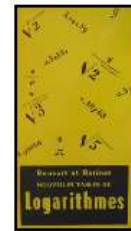


Les logarithmes et exponentielles en électronique

Introduction : Les logarithmes sont inventés par Napier (Néper), un écossais en 1614 qui, pour simplifier ses calculs astronomiques, invente ce concept, ce seront les logarithmes naturels dits népériens. Les logarithmes décimaux sont dus à son ami Briggs en 1624, un anglais qui réalise les premières tables de logarithme, elles permettent de simplifier les grandes opérations. Le lien avec les mathématiques existantes à cette époque comme le calcul différentiel avec l'intégration de l'hyperbole ou les lois exponentielles, sera le travail de nombreux mathématiciens et surtout Euler qui prouve entre autre l'irrationalité de $e = 2.718281828...$ base des logarithmes népériens. Les logarithmes nous seront utiles dans le calcul de certains montages et ils nous permettront, lorsque les valeurs des signaux varient dans de grandes proportions et sur des plages de grande dynamique, de tracer certains graphes, grâce à l'emploi des décibels et des échelles logarithmiques. Ces échelles logarithmiques ainsi que les décibels font une expansion des petites valeurs et une compression des grandes.

L'idée de départ des logarithmes est de remplacer les opérations de multiplication de deux nombres par l'addition de leur log respectif puis de reconvertir le résultat avec l'antilog pour avoir le résultat de cette multiplication.

Les tables de logarithmes seront très utilisées jusqu'à l'avènement des calculatrices électroniques. Avant les années 1980, tous les lycéens des bacs scientifiques et techniques avaient en leur procession le célèbre "Bouvard et Ratinet". Aucune nostalgie !

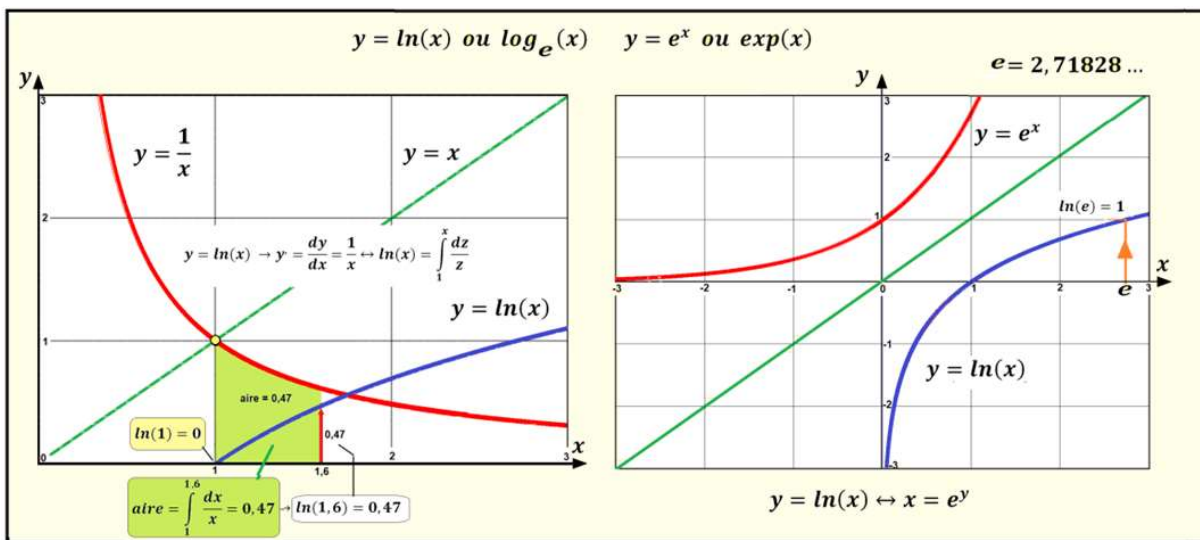


Logarithmes et exponentielles en électronique : la fonction logarithme apparaît surtout avec les décibels (dB) pour définir les rapports de puissance comme en acoustique ou en radiofréquence (RF). Les dB sont très utilisés pour définir les gains et les atténuations de nos dispositifs (amplificateurs, atténuateurs, filtres, antennes ...), ils permettent de définir ou mesurer des puissances. Ils servent aussi à construire des graphiques ayant une très grande étendue de valeurs en ordonnée ou en abscisse comme les diagrammes de Bode. On trouve la fonction logarithmique dans certains amplificateurs électroniques liés à la mesure du signal ou dans la fonction compresseur-expandeur d'amplitude. La fonction exponentielle apparaît dans de nombreux domaines de la physique comme par exemple la décroissance radioactive. Pour nous dans le domaine de l'électronique, elle apparaît comme dans la loi de charge des condensateurs, l'évolution du courant dans les inductances et de façon générale l'évolution des systèmes possédant des inerties mécaniques, thermiques ou électriques. Elle apparaît dans les milieux de propagation comme l'atténuation des lignes de transmission, les milieux de diffusion à semi-conducteur : diodes, transistors et circuits intégrés. La loi de conduction d'une diode est quasiment une loi exponentielle et elle permettra de réaliser des amplificateurs logarithmiques, des multiplicateurs et autres modulateurs.

Logarithmes népériens et lois exponentielles : Le logarithme apparaît en calculant l'aire sous une hyperbole prise entre les ordonnées 1 et x . Si on construit la courbe donnant la valeur de cette surface selon x on obtient la courbe du log népérien. La fonction réciproque est la loi exponentielle, ces deux courbes sont croissantes et monotones. L'argument du log doit être positif, celui de la loi exponentielle négatif ou positif, dans le cas contraire on doit faire appel aux nombres complexes. Le logarithme népérien est la primitive de l'hyperbole $1/x$ comme cela est illustré sur la figure ci-dessus :

$$\ln(x) = \int_1^x \frac{du}{u}, \quad u > 0,$$

sa dérivée est donc l'hyperbole : $y = \ln(x) \rightarrow \frac{dy}{dx} = \frac{1}{x}$, pour $x > 0$, elle est négative pour $0 > x > 1$, nulle pour $x = 1$ et positive ensuite et sa croissance est lente et de plus en plus lente avec les fortes valeurs. Sa fonction réciproque est la loi exponentielle : $y = \ln(x) \leftrightarrow x = e^y$, expression que l'on peut écrire $y = \log_e(x) \leftrightarrow x = \exp(y)$, avec $\log_e(x)$ et qui se lit : **log** base e de x .

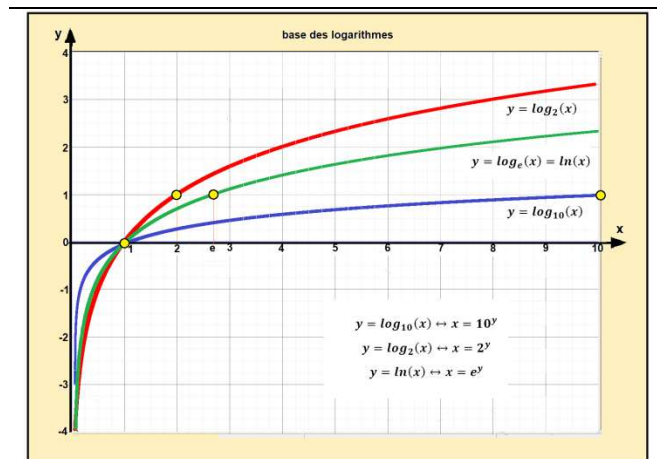


La fonction $y = x$ définit la droite qui passe en 1, son inverse est l'équation $y = 1/x$ qui donne l'hyperbole équilatère. Le calcul de la surface prise entre la courbe et l'axe des abscisses entre le 1 et x va nous donner la valeur du logarithme népérien de x . Ce qui s'écrit : $y = \int_1^x \frac{dx}{x} = \ln(x)$ et qui réciproquement nous donne en dérivant : $y' = \frac{dy}{dx} = \frac{d(\ln(x))}{dx} = \frac{1}{x}$ (dérivée logarithmique).

Les différentes bases logarithmiques : La fonction logarithme peut être définie dans d'autres bases que la base népérienne et bien sûr dans la base décimale. Les fonctions logarithmiques peuvent être définies dans d'autre base que e comme par exemple la base 2 utilisée dans la théorie de l'information de Shannon pour définir le *bit*. La base qui nous concerne ici, pour les constructions des graphes de Bode est la base décimale 10, elle servira à définir le décibel : **dB**.

La construction des diagrammes de Bode emploie aussi des échelles logarithmiques que nous définirons dans la suite.

Note : dans l'écriture de **log**, si la valeur de la base n'est pas précisée, nous sommes en base 10.



Pour approfondir l'étude de ces courbes vous pouvez utiliser une calculatrice graphique ou un logiciel de mathématique comme : Script Equation Grapher sur <https://seg.deberranger.com> (gratuit)

Les principales propriétés des logarithmes:

Valeurs particulières : quelle que soit ($\forall$) la base a : $\log_a(1) = 0, \forall a$ $\log_a(a) = 1, \forall a$	$\ln(1) = 0$ $\ln(e) = 1$ $e = 2,71828 \dots$ $\log_{10}(1) = 0$ $\log_{10}(10) = 1$
Produit : le log d'un produit devient le somme des log multiplication → addition	$\ln(a \cdot b) = \ln(a) + \ln(b)$ $\log_{10}(a \cdot b) = \log_{10}(a) + \log_{10}(b)$
Quotient : la division devient une soustraction quotient, division → soustraction	$\ln(a/b) = \ln(a) - \ln(b)$ d'où : $\ln(1/b) = -\ln(b)$ $\log_{10}(a/b) = \log_{10}(a) - \log_{10}(b)$
Puissance : mettre à la puissance , revient à multiplier n fois le log. L'exposant n peut être un réel fractionnaire, positif ou négatif.	$\ln(a^n) = n \cdot \ln(a)$ Ex : $20 \log(1000) = 60 \text{ dB}$ d'où : $\ln(\sqrt[n]{a}) = \ln(a^{1/n}) = \frac{1}{n} \ln(a)$
réciproque	$\log_{10}(a^n) = n \cdot \log_{10}(a)$ $y = \log_{10}(x) \leftrightarrow x = 10^y$

changement de base $a \rightarrow b$	$\log_a(x) = \log_b(x) / \log_b(a)$ $\log_{10}(x) = \ln(x) / \ln(a)$ $\ln(x) = \log_{10}(x) / \log_{10}(e)$
---	---

Caractéristique et mantisse du logarithme : le logarithme d'un nombre est composé de deux parties, la partie entière dite **caractéristique** et la partie décimale (après la virgule) dite **mantisse** logarithmique.

Exemple : $\text{Log}(433,075) = 2,6365\dots$ caractéristique : 2 mantisse : 0,6365...

Caractéristique : exponentiation

x	10^{-n}	0,01	0,1	1	10	100	1000	10^n
$\log_{10}(x)$	$-n$	-2	-1	0	1	2	3	n

Quelques mantisses logarithmiques :

x	1	2	3	$4=2^2$	5	$6=2*3$	7	$8=2^3$	$9=3^2$
$\log_{10}(x)$	0	0,301...	0,477...	0,6...	0,698...	0,778...	0,845...	0,903..	0,954..

exemples :

$\log_{10}(1,45612) = 0,163197167$: caractéristique : 0 mantisse : 0,163...

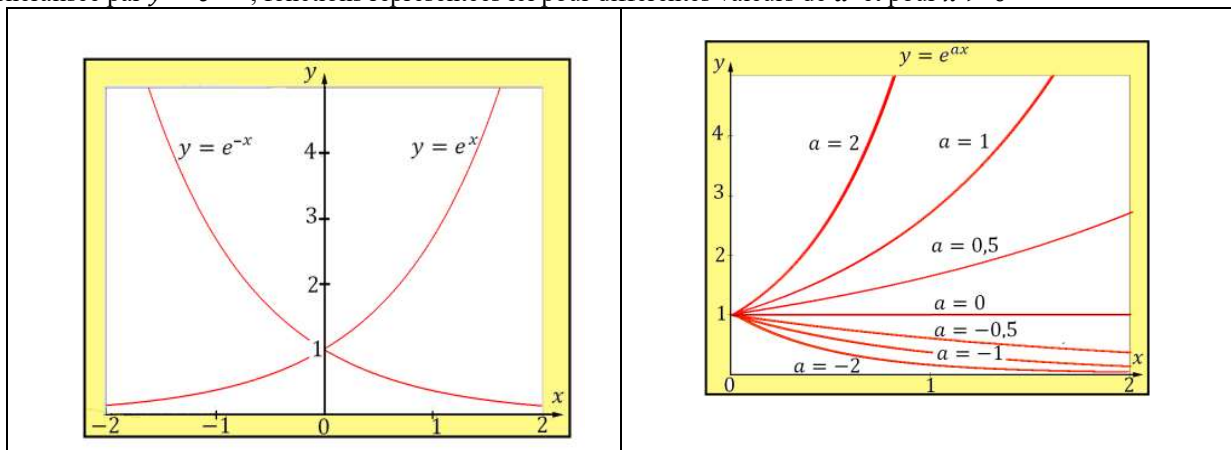
$\log_{10}(0,145612) = -0,836802833 = \log_{10}(1,45612) - 1$ négatif

$\log_{10}(14,5612) = 1,163197167 = \log_{10}(1,45612) + 1$, caractéristique : 1 mantisse : 0,163...

$\log_{10}(145,612) = 2,163197167 = \log_{10}(1,45612) + 2$, caractéristique : 2 mantisse : 0,163...

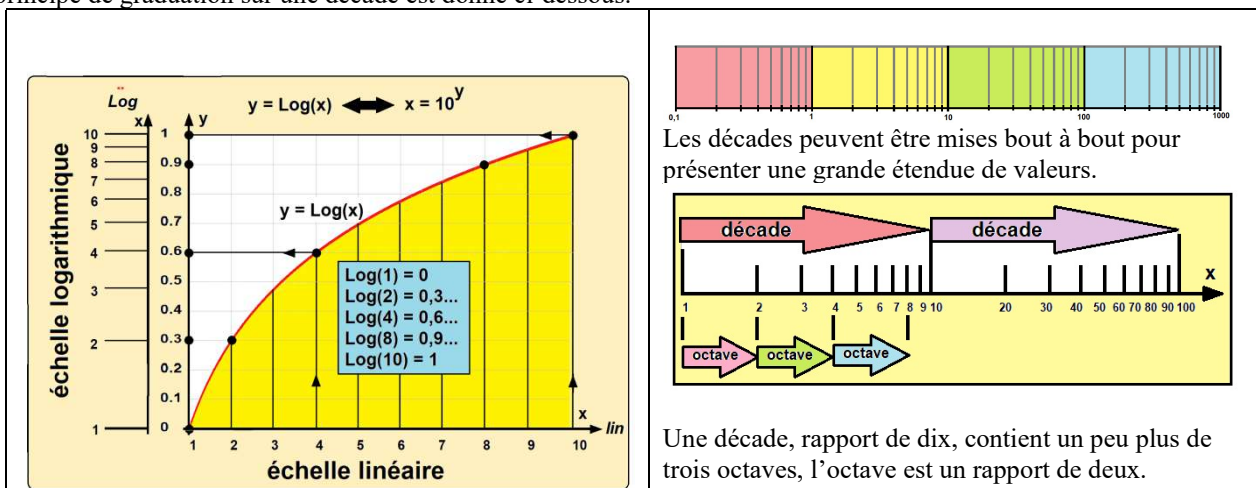
$\log_{10}(145612) = 5,163197167 = \text{Log}(1,45612) + 5$, caractéristique : 5 mantisse : 0,163...

Exponentielle: réciproque du logarithme népérien, c'est une fonction que l'on rencontre très fréquemment dans l'étude des circuits électriques. La fonction exponentielle $y = e^x$ est une fonction qui croît de plus en plus vite, elle est généralisée par $y = e^{ax}$, fonctions représentées ici pour différentes valeurs de a et pour $x > 0$

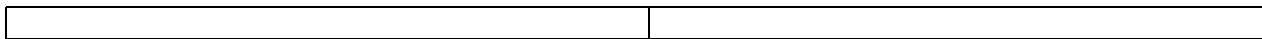


La fonction exponentielle $y = e^{ax}$ est croissante pour $a > 0$, elle est décroissante pour $a < 0$ et correspond pour les circuits électriques, aux lois de charge et décharge des composants réactifs (capacités et inductances), aux lois d'amortissement des circuits oscillants ainsi qu'aux lois d'atténuation dans les lignes de transmission.

Echelles logarithmiques : dans la construction des graphiques, pour avoir une grande étendue de valeurs avec une expansion des petites valeurs et une compression des grandes nous utiliserons des échelles logarithmique, dont le principe de graduation sur une décade est donné ci-dessous.

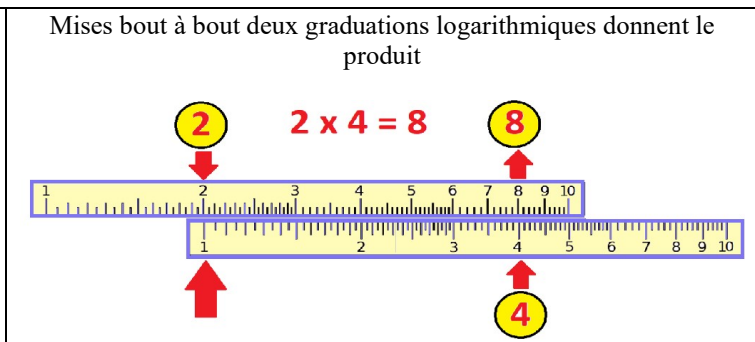
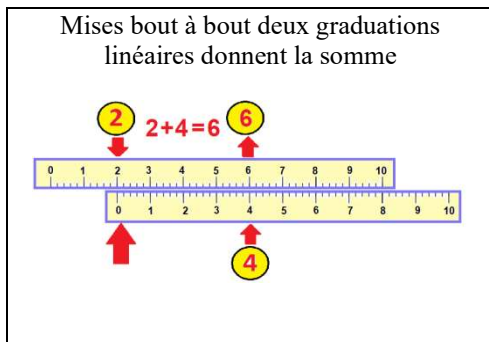
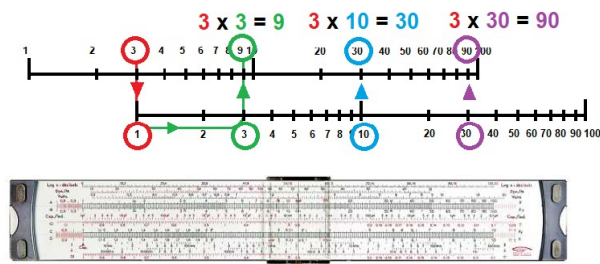


Une décade, rapport de dix, contient un peu plus de trois octaves, l'octave est un rapport de deux.

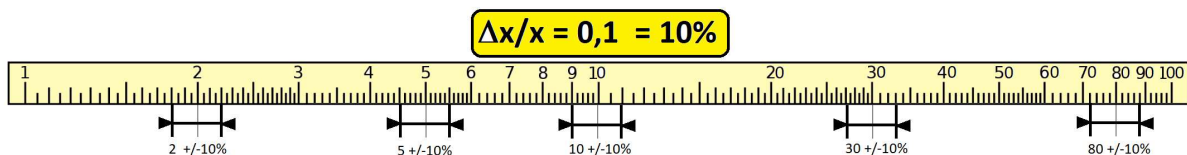


Sur une échelle de cinq décades la dynamique qui est le rapport des valeurs extrêmes est de 10^5 soit de 100000 tout en respectant la précision relative.

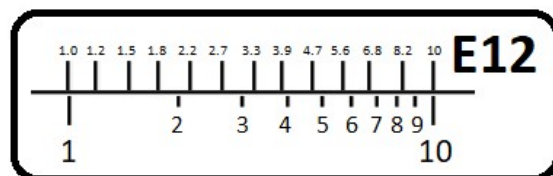
La règle à calcul : elle était très utilisée jadis avant l'apparition des calculatrices, elle utilise la somme géométrique des longueurs pour effectuer la multiplication. Elle permet bien d'autres calculs souvent spécialisés comme cette célèbre règle « Log—log electric » pour électronicien. Nostalgie ! C'était mieux que Bouvard et Ratinet mais avec un résultat beaucoup moins précis.



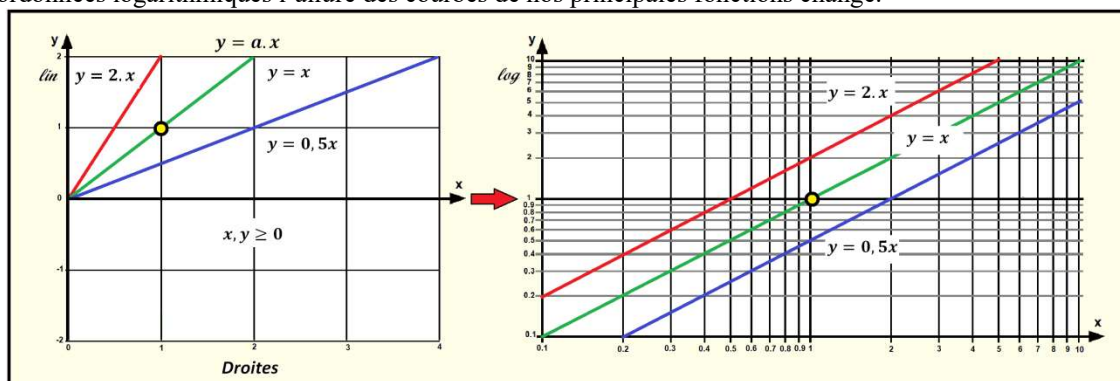
Géométriquement, l'erreur relative est conservée



Pour les composants électroniques comme les résistances, les séries de valeurs normalisées sont déterminées selon une division régulière de la décade logarithmique. Les composants à $\pm 10\%$ donne une répartition de 12 valeurs par décade, c'est la série Renard E12.

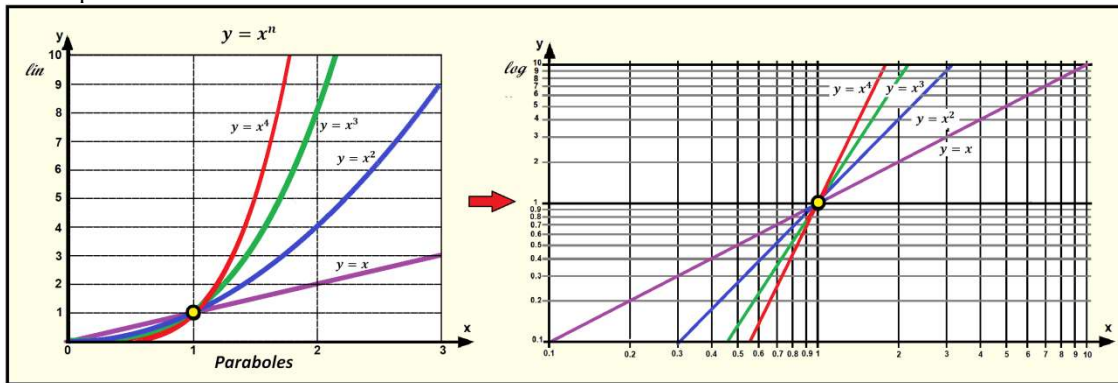


4 Repères cartésiens et repères log-log : Pour les graphiques, il y a deux cas, les abscisses et les ordonnées peuvent être graduées avec plusieurs modules logarithmiques (papier Log-Log) ou seulement un seul axe est logarithmique (papier semi-log), l'autre axe est alors gradué linéairement. En passant d'un graphe cartésien à graduations linéaires à des coordonnées logarithmiques l'allure des courbes de nos principales fonctions change.

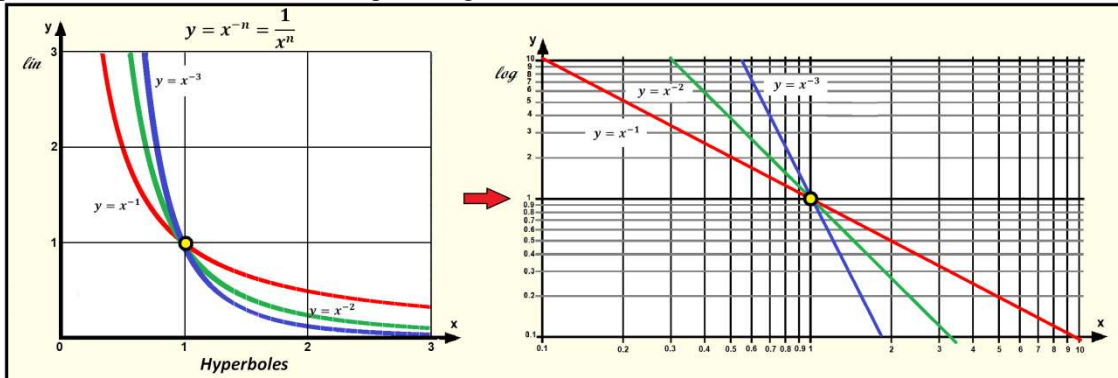


Des droites de la forme $y = a \cdot x$ de différentes pentes a ont pour représentation en Log-Log des droites parallèles de pente 1 (1 décade en ordonnée par décade en abscisse).

La fonction **puissance** de la forme $y = x^n$, amène aux paraboles, cubiques et autres courbes qui deviennent des droites de différentes pentes.



Les hyperboles deviennent des droites de pente négative.

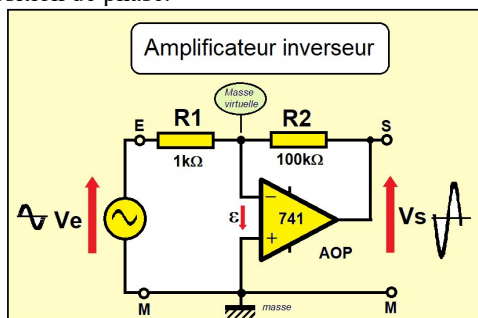


Ce type de graphe nous servira à élaborer les constructions asymptotiques de Bode pour l'étude des courbes de réponse harmonique (amplitude et phase) des différentes fonctions de transfert des filtres linéaires.

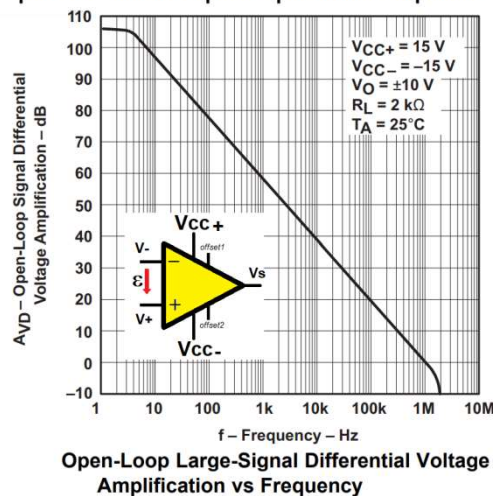
Principales utilisations : les diagrammes de Bode (électronique, filtrage servomécanismes et asservissements)

Un exemple d'utilisation : étude d'un amplificateur inverseur à amplificateur opérationnel 741. Le constructeur du composant donne sa courbe de réponse harmonique dans un repère semi-logarithmique. En ordonnée les fréquences sont réparties sur sept décades de 1Hertz à 10 Mégahertz, en abscisse le gain est donné en décibel (dB) sur une échelle linéaire, ce qui revient à l'équivalent d'une échelle logarithmique de 12 décades. Le circuit doit être alimenté par deux sources de tension pour polariser correctement ses composants internes (transistors), la référence zéro qu'on appelle la masse est reconstituée intérieurement dans le circuit, cette masse sert de référence à tous les signaux. Le gain de l'Aop est le rapport V_s/ϵ varie, dans de grande proportion et décroît hyperboliquement avec la fréquence, ce qui se traduit par une droite de pente négative dans le repère log-dB. L'électronicien traduit cette courbe par un chiffre, le produit gain-bande qui vaut 1MHz pour cet Aop.

Le signal à amplifier provient d'un générateur sinusoïdal qui se substitue à l'étage précédent. Le montage comporte deux résistances montées en réaction négative et qui apportent avec l'Aop un gain en tension $A_v = V_s/\epsilon = -R_2/R_1$. Le signe négatif amène les signaux à être en opposition de phase.



μA741 General-Purpose Operational Amplifiers



La première approche se fait en considérant que le montage sera stable (pas d'auto-oscillation, que les signaux sont petits pour ne pas saturer la sortie et que l'Aop est idéal (gain AVD infini, avec ces conditions nous obtenons un

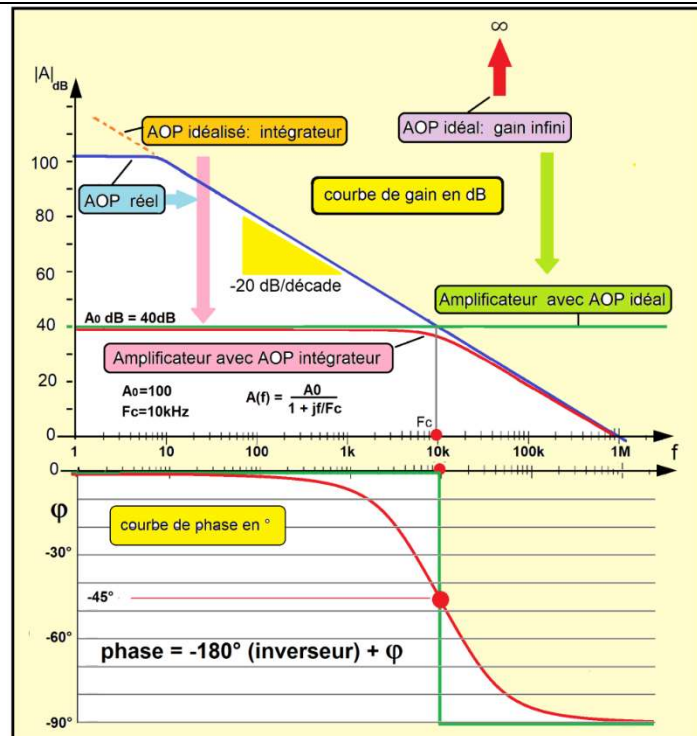
montage facile à analyser la tension différentielle ε est quasiment nulle, l'entrée non inverseuse (+) étant au potentiel zéro (masse) on a alors un potentiel nul sur l'entrée inverseuse (-) que l'on nomme "masse virtuelle". On montre alors que le gain du montage sera bien $A_v = V_s/V_e = -R_2/R_1$.

Ce raisonnement qui utilise un Aop idéal a des limites qui ne permettent pas d'évaluer correctement le montage et en particulier quelle sera sa fréquence de coupure (bande-passante), on améliore très nettement cette évaluation en assimilant la courbe donnée par le constructeur à un intégrateur. L'électronicien estime facilement le résultat à escompter grâce à l'analyse fonctionnelle (mise en équation systématique organisée autour d'un schéma ou d'un graphe). L'analyse fonctionnelle fait l'objet d'une présentation.

L'Aop idéal permet seulement d'évaluer le gain en tension aux très basses fréquences $A_0=100$, en prenant un modèle intégrateur (courbe en pointillé), on reste très proche de la réalité. Connaissant la fonction de transfert du montage résultant de l'analyse fonctionnelle, il est facile d'effectuer la construction asymptotique de Bode et de tracer la courbe réelle du gain. La fréquence de coupure sera de 10kHz que l'électronicien évalue par : gain en tension multiplié par la fréquence de coupure est égal au produit gain-bande du composant.

$$A_0.F_c = \text{produit gain-bande du 741 soit } F_c = 1\text{MHz}/100 = 10\text{kHz}$$

La courbe de phase donne l'évolution de la part de celui-ci avec la fréquence, il est remarquable de voir que sa valeur est non négligeable, une à deux décades avant la fréquence de coupure. Dans la réalité d'autres phénomènes sont à prendre en compte surtout avec les grands signaux comme la saturation en sortie et à l'intérieur de L'Aop en limitant la vitesse de croissance. Ce sont des phénomènes non-linéaires que l'on aborde bien par l'analyse fonctionnelle et par la simulation

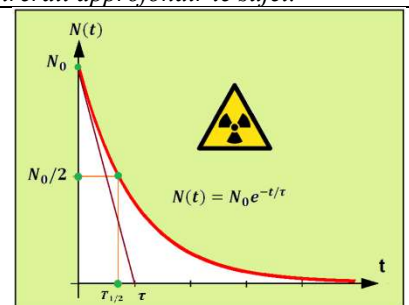


(PSPICE). Aux petits signaux ce sont les bruits électriques qui deviennent prépondérant et qui se superposent au signal utile, les Aops ordinaires sont le siège de bruits très importants. On retiendra que les échelles logarithmiques ou l'emploi des dB permettent d'avoir sur un même graphe une très grande étendue sans perdre en précision relative et que l'électronicien dispose de nombreux outils de calcul en passant par le premier que sont les mathématiques ainsi que les simulateurs, les seuls simulateurs ne sont pas suffisants à eux seuls.

Exemples de lois exponentielles et logarithmiques :

Les détails théoriques sont juste donnés à titre indicatif pour le lecteur qui désirerait approfondir le sujet.

La décroissance radioactive : la datation radiocarbone des archéologues utilise cette décroissance. Les organismes vivants sont constitués d'un très grand nombre d'atome de carbone ^{12}C (non radioactif et stable) sont aussi constitués de l'isotope radioactif ^{14}C dans un rapport beaucoup plus faible (1 pour 750 milliards), à la mort de l'organisme le nombre d'atome d'isotope va décroître à cause de son rayonnement (β^-). L'activité radioactive va décroître exponentiellement $N(t) = N_0 e^{-t/\tau}$ et elle sera de moitié après une période dite de demi-vie de $T_{1/2} = 5570$ ans.



A titre d'exercice vous pouvez rechercher la valeur du rapport $T_{1/2}/\tau$ Réponse : 0,693

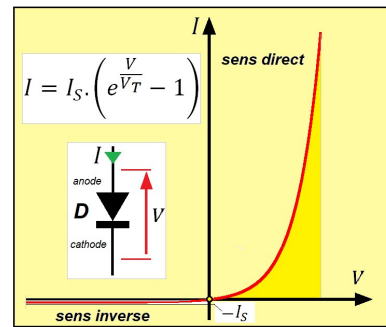
https://fr.wikipedia.org/wiki/Datation_au_carbone_14

Montage électronique amplificateur exponentiel et logarithmique:

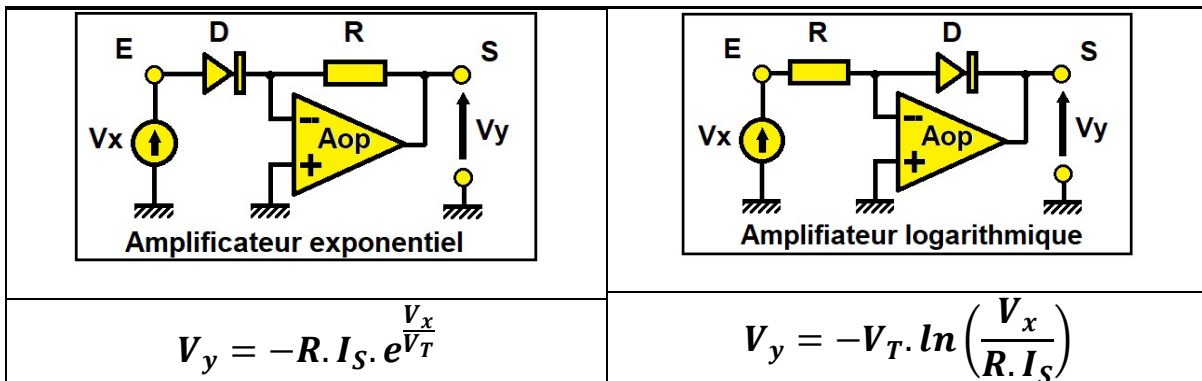
La diode silicium semi-conductrice à jonction PN possède une caractéristique $V = f(I)$ d'allure exponentielle, le décalage de -1 peut être négligeable ou compensable :

$$I = I_S \cdot \left(e^{\frac{V}{V_T}} - 1 \right) \sim I_S \cdot e^{\frac{V}{V_T}}$$

La diode est très sensible à la température T à cause du potentiel thermodynamique : $V_T = k \cdot \frac{T}{q} = 26\text{mV}$ à 300K et surtout du courant de saturation : $I_S = A \cdot T^3 \cdot e^{-E/V_T}$. De ce fait, la diode est souvent utilisée comme capteur de température.

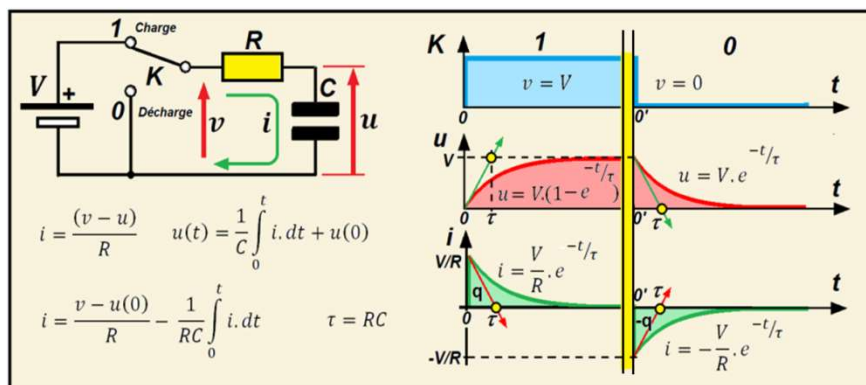


Mise en œuvre simplifiée avec un amplificateur opérationnel



Ces montages sont très sensibles à la température, et lorsqu'on en associe plusieurs dans une même fonction ils sont aussi très sensibles aux disparités entre les différentes jonctions mises en œuvre. Les montages utilisables dans la pratique sont nettement plus sophistiqués et rendus insensibles à ces influences par compensation. Les diodes réelles possèdent une résistance de substrat ayant une influence non négligeable et c'est la raison pour laquelle on préfère utiliser des transistors à jonction (NPN ou PNP) dont la diode BE est sans résistance de substrat supplémentaire et donne de meilleurs résultats. Une présentation spécifique sera consacrée à l'étude de ces montages électroniques amplificateurs exponentiels, logarithmiques et à transconductance linéaire.

Charge et décharge d'un condensateur à travers une résistance :

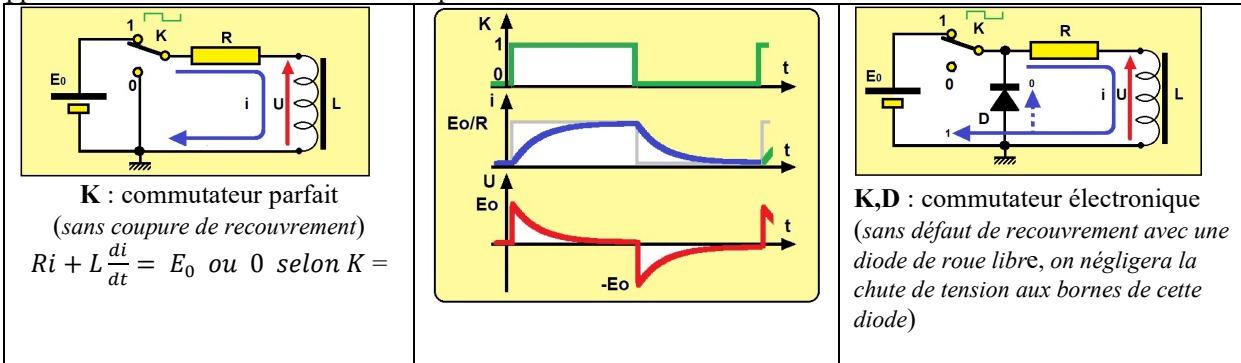


Le condensateur est une inertie en tension, c'est-à-dire qu'il essaie de s'opposer aux variations rapides de tension en faisant appel à du courant. La présence de cette résistance limite la rapidité d'évolution de la tension aux bornes du condensateur. Si la tension d'entrée est constante (V ou 0 volt), l'évolution de cette tension, comme celle du courant seront des lois exponentielles. L'unité physique du produit $R \cdot C$ est homogène à un temps et elle se nomme la constante de temps.

Ce circuit de charge RC se retrouve dans de très nombreux montages et particulièrement ceux devant gérer le temps : multivibrateur, temporisateur et autres retardateurs.

Circuit RL : De façon duale, tout ce qui est vrai pour le condensateur et la tension à ses bornes, le sera pour l'inductance (bobine) et le courant qui la traverse. Dans une inductance (un courant ne peut pas s'établir ou être coupé brutalement sans provoquer une forte tension à ses bornes, voire une surtension (amorçage d'un arc), les inductances

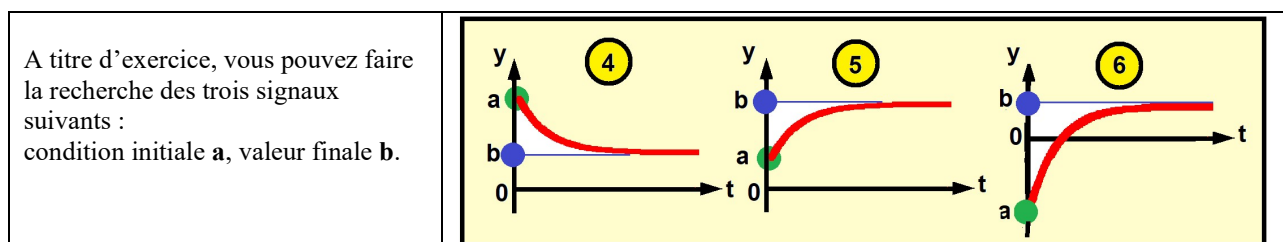
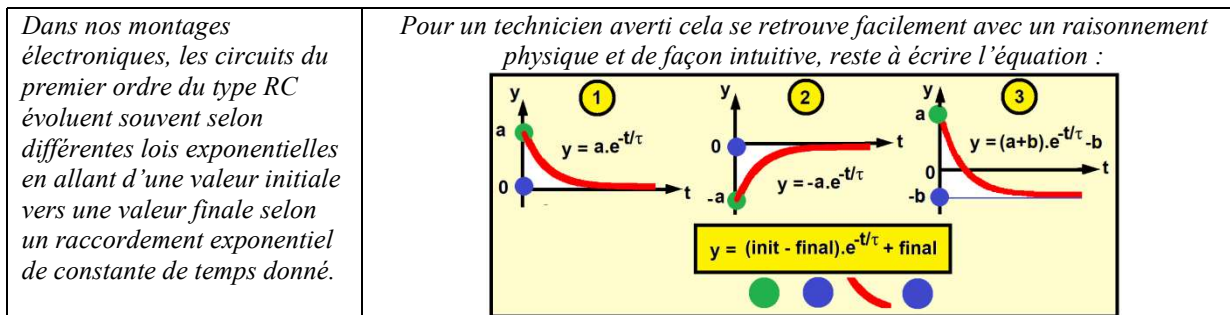
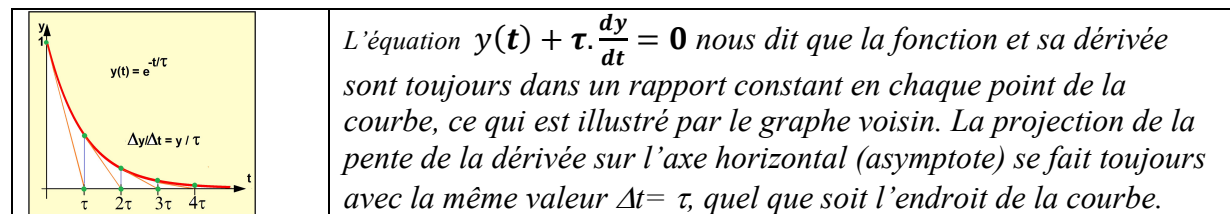
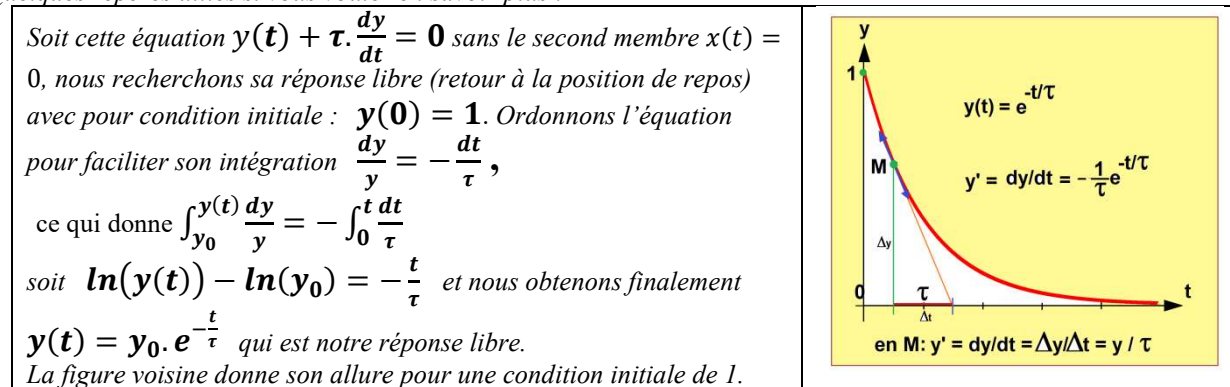
sont des inerties en courant, elles essaient de s'opposer à ses variations en provoquant une tension à ses bornes. Le rapport L/R est aussi une constante de temps.



Avec un bon raisonnement physique, les résultats se trouvent intuitivement.

Systèmes linéaires du premier ordre : ce sont les filtres les plus élémentaires rencontrés dans le traitement du signal ou en électronique. Dans la version filtre passe-bas du premier ordre (LP1), ils sont gérés par la plus simple des équations différentielles du premier ordre : $y(t) + \tau \frac{dy}{dt} = x(t)$ avec $x(t)$ variable d'entrée (le signal à filtrer) et $y(t)$ variable de sortie le signal filtré. Leurs réponses à des impulsions brèves en entrée (impulsion de Dirac) ou à des échelons (Heaviside) donne des réponses d'allure exponentielle. Leur réponse libre sont aussi des exponentielles décroissantes comme nous allons l'illustrer maintenant.

Quelques repères utiles si vous voulez en savoir plus :

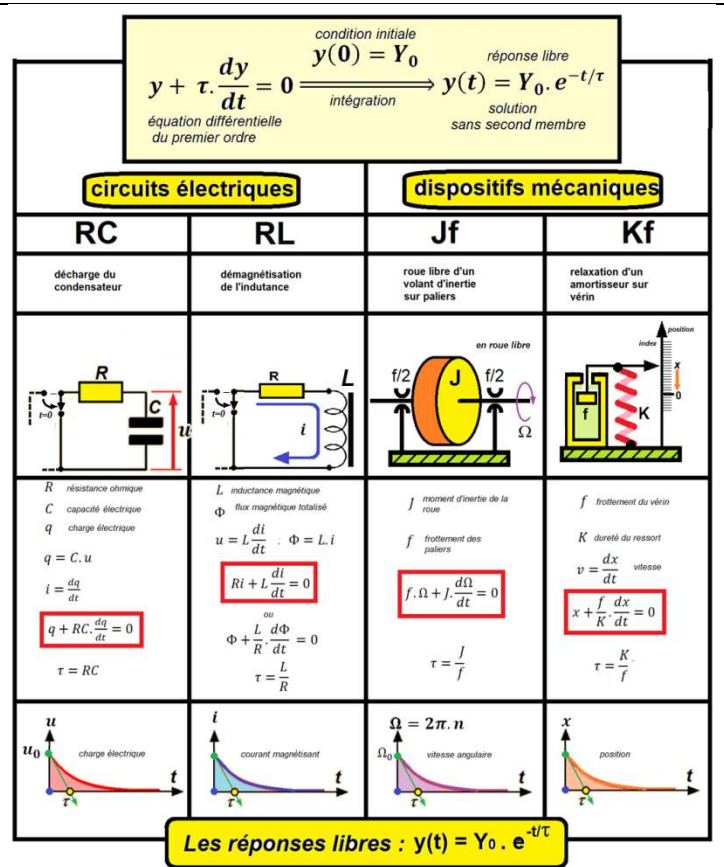


Les systèmes électriques, mécaniques ou thermiques peuvent être gérés par les mêmes équations mathématiques. La figure suivante l'illustre pour deux circuits électriques et deux dispositifs mécaniques qui sont régis par l'équation précédente. Ces quatre exemples sont donnés avec une condition initiale (à $t=0$) non nulle et en mode réponse libre (décharge) et retour à l'équilibre (arrêt).

Il est possible de faire des schémas d'analogie mécanique/électrique et ainsi faire les simulations électriquement.

Ces systèmes électriques ou mécaniques peuvent être liés ainsi qu'à des systèmes électromécaniques, hydrauliques ou thermiques et permettront ainsi d'étudier des dispositifs très complexes ayant des comportements analogiques.

Dans la pratique cela peut être différents de ces modélisations linéaires, car les inductances ne le sont pas (fer saturable magnétiquement, hystérésis), les frottements de palier et les vérins ne sont pas très linéaires, frottements secs, types d'écoulement des fluides. La raideur des ressorts ou des élasticités est non linéaire en forte extension. Ces modèles mécaniques sont très utiles en électrotechnique (actionneurs, capteurs, moteurs, électroaimants etc.) ainsi qu'en audio (haut-parleurs, microphones) et doivent être inclus dans l'analyse fonctionnelle des systèmes complexes.



Les montages précédents avec comme réponse libre des lois exponentielles ou oscillatoires sinusoïdales amorties sont le point de départ de l'étude des filtre analogiques bien connus des électriciens et électroniciens. Ces réponses peuvent être transposées à des lois discrètes et auront des applications avec des commandes numériques, des calculateurs ou des processeurs de signaux, les équations différentielles deviendront des équations aux différences finies et nous entrons dans le domaine du filtrage numérique.

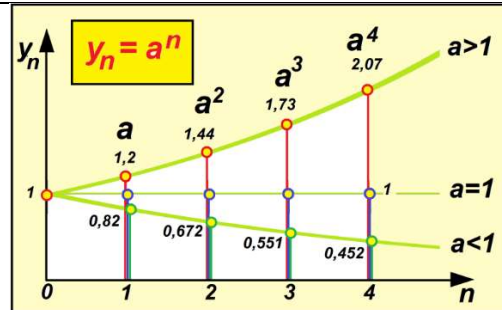
Numérisation de la loi exponentielle : les signaux d'allure exponentielle donnés par les systèmes gérés par une équation différentielle linéaire du premier ordre à coefficient constant que nous avons abordé jusqu'ici sont analogiques, c'est-à-dire à temps continu t , lisse ou continu ainsi que les réponses. Les systèmes numériques comme les processeurs et particulièrement les DSP (digital signal processor) utilisés comme unités de calcul peuvent donner aussi des signaux d'allure exponentielle mais à temps discret, selon l'ordre n .

Considérons une suite de valeurs selon l'ordre n de la forme $y_n = a^n$ et commençant par la valeur initiale $y_0 = 1$. La valeur suivante pour $n=1$ est $y_1 = a$, les autres valeurs qui suivent sont calculées par récurrence : $y_n = a \cdot y_{n-1}$. Cela donne dans l'ordre : 1, a , a^2 , a^3 , a^4

Si $a > 1$ la suite de valeurs est divergente ce qui correspond à une exponentielle croissante dont l'argument est positif.

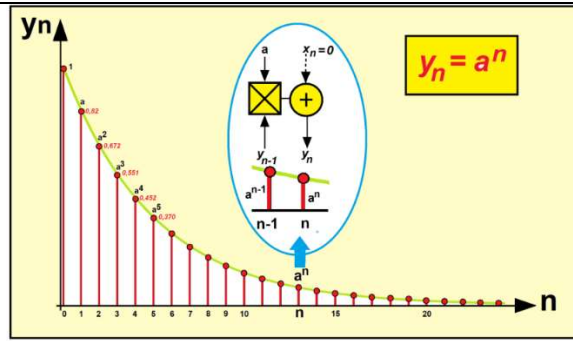
Si $a < 1$ la suite est convergente ce qui correspond à une exponentielle décroissante dont l'argument est négatif.

Pour $a=1$ la suite n'évolue pas et reste constante, c'est un échelon.

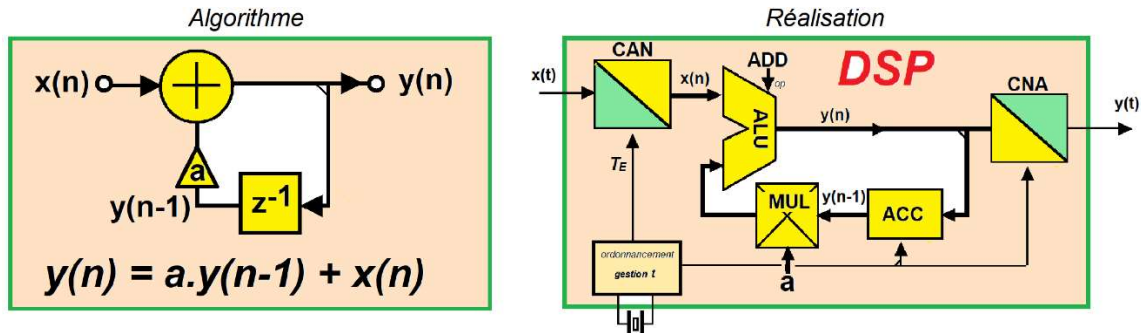


La figure suivante illustre plus en détail une suite de valeur d'allure exponentielle décroissante, le calcul d'une impulsion de rang quelconque peut se calculer par récurrence avec l'échantillon précédent $y(n) = a \cdot y(n-1)$.

En utilisant un opérateur multiplication qui effectue le produit de cet échantillon $y(n-1)$ par la constante a , un additionneur pour une éventuelle entrée $x(n)$ et une mémoire (accumulateur) pour mémoriser le calcul actuel $y(n)$ qui sera dans le calcul suivant le terme $y(n-1)$, nous avons réalisé le concept de base du processeur numérique de signal (*DSP*). En entrant un signal numérique $x(n)$ et avec $a < 1$, en prenant $y(n)$ comme signal de sortie, nous obtenons notre premier filtre numérique passe-bas récursif.



Un filtre numérique très élémentaire est représenté par un schéma fonction donne l'algorithme d'un filtre passe-bas du premier ordre et qui sera possible de programmer sur un processeur de signal.



Le filtrage numérique est un domaine très vaste et qui nécessite une étude complète qui sera abordée dans la suite.

Conclusion : nous avons vu avec des exemples variés que l'emploi des fonctions logarithmiques et exponentielles est fondamental en électronique et que la maîtrise des connaissances mathématiques est indispensable. Les lecteurs désireux d'approfondir ces informations avec les sites dédiés sur internet sous son aspect mathématique, physique et électronique.