'affranchit des courants dans la formulation, ce qui revient implicitement à diminuer le nombre d'inconnues, donc d'équations du problème. On arrive ainsi beaucoup plus vite et plus sûrement à le résoudre.

H. ASSOCIATION DE RÉSISTANCES.

1. En parallèle.

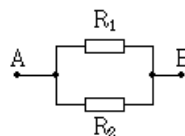


Fig. 28. Résistances en parallèle.

$$R_{AB} = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}} \quad [6]$$

2. En série.

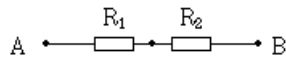


Fig. 29. Résistances en série.

$$R_{AB} = R_1 + R_2 \quad [7]$$

I. CONDENSATEURS DE LIAISON.

La plupart des montages électroniques à composants discrets nécessitent une polarisation (adjonction d'une tension continue) pour fonctionner correctement.

À l'entrée du montage, sur ces tensions continues de polarisation, on va superposer un signal alternatif. Dans la plupart des cas, le générateur alternatif ne pourrait pas supporter qu'un courant continu le traverse ; de plus, si on ne veut pas modifier la polarisation du montage, ce générateur doit être neutre du point de vue du régime continu vis à vis du montage qu'il attaque.

Pour satisfaire à toutes ces exigences, on relie le générateur alternatif à l'entrée du montage par l'intermédiaire d'un condensateur.

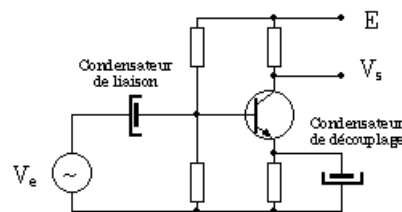


Fig. 30. Condensateurs de liaison et découplage.

Ce condensateur présente une impédance infinie au courant continu : il va ainsi empêcher qu'un tel courant ne traverse le générateur alternatif ; on ne modifiera pas la polarisation du montage.

Ce condensateur est dit de **liaison**. On le choisira toujours pour que son impédance soit négligeable aux fréquences délivrées par le générateur alternatif :

Pour le **régime alternatif**, et pour les fréquences des signaux utilisés, on l'assimilera à un **court circuit**.

Pour le **régime continu**, on le considérera comme un **circuit ouvert**.

J. CONDENSATEURS DE DÉCOUPLAGE.

Les nécessités de la polarisation peuvent amener à introduire dans le montage des éléments (des résistances notamment) qui nuisent au bon fonctionnement du régime alternatif. Pour éviter ceci, on peut mettre en parallèle sur ces éléments un condensateur qui va se comporter comme un court circuit pour les signaux alternatifs. Comme pour les condensateurs de liaison, ils ne modifient en rien la polarisation du montage. (voir figure 30).

IV. THÉORÈMES FONDAMENTAUX.

A. LOIS DE KIRCHOFF.

Les lois de Kirchoff sont les lois fondamentales qui régissent le fonctionnement de tout circuit électrique. Néanmoins, en pratique, elles sont peu appliquées telles quelles en électronique ; on leur préférera souvent les propriétés du diviseur de tension, et les théorèmes de thévenin et de superposition pour faire les calculs. A noter qu'on a besoin des lois de Kirchoff pour démontrer ces théorèmes.

1. Loi des mailles.

Une **maille** est une **boucle fermée** composée d'éléments réels ou virtuels (immatériels) présentant une différence de potentiel entre leurs bornes.

La somme des tensions rencontrées lorsqu'on parcourt une boucle fermée est nulle.

Cette loi est en quelque sorte la relation de Chasles de l'électricité.

Pratiquement, on impose d'abord le sens des courant dans chaque élément de la maille. Ensuite, on représente les tensions par des flèches en respectant les règles suivantes :

convention récepteur pour les dipôles passifs avec le sens du courant qu'on a imposé.

respect de la polarité des générateurs (flèche au pôle positif). **Attention** : cette règle est absolue, même si le générateur est utilisé comme récepteur ! (**Exception notable : les fcem**).

Une tension rencontrée sur la boucle peut correspondre à un élément immatériel (qui n'est ni un générateur, ni un composant passif : cas de la tension U dans l'exemple ci-dessous). Cette astuce permet de casser une boucle trop grande et de simplifier les calculs.

Le sens et le début du parcours n'importent pas. On met un signe positif à toute tension rencontrée en direct (la flèche la représentant est orientée dans le sens de parcours de la boucle), sinon, le signe est négatif.

boucle 1 :

$$+ E_1 - R_1 I - U = 0 \quad [8]$$

boucle 2

$$+ U - R_2 I - E_2 = 0 \quad [9]$$

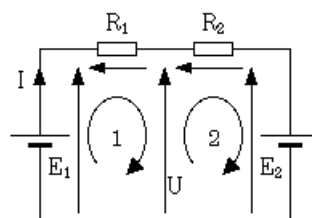


Fig. 31. Circuit à deux mailles.

Pour résoudre totalement le problème d'électricité posé, il va falloir déterminer autant d'équations indépendantes qu'on a d'inconnues (tensions et courants). La loi des mailles ne sera d'ailleurs pas suffisante pour définir toutes les équations nécessaires, il faudra

aussi utiliser la [loi des noeuds](#).

Quand on a autant d'équations que d'inconnues, on peut résoudre le système. Il se peut alors qu'on obtienne des courants négatifs. **Si le circuit ne comporte aucun élément appelé force contre électro-motrice (fcem) en électricité**, le courant circule en fait dans le sens opposé à celui défini arbitrairement. Ceci ne remet pas en cause les résultats obtenus.

Par contre, si le circuit contient des fcem, et que des courants négatifs apparaissent dans la solution, il faut impérativement retraiter tout le problème en modifiant le sens arbitraire des courants, et ceci jusqu'à ce que tous les courants soient positifs.

En pratique, dans les problèmes d'électronique abordés dans le cadre de ce cours, il n'y aura jamais d'ambiguïtés : on n'aura que des composants passifs simples, et des sources de tension utilisées soit comme générateurs, soit comme récepteurs, mais dans tous les cas, leur polarité ne dépendra pas du sens du passage du courant.

Par contre, la polarité des fcem dépend du sens du courant les traversant, ce qui fait que si on inverse celui-ci, le problème d'électricité à résoudre est différent !

En électronique, on fera essentiellement attention aux inductances, qui ont un comportement de fcem.

Nota : on trouvera dans la littérature une autre méthode de résolution de ces problèmes appelée résolution matricielle. Elle consiste à définir un courant de maille totalement fictif et n'ayant rien à voir avec la circulation réelle des courants (qui sont mesurables à l'aide d'un ampèremètre). On obtient les courants réels en sommant les courants fictifs communs aux différentes branches. Cette méthode est très efficace pour faire du calcul de circuits sur ordinateur (résolution de systèmes d'équations). Elle est déconseillée ici, car elle ne permet pas d'y voir clair dans un circuit électronique, ni surtout pas d'intuiter son fonctionnement !

2. Loi des noeuds.

Un noeud est la jonction d'au moins trois conducteurs.

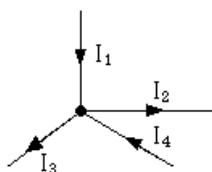


Fig. 32. Noeud de courant.

La **somme des courants entrant** dans le noeud est **égale** à la **somme des courants en sortant**. Ici, on a :

$$I_1 + I_4 = I_2 + I_3 \quad [10]$$

B. THÉORÈME DE SUPERPOSITION.

1. Définition.

Ce théorème est fondamental. Il va permettre d'étudier des circuits comportant plusieurs générateurs (de tension ou de courant) en considérant l'influence de chaque générateur indépendamment des autres, ce qui va beaucoup simplifier la plupart des

problèmes.

Une des grandes applications est le schéma alternatif petits signaux, qu'on utilise très souvent sans même penser qu'il découle du théorème de superposition !

Dans un circuit comportant plusieurs générateurs, la solution du problème (les tensions et courants inconnus) est la somme des solutions trouvées en ne considérant qu'un générateur à la fois.

Pour ce faire, on remplace chaque source de tension parfaite par un court circuit, et chaque source de courant par un circuit ouvert, à l'exception de la source dont on veut connaître l'influence.

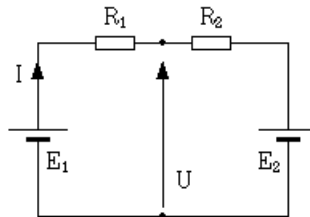


Fig. 33. Problème global.

Dans l'exemple ci-dessus, on va commencer par supprimer E2 et faire le calcul de la tension U avec E1 seul. On a alors un diviseur de tension :

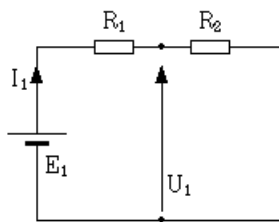


Fig. 34. 1ère étape.

$$U_1 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} E_1 \quad [11]$$

Pour avoir la contribution de E2, on fait ensuite la même chose en supprimant E1 :

$$U_2 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} E_2 \quad [12]$$

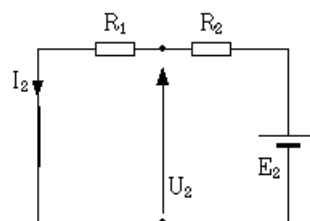


Fig. 35. 2ème étape.

La solution totale U est égale à la somme des deux solutions précédemment trouvées :

$$U = \frac{R_2}{R_1 + R_2} E_1 + \frac{R_1}{R_1 + R_2} E_2 \quad [13]$$

On voit bien ici l'intérêt de ce théorème : on applique deux fois la formule du diviseur de tension et le tour est joué ! Il n'y a pas eu besoin de recourir aux équations lourdes de la loi des mailles.

Tout comme pour le théorème de thévenin, on utilisera ce théorème avec une extrême prudence quand on aura affaire à des sources commandées

2. Application au schéma équivalent alternatif petits signaux.

En général, on conçoit un circuit électronique à éléments discrets en deux temps : on calcule d'abord les éléments nécessaires à sa bonne polarisation, et ensuite, on étudie son comportement en petits signaux alternatifs (la fonction principale du montage) indépendamment de la polarisation (qui est nécessaire au bon fonctionnement des semi-conducteurs, mais ne constitue pas une fin en soi).

Ce faisant, on utilise implicitement le théorème de superposition, car les tensions et courants du montage seront toujours la somme des tensions et courants de polarisation et des signaux alternatifs.

Ainsi, dans un circuit, on pourra se focaliser sur l'effet d'un seul générateur. Il sera indépendant de la contribution du ou des autres générateurs du circuit.

Pour **construire un schéma équivalent en alternatif** d'un montage, on appliquera les **règles suivantes** :

On remplacera toutes les sources de tension continue parfaites par des court-circuits.

On remplacera toutes les sources de courant continu parfaites par des circuits ouverts.

On remplacera toutes les sources de tension continue et de courant continu ayant une résistance interne par leur résistance interne.

Les condensateurs de découplage seront remplacés par des court-circuits.

En général, on remplacera les condensateurs de liaison par des court-circuits.

Tous les dipôles non linéaires seront préalablement linéarisés pour nous permettre d'appliquer simplement la loi d'Ohm.

On obtient ainsi le schéma simplifié qui va permettre l'étude de la fonctionnalité du montage. [Application pratique, mode d'emploi \(GIF 26ko\)](#).

ATTENTION !!! : il faudra toujours se souvenir des hypothèses de base qui ont servi à faire ce schéma, et notamment le fait que quand on a un courant (ou une tension) négatif dans le schéma alternatif, dans le montage, en réalité, il sera positif, mais inférieur au courant (ou à la tension) de polarisation.

On pourra avoir des surprises de fonctionnement qui n'ont pas été prévues par l'étude du schéma alternatif équivalent, de par les simplifications faites.

Un montage pourra avoir ainsi un fonctionnement dissymétrique sur les ondes positives et négatives du signal alternatif. Il faudra faire particulièrement attention au fonctionnement de ce montage sur charge capacitive (certains circuits présentent une impédance de sortie dissymétrique : par exemple, dans une diode ou un transistor, le courant ne peut circuler physiquement que dans un seul sens. Le montage ne pourra

donc pas "absorber" un courant négatif, mais seulement fournir un courant positif inférieur au courant de polarisation).

Ne pas oublier non plus qu'on est en régime de petits signaux, et que si on pousse le montage aux limites, cette hypothèse devient fautive, et le comportement observé n'est plus ce qui a été prévu !

En cas de problèmes, il faudra rechercher la cause de dysfonctionnement en considérant le schéma global, et non plus le schéma équivalent en alternatif.

C. THÉORÈME DE THÉVENIN.

Il a été dit au début de ce chapitre qu'on pouvait associer des dipôles de base en série et en parallèle de manière à former des dipôles plus complexes. Le théorème de thévenin permet de remplacer un montage complexe par un générateur de tension équivalent avec sa résistance interne équivalente et de calculer ces éléments.

On pourra ainsi considérer ce montage comme une source de tension réelle et étudier plus simplement son comportement lorsqu'on le connecte à un autre dipôle.

On peut aussi grâce à ce théorème aborder un schéma compliqué en isolant des morceaux et en les transformant en générateurs de thévenin équivalents. Cela permet souvent d'y voir plus clair dans un schéma complexe, et de simplifier et bien faire ressortir des blocs clé du schéma.

Dans l'exemple suivant, il pourrait être intéressant de réduire la partie gauche du schéma (en pointillés) à un seul générateur équivalent.

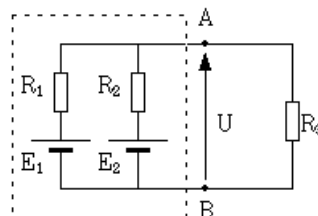


Fig. 36. Dipôle complexe.

Le théorème de thévenin va permettre de réduire cette partie à un générateur E_{Th} et sa résistance interne R_{Th} de la manière suivante :

E_{Th} est la tension à vide de la partie gauche du schéma : R_3 est infinie.

R_{Th} est la résistance équivalente vue entre les points A et B lorsque les sources de tension **non commandées** sont éteintes et que R_3 est infinie.

La tension équivalente se calcule ici aisément par le théorème de superposition :

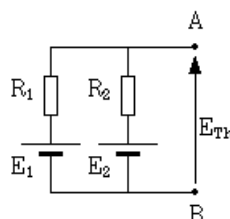


Fig. 37. Générateur de tension équivalent.

$$E_{Th} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} E_1 + \frac{R_1}{R_1 + R_2} E_2 \quad [14]$$

La résistance est obtenue en remplaçant les générateurs de tension par des court-circuits (s'il y avait eu des générateurs de courant, on les aurait remplacés par des circuits ouverts) :

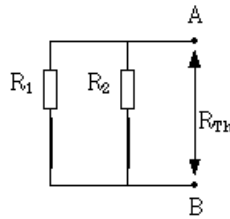


Fig. 38. Résistance équivalente.

$$R_{Th} = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}} \quad [15]$$

Le circuit équivalent est le suivant, avec les valeurs de E_{Th} et R_{Th} calculées précédemment.

Si maintenant, on veut utiliser la même partie gauche du schéma avec une charge différente de R_3 , le générateur de thévenin reste identique : il n'y a pas besoin de refaire de laborieux calculs avec les lois de Kirchoff !

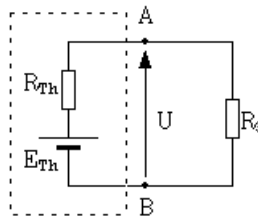


Fig. 39. Générateur de thévenin équivalent.

Il existe le théorème dual de celui de thévenin : c'est le théorème de norton. On raisonne alors en termes de source de courant. Il est plus rarement utilisé en électronique, et donc, nous ne l'étudierons pas ici (voir cours d'électricité).

D. TRANSFORMATION NORTON / THÉVENIN.

Il est parfois intéressant de passer d'une représentation de générateur de tension à celle de générateur de courant.

Si on reprend les [figures 15 et 16](#), on voit que la caractéristique de ces deux générateurs est similaire ; la pente de cette caractéristique est dans les deux cas égale à $-1/R_g$, où R_g est la résistance série du générateur de tension ou la résistance parallèle du générateur de courant.

Il reste à déterminer la valeur de la tension duale du générateur de courant et vice versa.

La solution est donnée par les figures 15 et 16 et dans le texte associé.

Lorsqu'on transforme un générateur de courant (I_g, R) en générateur de tension (E_g, r), on a les relations :

$$r = R \quad [16]$$

$$E_g = R I_g \quad [17]$$

En effet, la tension à vide du générateur de courant est donnée lorsque tout le courant de la source est absorbé par la résistance parallèle interne R .

Les résistances R et r sont égales (les pentes des caractéristiques sont les mêmes).

Lorsqu'on transforme un générateur de tension (E_g , r) en générateur de courant (I_g , R), on a les relations :

$$R = r \quad [18]$$

$$I_g = E_g / r \quad [19]$$

I_g est égal au courant de court-circuit de la source de tension (E_g , r).

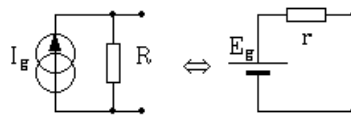


Fig. 40. Transformation norton / thévenin.

Comme il a déjà été dit [auparavant](#), ces calculs sont purement théoriques, et ils amènent à des valeurs de courant et tension équivalents irréalistes.

Les calculs de tensions et courants dans un circuit comprenant des générateurs auxquels on aura appliqué la transformation thévenin/norton seront justes, mais le fonctionnement réel de ces sources sera très différent de celui décrit par le formalisme utilisé.

Attention : Il ne faudra surtout pas faire de **calculs de puissance** dissipée à l'intérieur des **sources** avec le **mauvais formalisme** : par exemple, calculer des puissances dissipées à l'intérieur d'une batterie en utilisant le modèle du générateur de courant équivalent amènerait à des valeurs totalement erronées !

V. GÉNÉRALITÉS SUR L'AMPLIFICATION.

A. INTRODUCTION

Une des grandes fonctions de l'électronique analogique est l'amplification de signaux électriques. Cette fonction sera partout présente dans la mesure, et sera notamment cachée dans les appareils de mesure de laboratoire.

Ces appareils seront assimilés à des boîtes noires, dont on ne connaît pas le contenu, mais dont le fabricant spécifie divers paramètres nous permettant de les interfacer avec d'autres éléments de la chaîne de mesure.

La présentation de l'amplificateur qui va être faite ici indique les paramètres essentiels et à quoi ils se rapportent.

B. REPRÉSENTATION D'UN AMPLIFICATEUR.

Un amplificateur est un quadripôle, avec deux bornes d'entrée et deux bornes de sortie. Une des bornes sera généralement commune à l'entrée et à la sortie (Fig. 41.).

On pourra représenter cet amplificateur par le schéma équivalent suivant :

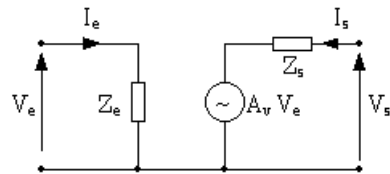


Fig. 41. Schéma équivalent d'un amplificateur.

Dans ce schéma, on va distinguer trois séries de paramètres, relatifs à :

l'entrée (comment se comporte l'ampli vis à vis de la source qui l'attaque).

la relation qui lie l'entrée et la sortie (transfert).

la sortie (de quelle manière la charge perturbe-t-elle l'ampli ?)

C. PARAMÈTRES ESSENTIELS.

1. les paramètres d'entrée.
 - Impédance d'entrée.

C'est tout simplement l'impédance vue de la source, à savoir le rapport :

$$Z_e = \frac{V_e}{I_e} \quad [20]$$

Cette impédance est en général élevée pour ne pas perturber la source qui l'attaque.

- Sensibilité d'entrée.

C'est la tension S_e appliquée à l'entrée pour laquelle l'ampli atteindra sa tension de sortie maximum admissible.

2. les paramètres de transfert.

- Gain en tension.

C'est le rapport de la tension de sortie sur la tension d'entrée. C'est le facteur multiplicatif de l'ampli :

$$A_v = \frac{V_s}{V_e} \quad [21]$$

Le gain est adimensionnel. Il dépend de la fréquence du signal d'entrée tout en restant pratiquement constant dans la plage de fréquences constituant la bande passante.

- Gain en décibels.

Très souvent, le gain sera exprimé en décibels (dB)

$$A_v \text{ dB} = 20 \log_{10} (A_v) \quad [22]$$

Ce type de notation sera utilisé de façon très large en électronique : **fondamental** !

- Bande passante.

C'est la plage de fréquence pour laquelle le gain en tension A_v reste dans une fourchette comprise entre x dB autour d'une valeur nominale A_{v0} . Généralement, x est égal à 3. On parle de bande passante à 3dB.

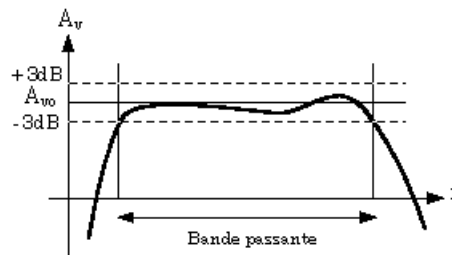


Fig. 42. Bande passante d'un amplificateur.

3. les paramètres de sortie.
 - Impédance de sortie.

C'est l'impédance vue de la charge, à savoir le rapport :

$$Z_s = \frac{V_s}{I_s} \quad [23]$$

Cette valeur sera en général faible.

- Plage de sortie.

C'est la tension de sortie maximum que peut délivrer l'ampli. Il faudra faire attention (comme pour la sensibilité) au formalisme utilisé pour la définir : tension crête à crête, crête, ou efficace, les valeurs données variant alors dans un rapport de 1 à $2\sqrt{2}$!

- Rapport signal sur bruit.

Les composants électroniques génèrent des bruits électriques d'origines diverses (agitation thermique entres autres), et les circuits sont sensibles aux perturbations extérieures (parasitages dus à des champs électromagnétiques, à des couplages).

En conséquence, la tension de sortie de l'amplificateur sera non nulle même avec une tension d'entrée nulle. Cette tension est aléatoire, et son niveau sera sensiblement constant quel que soit la tension présente à l'entrée de l'amplificateur.

Le rapport signal sur bruit sera défini comme le rapport maxi du signal utile (la plage de sortie) sur le niveau de bruit :

$$S/N_r = \frac{V_{s\max}}{V_{\text{bruit}}} \quad [24]$$

Ce rapport signal sur bruit sera la plupart du temps exprimé en dB.

Cette notion est importante en instrumentation et déborde largement le cadre de

l'amplification ; on la retrouvera aussi dans divers appareils de mesure et de traitement de signal.

D. ADAPTATION D'IMPÉDANCE.

Lorsqu'on veut connecter plusieurs étages amplificateurs en cascade, ou plus simplement, quand on désire relier un amplificateur à un générateur en amont et à une charge en aval, il faut faire attention aux impédances des divers constituants de la chaîne.

La figure 43 représente un amplificateur d'impédance d'entrée Z_e , d'impédance de sortie Z_s , connecté à un générateur d'impédance interne R_g et à une charge Z_u .

Le générateur délivre une tension à vide E_g ; la tension à l'entrée de l'amplificateur est V_e , et celle sur la charge est V_s .

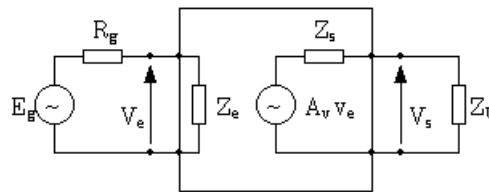


Fig. 43. Connexion d'un amplificateur.

Avec la représentation schématique de l'amplificateur, on distingue très nettement deux ponts diviseurs qui vont détériorer l'amplification.

En entrée, on a :

$$V_e = E_g \frac{Z_e}{R_g + Z_e} \quad [25]$$

Et en sortie, on obtient :

$$V_s = A_v V_e \frac{Z_u}{Z_s + Z_u} \quad [26]$$

Au total, l'amplification réelle devient :

$$\frac{V_s}{E_g} = A_v \frac{Z_e Z_u}{(R_g + Z_e)(Z_s + Z_u)} \quad [27]$$

Si on veut transmettre le maximum de tension entre le générateur et la charge (on parle ici d'adaptation en tension, mais on peut aussi réaliser une adaptation en courant ou en puissance), il faudra les deux conditions suivantes :

$$Z_e \gg R_g \quad [28]$$

$$Z_s \ll R_u \quad [29]$$

En théorie, pour réaliser une bonne adaptation en tension en entrée et en sortie, un ampli idéal aura une impédance d'entrée infinie (en pratique, elle sera la plus grande possible, de l'ordre de quelques $M\Omega$), et une impédance de sortie nulle (en pratique, elle sera de quelques à quelques $m\Omega$).

Cette notion d'adaptation d'impédance est fondamentale, et s'applique très largement, dès qu'on veut interconnecter des appareils électroniques entre eux, et en particulier, des

instruments de mesure.