

Les lignes de transmission en régime impulsionnel

1°: Introduction

- Historiquement, au 19^{ème} siècle, c'est la mise en œuvre du télégraphe morse sur des longues distances.
- En électrotechnique, la propagation des impacts de foudre sur les lignes HT.
- Dans la multitude des problèmes rencontrés en compatibilité électromagnétique CEM (*EMC*).
- La mise en œuvre des circuits numériques et électroniques rapides.
- La ligne de transmission (*feeder*) entre l'émetteur et l'antenne en régime sinusoïdal.
- Certains analyseurs d'antenne disposent de l'option TDR.
- Comprendre le mécanisme de propagation en impulsionnel, nous aidera à mieux comprendre les lignes en régime sinusoïdal et l'emploi de l'abaque de Smith.

Les lignes de transmissions en impulsions peuvent être étudiées par la méthode graphique dite de Bergeron. (JP Vabre, auteur d'une série d'ouvrage d'électronique des impulsions).

Références bibliographiques : Metzger et Vabre, Électronique des impulsions. Tome 2 circuits à constantes réparties. Tomes 6-1 et 6-2 Lignes couplées en régime transitoire Vabre JP. Pseudo-adaptation des interconnexions en technologie TTL (L'onde électrique n°55)

Assemblage et liaisons des circuits logiques dans les ordinateurs (Maroille, Prouin, Vabre) Dumas-Pacaud Electronique impulsionnelle. E150 technique de l'ingénieur.

<http://www-pepin.ensea.fr/pdf/LignesPropPoly.pdf>

www.ti.com/lit/an/sdya014/sdya014.pdf The Bergeron Method

Les lignes à microruban (De Neef, Electronique Application 10-11-12)

MECL system Design handbook (Motorola)

Haute tension, traité d'électricité (XXII) EPFL de Michel Aguet et Michel Ianoz

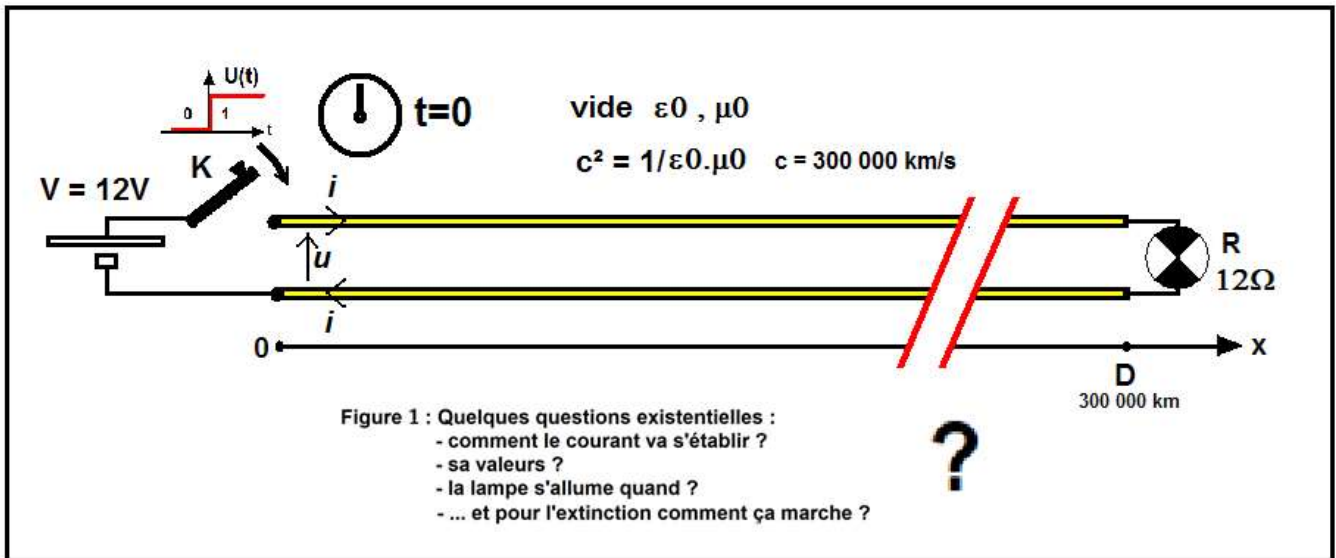
<https://books.google.fr/books?isbn=2880744822>

Notes d'application de Texas Instrument: **The Bergeron Method (EB162E)**.

www.ti.com/lit/an/sdya014/sdya014.pdf The Bergeron Method

system Design handbook (Motorola)

Avant d'aborder l'étude des lignes, posons-nous quelques questions sur le mécanisme de la conduction électrique :



Si vous pouvez répondre avec exactitude à toutes ces questions, vous n'avez peut-être pas besoins de ce cours !

Les éléments de solutions seront données oralement, vous les retrouverez progressivement en lisant la suite de cette présentation.

L'onde qui se propage dans une ligne de transmission est constituée essentiellement d'énergie électromagnétique confinée dans l'isolant entre les deux conducteurs. Sa vitesse dépendra donc uniquement de la nature de l'isolant, elle est la même que celle de la lumière dans cet isolant. Dans le vide ou l'air, elle est de $c_0 = (\epsilon_0 \cdot \mu_0)^{-1/2} = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s} = 300\,000\text{ km/s}$ environ, dans un autre milieu isolant, elle est inférieure et elle dépend de la permittivité diélectrique de ce milieu : $c = c_0 / (\epsilon_r)^{1/2}$.

Cette onde est une vibration transversale, dite **TEM** (*Transverse ElectroMagnetic*), constituée d'un champ électrique **E** (ou **D**) avec des lignes de force orientées d'un conducteur vers l'autre et d'un champ magnétique **B** (ou **H**) entourant les conducteurs.

3° : Propagation :

Équations de propagation de d'Alembert:
 $d^2y/dt^2 = c^2 \cdot d^2y/dx^2$, $c^2 = T \cdot L/m$, c (célérité), vibration transversale $y(x,t)$
 relation entre l'accélération d^2y/dt^2 d'une grandeur y et son laplacien $\Delta y = d^2y/dx^2$

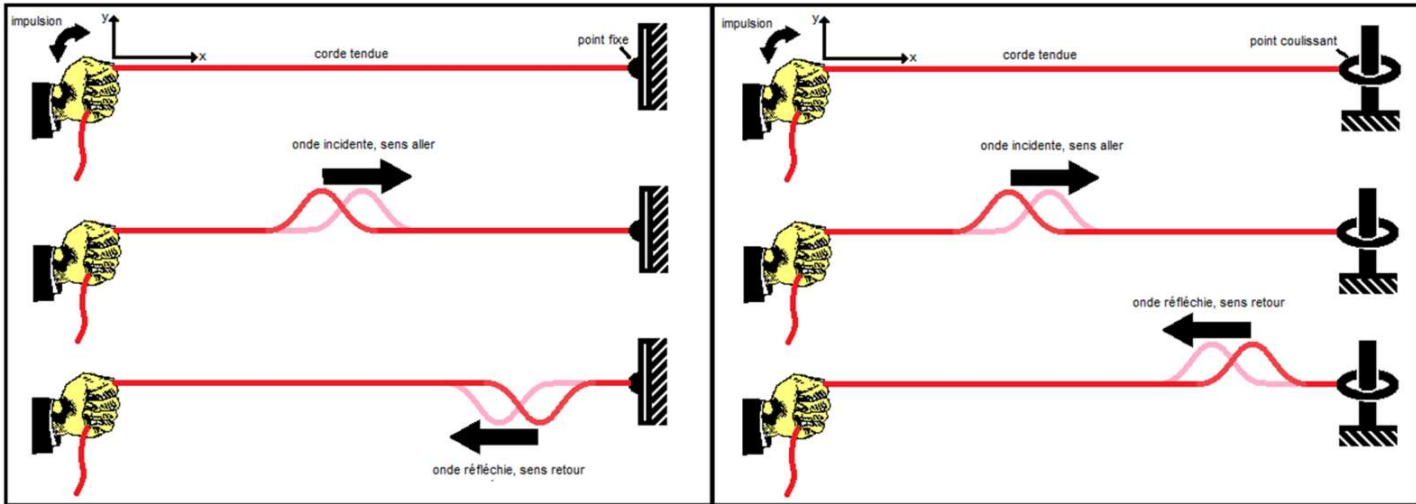


Figure 3 : Onde mécanique, extrémité fixe ou libre

C'est le même phénomène avec des impulsions électriques dans une ligne de transmission :

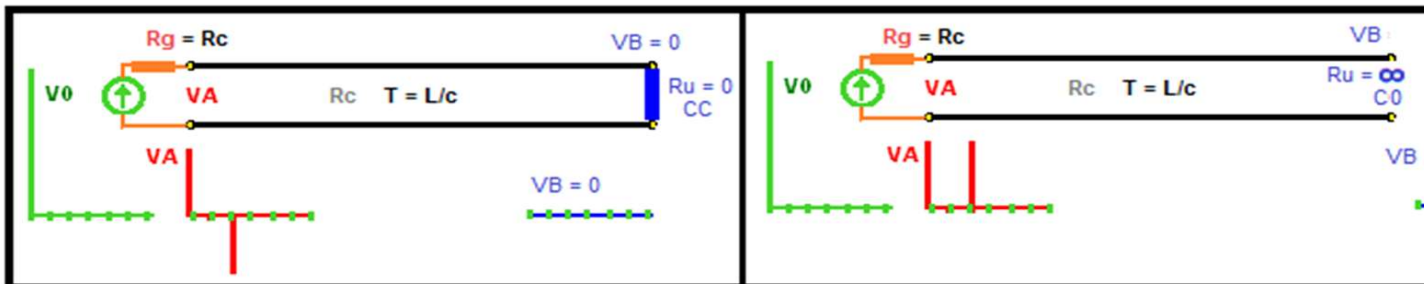


Figure 4 : Onde électrique, extrémité court-circuitée ou ouverte

on ne visualise pas les ondes mobiles (qui se déplacent), mais seulement leurs effets : tensions ou courant en un point fixe de la ligne,

La ligne de transmission électrique :

L'onde qui se propage dans une ligne de transmission est constituée essentiellement d'énergie électromagnétique **EM** confinée dans l'isolant entre les deux conducteurs. Toute l'énergie est dans l'isolant mais elle suit dans sa propagation le trajet des conducteurs, elle est introduite par les conducteurs à l'entrée de la ligne, elle est aussi récupérée en sortie par conduction. Les conducteurs se comportent comme un guide d'onde, où la manifestation électrique est une différence de potentiel, la tension **u** entre les conducteurs et le courant **i**. Les dimensions transversales étant petites devant les phénomènes mis en œuvre, ce courant **i** est le même dans les deux conducteurs et de sens opposé. La vitesse de propagation dépendra uniquement de la nature de l'isolant, elle est la même que celle de la lumière dans cet isolant.

$c_0 = (\epsilon_0 \cdot \mu_0)^{-1/2} = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s} = 300\,000 \text{ km/s}$ environ, dans un autre milieu isolant, elle est inférieure à cette vitesse et elle dépend de la permittivité diélectrique de ce milieu : $c = c_0 / (\epsilon_r)^{1/2}$.

Cette onde est une vibration transversale, dite **TEM** (*Transverse ElectroMagnetic*), constituée d'un champ électrique **E** (ou d'induction électrique **D**) avec des lignes de force orientées d'un conducteur vers l'autre et d'un champ magnétique d'induction **B** (ou d'excitation **H**) entourant les conducteurs.

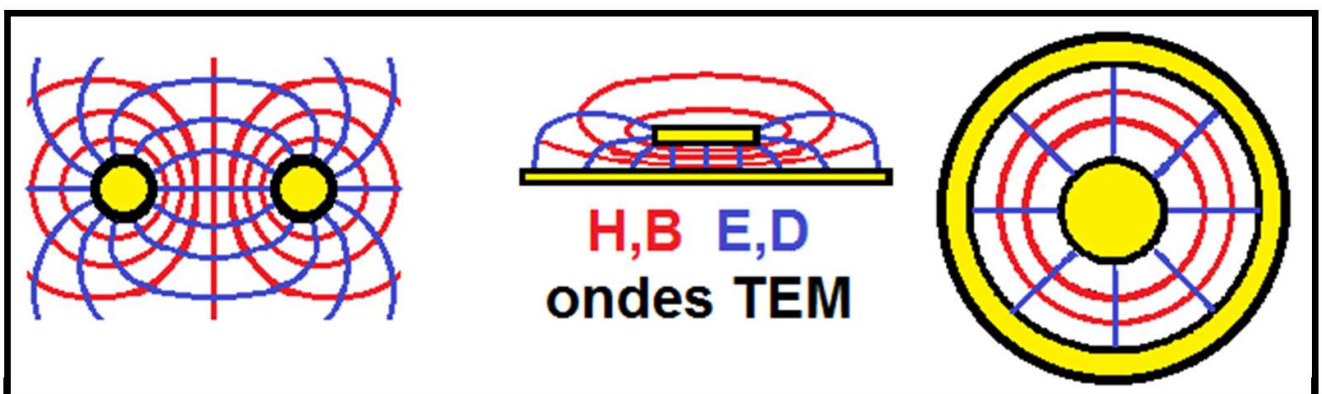


Figure 5 : Ondes TEM dans une ligne de transmission

Heaviside

Le couple (**u**, **i**) est une onde mobile qui se déplace dans un sens ou l'autre sur la ligne. En un point fixe de la ligne la tension et le courant mesurés (**V**, **I**) sont l'effet de la superposition de toutes les ondes mobiles.

Le rapport tension courant de l'onde mobile est appelé impédance ou résistance caractéristique de la ligne : $Rc = u/i$. La valeur de **Rc** dépend de la forme et des dimensions des conducteurs ainsi que de la nature de l'isolant ϵ_r .

Inductance linéique (inductance par unité de longueur) notée λ mesurée en H/m qui caractérise l'aptitude de cette ligne à stocker de l'énergie magnétique.

Capacité linéique notée γ en F/m qui caractérise l'aptitude de cette ligne à stocker de l'énergie électrique.

Étude électromagnétique d'un tronçon de ligne

Considérons un tout petit tronçon (élémentaire) de la ligne de longueur dx , il subit une variation de la tension $u + du$, due à la part inductive de ce tronçon et une variation du courant qui le traverse due à la part capacitive de ce même tronçon $i + di$. En respectant bien notre convention des signes, nous évaluons facilement l'expression de la résistance caractéristique qui est le rapport de la tension par le courant de l'onde qui se propage : $R_c = u/i$, ainsi que l'expression qui lie nos constantes linéiques λ et γ à la vitesse de propagation de l'onde $c = dx/dt$.

$$du = -\lambda \cdot dx \cdot di/dt$$

$$di = -\gamma \cdot dx \cdot du/dt$$

$$\left(\frac{du}{di}\right)^2 = \frac{\lambda}{\gamma} = R_c^2$$

$$R_c = \frac{u}{i} = \frac{du}{di} = \sqrt{\frac{\lambda}{\gamma}}$$

$$\left(\frac{dx}{dt}\right)^2 = \frac{1}{\lambda \cdot \gamma} = c^2$$

$$c = \frac{1}{\sqrt{\lambda \cdot \gamma}} = c_0 = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \cdot \epsilon_0}}$$

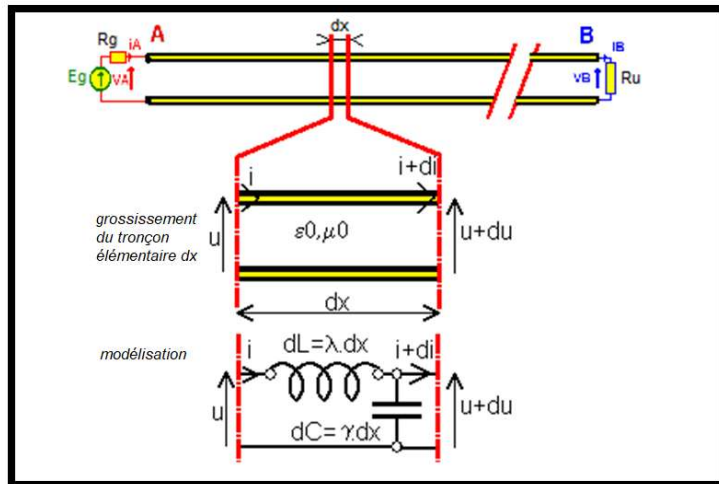


Figure 6 : tronçon de ligne élémentaire

Application Numérique : un câble coaxial de 50 Ohms (R_c) mesurant 10 mètres (L) présente une capacité entre ses deux conducteurs de $C=1\text{nF}$ (mesure au capacimètre en basse-fréquence). Quels sont ses principaux paramètres encore inconnus (capacité linéique, inductance linéique, vitesse de propagation des ondes, coefficient de vélocité et coefficient de permittivité relative de l'isolant).

$$\gamma = C/L = 100 \text{ pF/m}$$

$$R_c^2 = \lambda/\gamma = 50^2 = 2500 \text{ d'où } \lambda = 250 \text{ nH/m}$$

$$c^2 = 1/(\lambda \cdot \gamma) \text{ d'où } c = 2 \cdot 10^8 \text{ m/s, le coefficient de vélocité est donné par :}$$

$$k = c/c_0 = 2/3 = 0.66, \quad \epsilon_r = (c_0/c)^2 = (3/2)^2 = 2.25 \text{ dans la mesure où ce milieu isolant est homogène.}$$

Les grandeurs électromagnétiques :

Nous pouvons aussi retrouver ces équations en utilisant directement les relations entre les grandeurs électromagnétiques. Ces grandeurs sont présentées ici sur un graphe de cohérence des équations avec des arcs orientés qui les relient par un opérateur, ce graphe a en premier un rôle mnémotechnique.

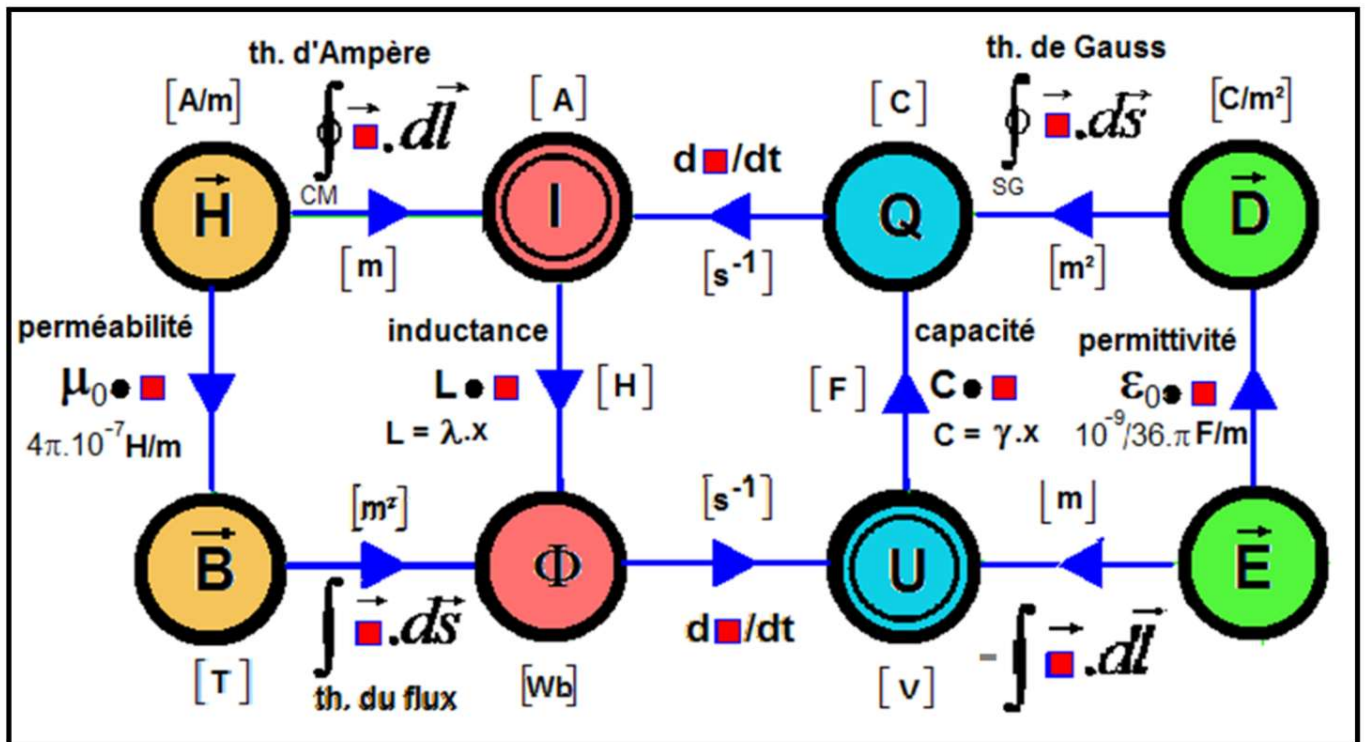


Figure 7 : les grandeurs électromagnétiques

Les grandeurs sont mises verticalement deux par deux au sens de l'intensité (grandeur de tension ou d'effort) et de l'extensivité (grandeur de flux souvent liée aux dimensions de l'objet).

\vec{B} et \vec{H} sont les grandeurs magnétiques qui sont liées au courant i qui traverse les conducteurs et au flux Φ perçu par ces conducteurs.

\vec{D} et \vec{E} sont les grandeurs électriques dans le milieu isolant, elles sont liées à la tension électrique u (différence de potentiel entre les conducteurs) et à la charge Q accumulée sur ces conducteurs.

Les grandeurs électriques dans ces deux milieux (magnétiques et électriques) sont dépendantes, les variations temporelles de Q donnent le courant i et les variations temporelles du flux perçu $d\Phi/dt$ par les conducteurs se traduisent par une tension électromotrice u .

Considérons à nouveau notre ligne de transmission constituée de deux conducteurs parallèles dans l'air et ayant une longueur pouvant être quelconque, à l'instant $t=0$, nous appliquons une tension V_0 sous forme d'un échelon d'Heaviside. Le front d'onde évolue, nous pouvons l'observer en instantané: à l'instant t , il se situe en $x = c.t$, c étant sa vitesse de propagation. Dans la première partie de 0 à x , les deux conducteurs sont traversés par un courant i constant (en bleu), la seconde partie n'est pas encore parcourue par un courant. Nous en déduisons que le courant i ne dépend pas pour l'instant de la valeur de la charge Q qui peut être très éloignée. De façon identique, les deux conducteurs se trouvent à une différence de potentiel u uniforme et constante, dans la première partie (en rouge) et nulle pour le reste. Toujours avec cet instantané, nous pouvons dire que les deux conducteurs constituent aussi des armatures de condensateur et qu'ils possèdent une charge stockée Q , ils sont entourés de lignes magnétiques (non représentées) qui s'engouffrent entre eux pour créer un flux magnétique ϕ comme une inductance en forme de boucle et qui grossirait à la façon d'un trombone à coulisse.

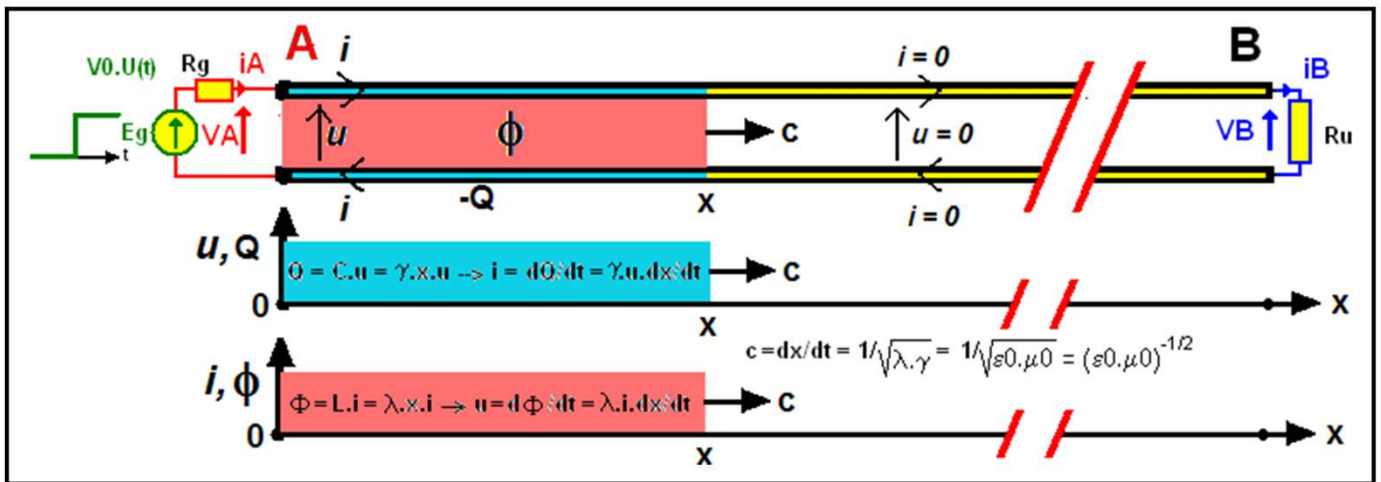


Figure 8 : La ligne se remplit d'énergie électromagnétique

Lorsque le front d'onde évolue et remplit la ligne d'énergie électromagnétique, nous pouvons considérer que la ligne vue du générateur (A) est analogue à un condensateur variable qui grandit avec la position du front : $C = \gamma.x$, avec x qui varie dans le temps, ce

$$\text{qui amène à : } Q = C.u = \gamma.x.u \rightarrow i = \frac{dQ}{dt} = \gamma.u.\frac{dx}{dt}$$

Ici pour la dérivée, c'est x qui varie dans le temps et u est constante, d'où l'apparition de la vitesse dx/dt .

De la même façon, nous pouvons admettre que la ligne se présente comme une inductance variable qui grandit avec la position du front d'onde: $L = \lambda.x$, ce qui amène avec

$$\text{les mêmes remarques concernant la dérivée : } \phi = L.i = \lambda.x.i \rightarrow u = \frac{d\phi}{dt} = \lambda.i.\frac{dx}{dt}$$

Nous en déduisons facilement l'expression de la célérité (vitesse) des ondes :

$$\frac{dx}{dt} = \frac{i}{\gamma.u} = \frac{u}{\lambda.i} \rightarrow \left(\frac{dx}{dt}\right)^2 = \frac{1}{\lambda.\gamma} \rightarrow c = \frac{dx}{dt} = \frac{1}{\sqrt{\lambda.\gamma}} = \frac{1}{\sqrt{\mu.\epsilon}}$$

avec dans un milieu isolant isotrope, la permittivité diélectrique $\epsilon = \epsilon_r.\epsilon_0$, la perméabilité magnétique $\mu = \mu_r.\mu_0$

La vitesse n'étant qu'imposée que par la nature du diélectrique, la dernière relation indique donc que la capacité linéique γ et l'inductance linéique λ sont liées : $\lambda.\gamma = \mu_0.\epsilon_0$.

Si le milieu isolant est l'air la vitesse est sensiblement la même que celle de la lumière dans le vide

$$= 299\,106 \text{ m/s}, \quad \epsilon_0 = 10^{-9}/36\pi \text{ F/m}, \quad \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$$

$$c_0 = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \cdot \epsilon_0}} = (\mu_0 \cdot \epsilon_0)^{-1/2}$$

Si nous connaissons l'une des deux grandeurs λ ou γ par le calcul ou la mesure et que la nature du diélectrique ou le coefficient de vélocité ou l'impédance caractéristique du câble coaxial est connu, l'autre grandeur est imposée.

Nous remarquons aussi, que vouloir établir une tension et un courant entre deux fils, cela relève avant tout d'un phénomène électromagnétique avec l'établissement d'une onde électromagnétique dans le milieu isolant qui entoure ces fils et d'une onde électrique (u, i) qui se déplace.

Nous pouvons aussi voir avec un fil très long, que la valeur du courant pour une tension donnée ne dépend pas, à l'établissement du courant, de la résistance branchée à l'autre extrémité mais uniquement de la résistance caractéristique R_c de la ligne. L'énergie se propage à la vitesse de la lumière dans ce milieu avec une disposition des lignes de champ en mode TEM.

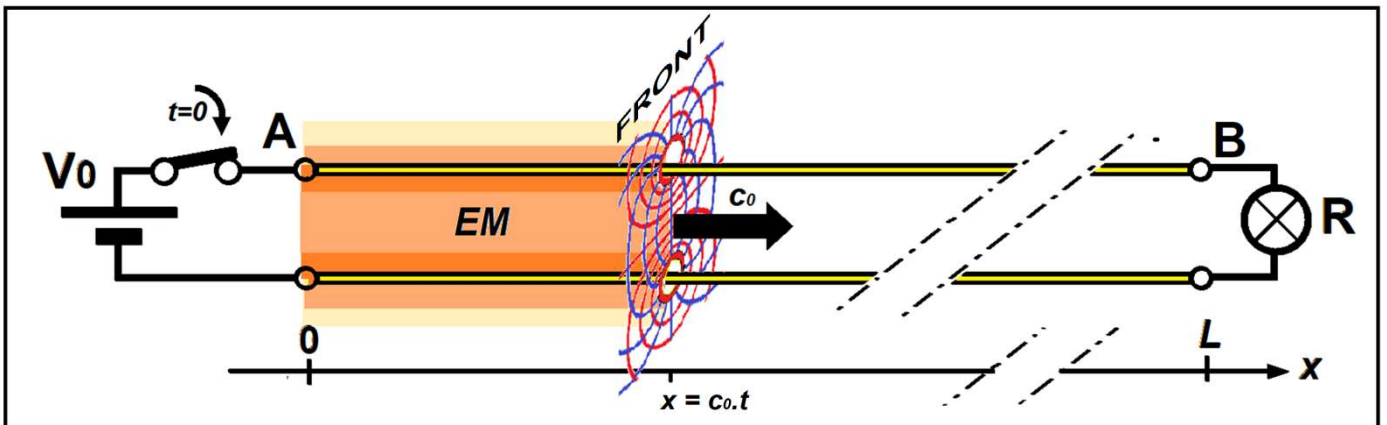


Figure 10 : La ligne est un guide d'onde en mode TEM

Tout le tronçon de ligne se situant en amont du front, coté A est soumis à une tension continue V_0 et un courant $i = V_0/R_c$ et tout ce qui est en aval n'est pas encore soumis à aucune contrainte électrique. Le mécanisme de la conduction électrique qui consiste à dire que c'est le déplacement des électrons qui se repoussent de proche en proche, n'est pas satisfaisant, en particulier au niveau du front d'onde.

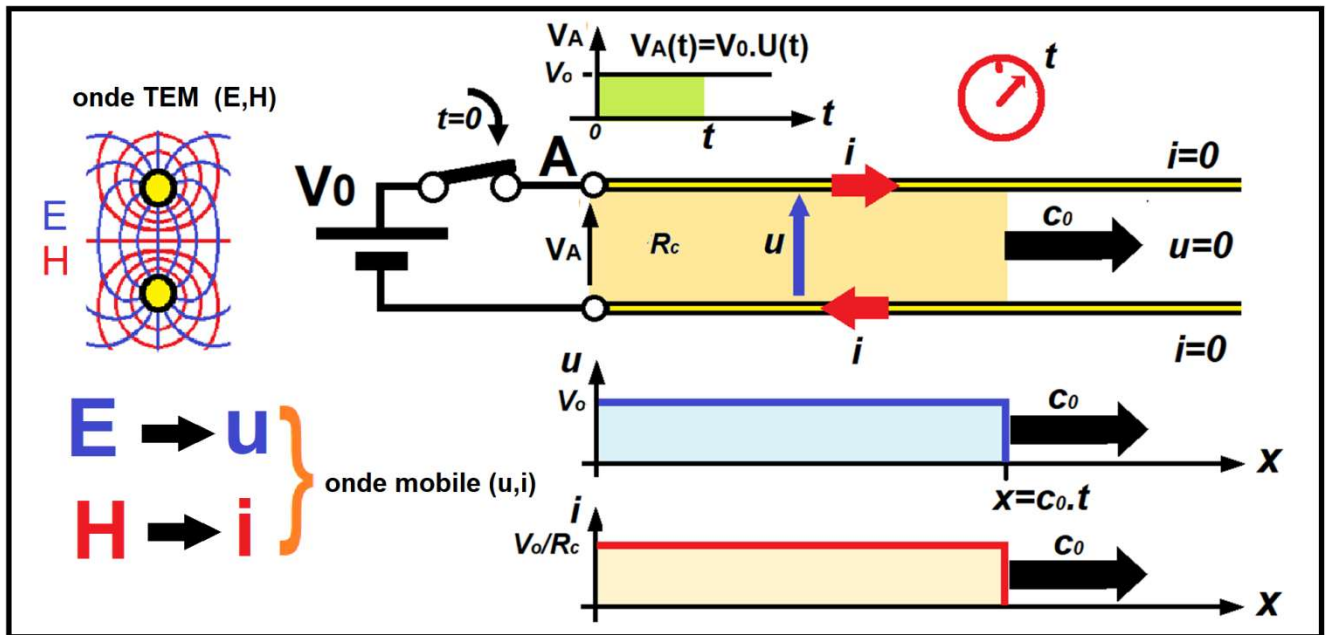
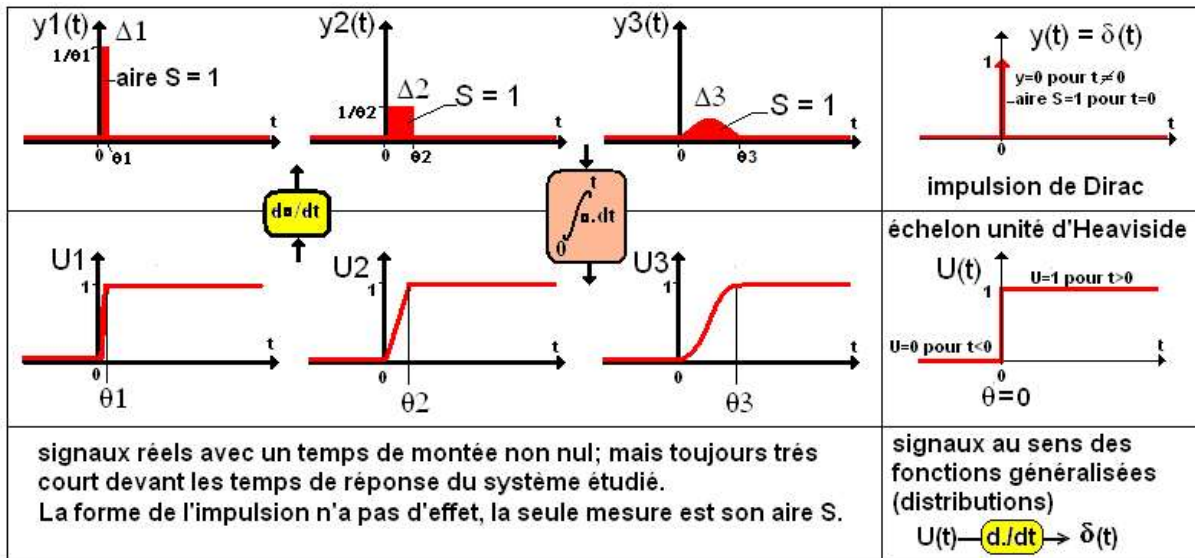


Figure 11 : L'établissement de E et H dans l'isolant correspond à celui de u et i dans les conducteurs.

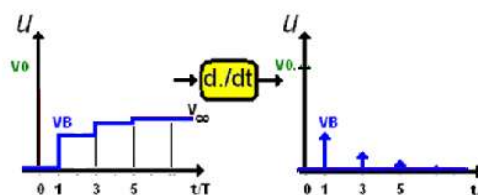
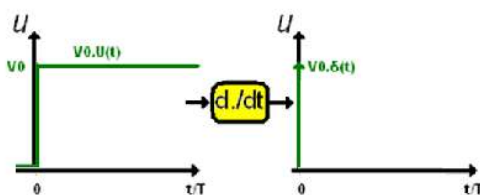
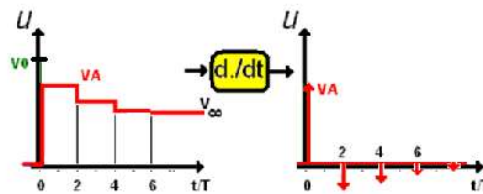
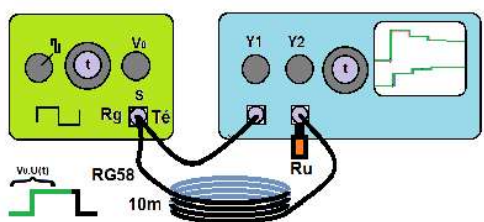
et quand elle arrive à l'extrémité B, elle correspond peut-être à ce qui accepté par cette charge, c'est l'adaptation, elle est peut-être trop faible ou trop forte et plusieurs allers et retours seront nécessaires avant d'avoir $i = V_0/R$, cela s'appelle un transitoire. Pour l'extinction, il y aura au mieux un retard T et cela pourra se faire lentement en palier si il y a une mauvaise adaptation.

Ligne de transmission en impulsionnel ? OUI, mais qu'est-ce qu'une impulsion électrique ? Ici, ce sera soit un échelon unité $U(t)$ dit de Heaviside, soit une impulsion brève $\delta(t)$ dite de Dirac. L'impulsion de Dirac est obtenue par la dérivée de l'échelon (sa variation temporelle), son aire doit être connue car, par intégration, ce sera la hauteur de l'échelon. Dans la pratique (au sens physique), ces impulsions n'ont pas besoin d'être parfaites, seul le temps de montée θ doit être bref et très inférieur au temps de réponse du système étudié, la forme de l'impulsion n'a pas d'importance, la forme du dirac n'aura d'influence que sur la forme du temps de montée.



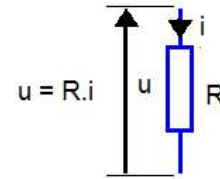
En résumé, la signification physique de l'impulsion de Dirac est une impulsion de durée très brève devant celle des phénomènes étudiés et dont la surface, c'est-à-dire l'intégrale vaut l'unité. Sa forme n'a pas d'importance, on peut donc éventuellement si on le désire, la choisir continûment dérivable, le dirac admet alors des dérivées. Au sens mathématique des distributions, l'impulsion de Dirac est nulle partout sauf en zéro où sa surface vaut l'unité, elle est représentée par une flèche d'amplitude 1.

La réponse d'un système à une impulsion de Dirac est nommée : réponse impulsionnelle, celle à un échelon unité : réponse indicielle. Pour un système linéaire, comme un filtre ou une ligne de transmission, ces deux réponses se déduisent l'une de l'autre par un calcul intégral-différentiel qui s'évalue graphiquement de façon aisée. Connaissant la réponse indicielle d'une ligne par la méthode de Bergeron, la réponse à une impulsionnelle à un dirac se déduit graphiquement.

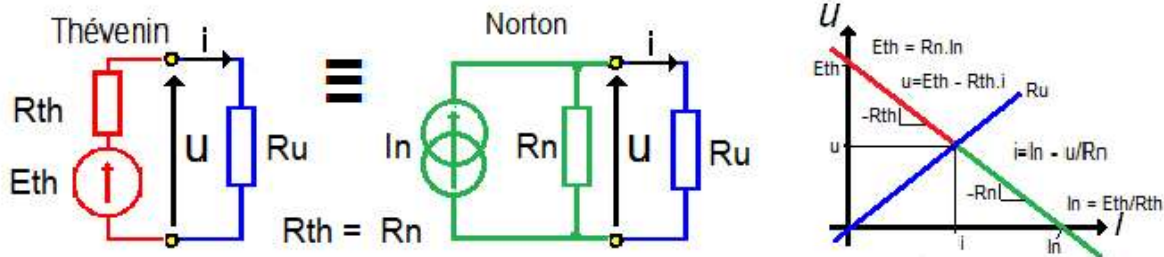


Avant d'entreprendre l'étude graphique, quelques rappels sur les circuits électriques sont peut-être nécessaires : la loi d'Ohm généralisée, les modèles de Thévenin et Norton et les puissances électriques mises en jeu.

2-1 La loi d'Ohm n'est pas à présenter, notez seulement notre convention des signes et l'orientation des flèches correspondant à $u = R.i$, c'est une convention purement française très peu utilisée dans le monde, même chez nos voisins francophones. Si on inverse le sens du courant ou de la tension, on doit introduire le signe négatif.

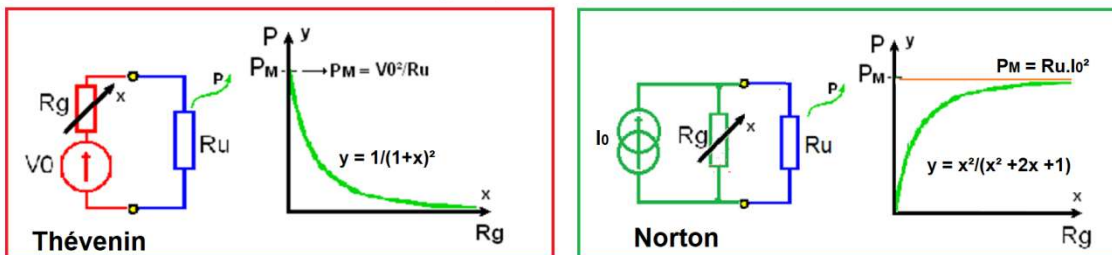


2-2 Théorème de Thévenin et de Norton :

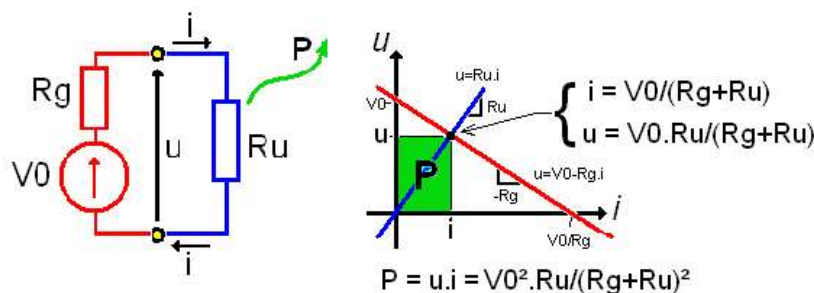


Ces deux modèles sont équivalents vus par le circuit connecté extérieur, c'est-à-dire vus de **Ru**, ils ne le sont pas pour le comportement intérieur comme par exemple dans le calcul des puissances internes à la source ou les rendements énergétiques. En effet si **Ru = 0**, **Rg** dissipe toute la puissance pour le modèle de Thévenin et aucune pour le modèle de Norton. Si maintenant, pour un générateur de Thévenin, **Rg** est variable et **Ru** fixe, la puissance sera à son maximum pour **Rg = 0**, pour un générateur de Norton, elle sera maximum pour **Rg = infini**.

Les modèles ne sont pas équivalents pour l'étude des puissances

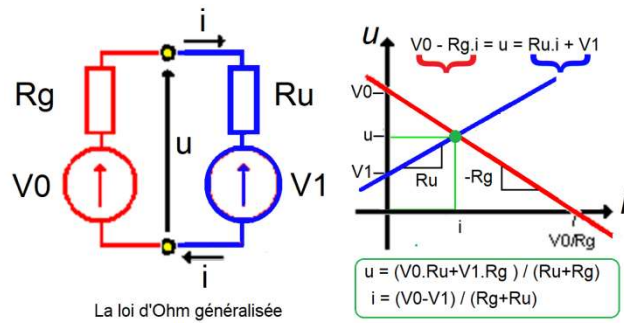


2-3 Résolution graphique de la loi d'Ohm: un repère (u,i) permet de résoudre graphiquement les lois électriques comme la loi d'Ohm généralisée, mais aussi les problèmes non-linéaires, il en sera de même de la méthode de Bergeron concernant les lignes en impulsion.

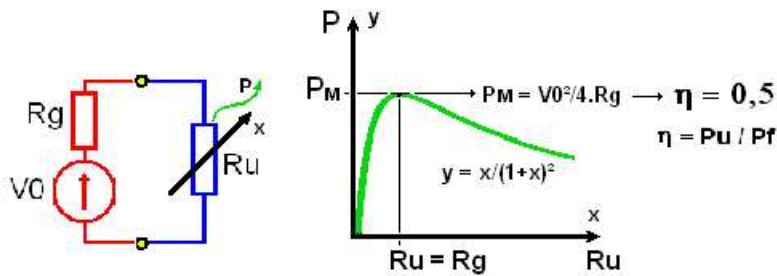


Un dipôle de force électromotrice **V0** et de résistance interne **Rg** fournit de l'énergie électrique à un dipôle récepteur **Ru**. La solution est trouvée graphiquement ou algébriquement. Le premier dipôle impose $u = V0 - Rg.i$ quelque soit la charge (droite rouge), le second impose $u = Ru.i$, quelque soit la source (droite bleue). La solution est l'intersection des deux droites $u = V0.Ru/(Rg+Ru)$, formule du diviseur potentiométrique.

2-4 La loi d'Ohm généralisée : La charge peut posséder une force électromotrice interne, elle est constituée d'une résistance **Ru** et de sa fem **V1** en série.



2-5 Puissance et rendement : La puissance dissipée dans **Ru** est donnée par la surface du rectangle vert, elle est fonction de **Ru** et de **Rg**. Si **Rg** est fixe, cette puissance passera par un maximum avec **Ru = Rg**, nous parlerons alors d'adaptation d'impédance. Il y a une ambiguïté largement entretenue dans la littérature technique dans l'emploi de ce terme dans le cas des lignes et des émetteurs.



Cette puissance maximum **P_M** est aussi appelée puissance disponible maximum **P_{DM}**.

Pour information et vous soumettre à quelques réflexions ou pour remettre en cause quelques certitudes : Nous voyons qu'à l'adaptation, le rendement est désastreux, il est de 50%. Avec l'adaptation, un émetteur de radio qui fournit 2kW, transmettrait 1 kW à l'antenne mais devrait dissiper 1kW en chaleur ce qui est inadmissible. L'adaptation d'un émetteur concerne l'impédance de la ligne (*feeder*) avec l'antenne, mais ne concerne surtout pas l'impédance de la charge vue par l'émetteur avec son impédance interne, sauf pour les générateurs de fonction, AF ou RF, où nous parlerons ici de pseudo-adaptation comme nous le verrons en régime impulsionnel. Pour ces générateurs petits signaux, le rendement importe peu, ce qui compte c'est de respecter la forme des signaux à l'extrémité du câble coaxial 50Ω de sortie, de ne pas les déformer en particulier pour les signaux rectangulaires et de ne pas affecter les amplitudes par des résonances de cette ligne de transmission en sinusoïdal, ceci est réalisé avec Rg=50Ω qui absorbe les ondes réfléchies, c'est la pseudo-adaptation.

2° : Concept de puissance incidente et réfléchi : c'est un concept artificiel qui ne correspond pas à un réel échange des puissances électriques. C'est une vue de l'esprit qui facilite la compréhension des ondes propagées et devient réelle si on interpose une ligne entre la source et la charge, il n'y a plus qu'à raccourcir la longueur de la ligne et la faire tendre vers zéro et cela reste vrai. Ce concept est aussi un premier pas vers la compréhension des paramètres d'onde **S** et l'emploi des coupleurs directifs que nous avons dans nos analyseurs vectoriels (VNA).

Tout se passe comme si le générateur transmettait une puissance incidente égale à sa puissance disponible maximum : **$P_i = P_{DM}$** , toute cette puissance ne sera pas encaissée par la charge, une partie est réfléchi : **$P_i = P + P_r$** avec **$P = V \cdot i$** , **$P_i = V_i \cdot I_i$** , **$P_r = V_r \cdot I_r$** .

Cas d'une charge non adaptée **$R_u < R_g$** : si la charge **R_u** n'est pas adaptée, une partie de la puissance reçue est absorbée et le reste est réfléchi.

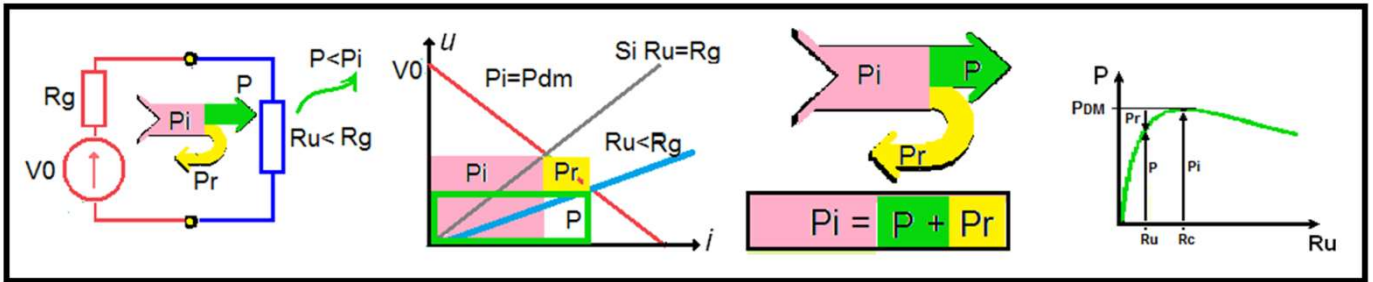


Figure 1 : Concept de puissance incidente et réfléchi

Vous pouvez démontrer facilement ces relations par les surfaces des rectangles (cours de géométrie du collège).

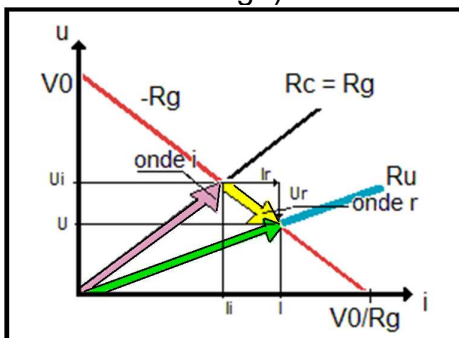


Figure 2 : vecteur onde incidente (U_i, I_i) et d'une onde réfléchi (U_r, I_r)

Graphiquement, il est plus avantageux de remplacer les rectangles par des vecteurs, nous disposons ainsi d'un vecteur onde incidente (U_i, I_i) et d'une onde réfléchi (U_r, I_r). La tension et le courant réels sont les sommes algébriques des grandeurs incidentes et réfléchiées. Nous sommes donc amenés à représenter les ondes (couple u, i) par des vecteurs, ce sera le concept des ondes mobiles vu plus loin. Ce concept devient quasiment tangible si vous disposez d'un coupleur directif prévu pour travailler en sinusoïdal dans une bande restreinte, il sera conçu pour une valeur R_c précise (par ex : 50Ω)

Méthode de Bergeron : des coups de bélier dans les conduites hydrauliques aux lignes de transmission.

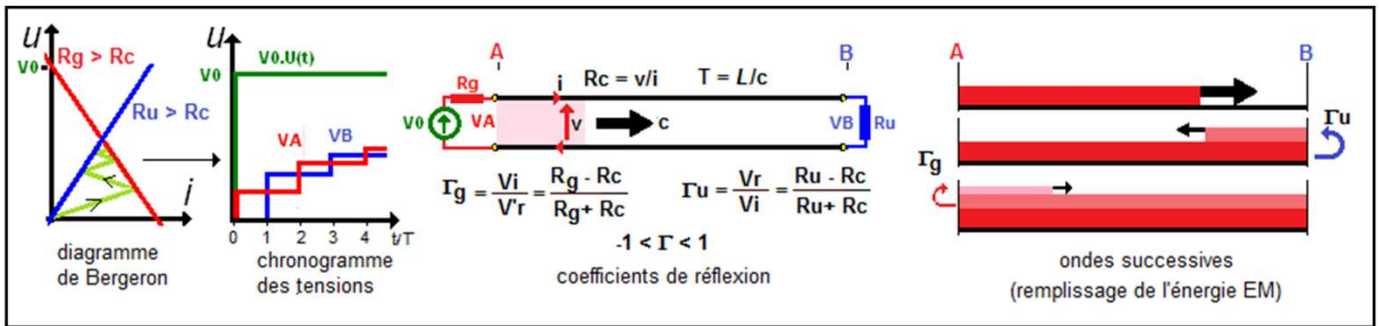


Figure 12 : Méthode de Bergeron des ondes mobiles

Pour l'étude des lignes en impulsion, nous utiliserons une résolution graphique très ingénieuse due à JP.Vabre (voir bibliographie), inspirée d'une méthode utilisée en hydraulique pour l'étude des coups de bélier dite méthode de Bergeron. Cette méthode fut reprise par Texas-instrument puis d'autres constructeurs de circuits intégrés, mais elle n'est pas nécessairement très connue, même parfois délaissée par le milieu universitaire car c'est une résolution essentiellement graphique du problème qui n'est donc pas analytique. C'est une méthode qui reste valable même si les extrémités source et charge ne sont pas linéaires comme les émetteurs de lignes ou les portes logiques, par contre, elle n'est pas utilisable avec les lignes dispersives ou les lignes à perte, son caractère didactique reste primordiale et fort. La méthode peut être étendue à l'étude des lignes couplées (diaphonie, coupleurs directifs), ce qui ne sera pas abordé ici.

La méthode de Bergeron utilise la réponse à un échelon de laquelle nous déduisons facilement la réponse à une impulsion de Dirac par dérivation temporelle des signaux. Le générateur d'impulsion pourrait être une batterie associée à un interrupteur parfait avec éventuellement une résistance **R_g** en série, l'ensemble capable de générer un échelon en tension. Dans la pratique un générateur d'impulsion ou de fonction de qualité permettra des mesures précises. Il existe aussi des petits montages appelés générateurs **TDR** facile à mettre en œuvre.

Nous appellerons ici **onde mobile**, un couple tension- courant (u,i) qui se déplace avec le front à la vitesse c . Cette onde peut se déplacer dans le sens aller (de **A** vers **B**) ou dans le sens retour (de **B** vers **A**). La ligne peut être le siège d'une multitude d'ondes qui vont se superposer, la tension et le courant en un point fixe (ce n'est plus une onde) est la superposition de toutes ces ondes qui passent en ce point, comme le milieu de propagation est linéaire cette superposition est additive.

La ligne est sans atténuation (sans pertes), elle mesure une longueur L , les ondes se déplacent à la vitesse c et mettent un temps $T = L/c$ pour la traverser. Cette ligne présente une résistance caractéristique R_c qui sera le rapport u/i de chaque onde mobile. Une onde , couple (u,i) mobile ne peut exister que dans ce rapport.

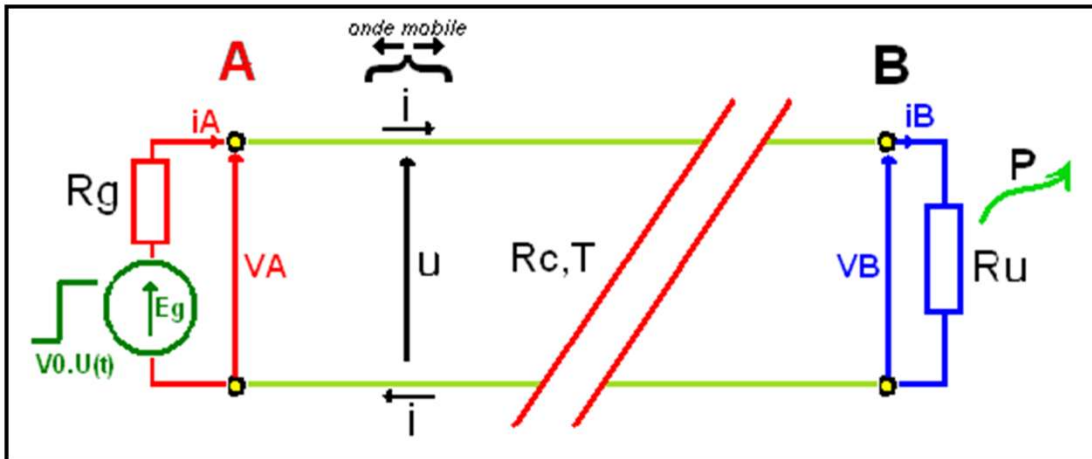
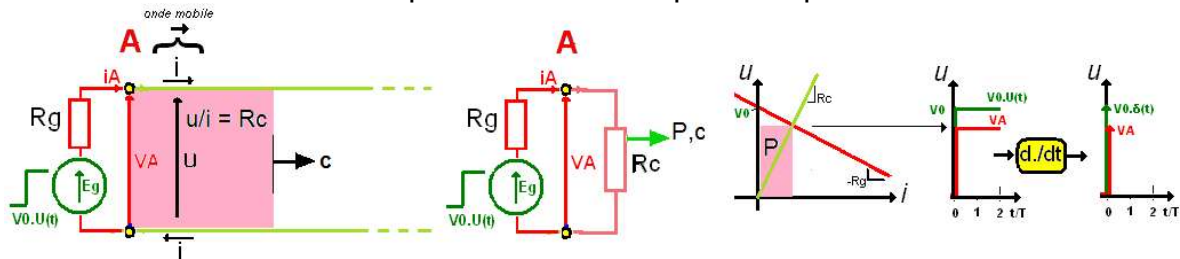


Figure 13 : Ondes mobiles (u,i)

On applique un échelon d'amplitude V_0 en **A**, l'énergie électromagnétique remplit progressivement la ligne, à l'instant T elle arrive en **B**, cette onde est totalement ou en partie absorbée par la charge R_u . S'il y a réflexion, une onde de retour va vers le générateur, elle sera en partie absorbée par R_g à l'instant $2T$. Une succession d'aller-retour se fait avant d'aboutir à l'équilibre statique. La ligne étant supposée sans pertes, elle ne peut pas absorber l'énergie.

Résolution graphique de la méthode de Bergeron : Ici, nous allons justifier pas à pas cette construction concernant les ondes mobiles. Comme nous sommes dans un repère (u,i) , ces ondes doivent se ramener graphiquement à des équivalents électriques d'impédances selon la loi d'Ohm généralisée.

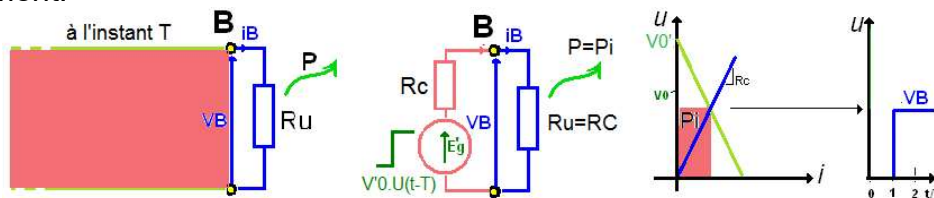
La première onde incidente vue de A de $t=0$ à $2.T$: Dans cet intervalle de temps, il n'y aura pas eu de réflexion, il n'y a qu'une seule onde aller, la ligne se comporte vis-à-vis de la source comme une résistance pure R_c , d'où la droite de la première onde mobile. Cette droite passe en zéro et donne à l'intersection de celle du générateur la tension et le courant vu de A de $t=0$ à $2.T$. Nous obtenons par projection l'allure et la valeur du signal en A pour un échelon de tension et par dérivation la réponse impulsionnelle à un dirac.



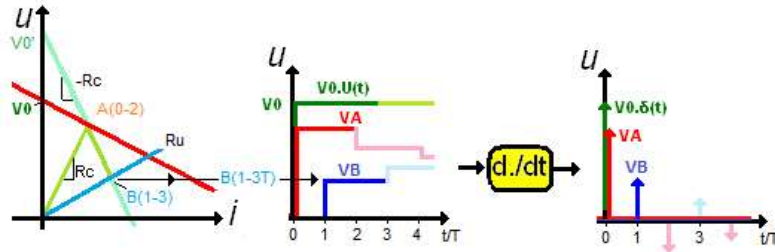
Cette résistance ne dissipe pas de la puissance, c'est en quelque sorte une résistance de rayonnement qui permet à cette énergie de se propager vers l'autre extrémité B. La puissance émise dans la ligne est donnée par la surface du rectangle comme précédemment, à l'instant T , arrivée à l'extrémité B, elle sera éventuellement dissipée ou en partie, le reste sera réfléchi. Cette puissance P incidente qui arrive sur la charge sera perçue comme la puissance disponible maximum P_{DM} , puisqu'il n'y a eu que cela d'émission sur la ligne, nous la nommerons puissance incidente P_i .

Construction de la deuxième onde mobile (en B, à partir de l'instant T à $3T$) :

L'énergie qui arrive en B à l'instant T est perçue par la charge comme un générateur de Thévenin E'_g avec une résistance série R_c , ce qui donnera la construction de la seconde onde mobile. Pour le justifier, nous commençons par choisir $R_u = R_c$: c'est l'adaptation, la puissance incidente est alors entièrement absorbée par R_u , il n'y aura pas de réflexion. Quand nous parlerons d'adaptation à une ligne ce sera toujours la charge d'extrémité R_u à la valeur de la résistance caractéristique de la ligne R_c . Si la puissance incidente P_i est entièrement absorbée P_{DM} par R_u , cela confirme que nous avons bien affaire à la puissance disponible maximum P_{DM} vue précédemment, c'est donc que R_u voit une source équivalente possédant une résistance interne de même valeur c'est-à-dire R_c . Pendant le transport de l'énergie, la ligne s'est comportée comme un transformateur d'impédance, d'où la droite de la deuxième onde mobile de pente négative $-R_c$ et ayant une certaine force électromotrice de Thévenin V_0' dont la valeur ne nous intéresse pas particulièrement.

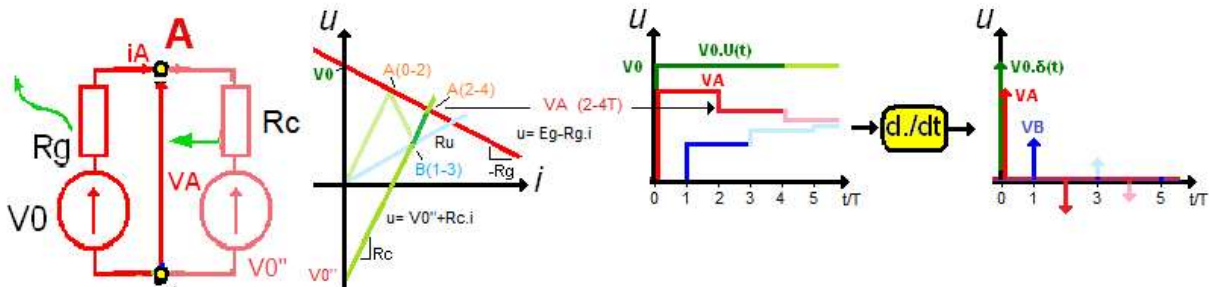


Si R_u est différent de R_c , toute la puissance incidente n'est pas absorbée, une partie est réfléchi et l'évaluation des signaux en B se fait graphiquement comme suit :



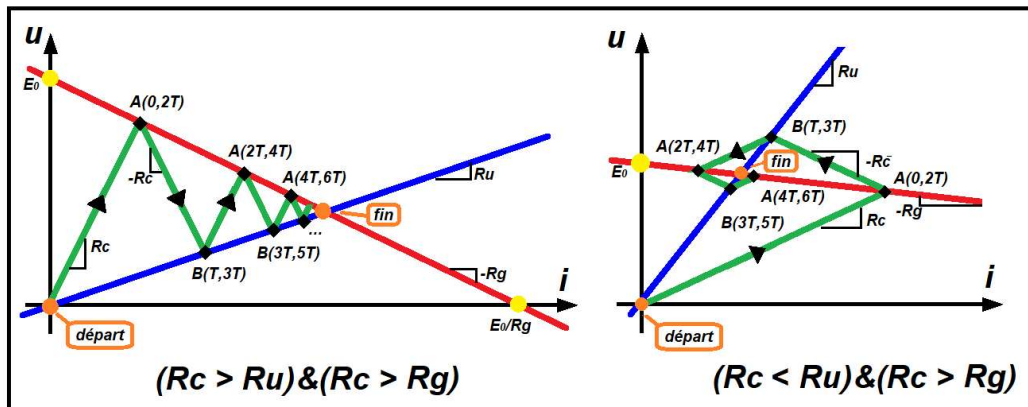
Construction de la troisième onde mobile (en A, à partir de l'instant 2T à 4T) : L'onde réfléchi précédemment arrive à la source à l'instant 2T, apportant de l'énergie, la ligne n'est plus perçue comme une résistance pure R_c passant en zéro, mais comme une droite de pente R_c passant en V_0'' dont la valeur ne nous intéresse pas particulièrement. L'évaluation des signaux se déduit graphiquement comme précédemment. Par la présence de R_g , les signaux en A diffèrent de la forme et de l'amplitude imposée par le générateur. R_g encaisse une partie de cette énergie réfléchi qui sera entièrement absorbée si $R_g = R_c$.

Les autres réflexions : si R_g est différent de R_c une deuxième réflexion dans le sens aller retourne sur la charge et se superpose aux tensions et courants déjà existant, la résolution suit toujours le même principe.



Sur les deux exemples de construction, la méthodologie est la suivante :

- on trace en premier les deux droites de charge avec les pentes $-R_g$ et R_u ,
- on définit le point de départ initial, ici en zéro,
- on définit le point final (point de fonctionnement sans la ligne),
- on recherche les différents rebonds par une succession de droite de pente $+R_c$ et $-R_c$,
- on retrouve toutes les valeurs de palier qui changent à des instants d'indice pair sur la droite de charge du générateur, en A
- on retrouve toutes les valeurs de palier qui changent à des instants d'indice impair sur la droite de la charge R_u , en B



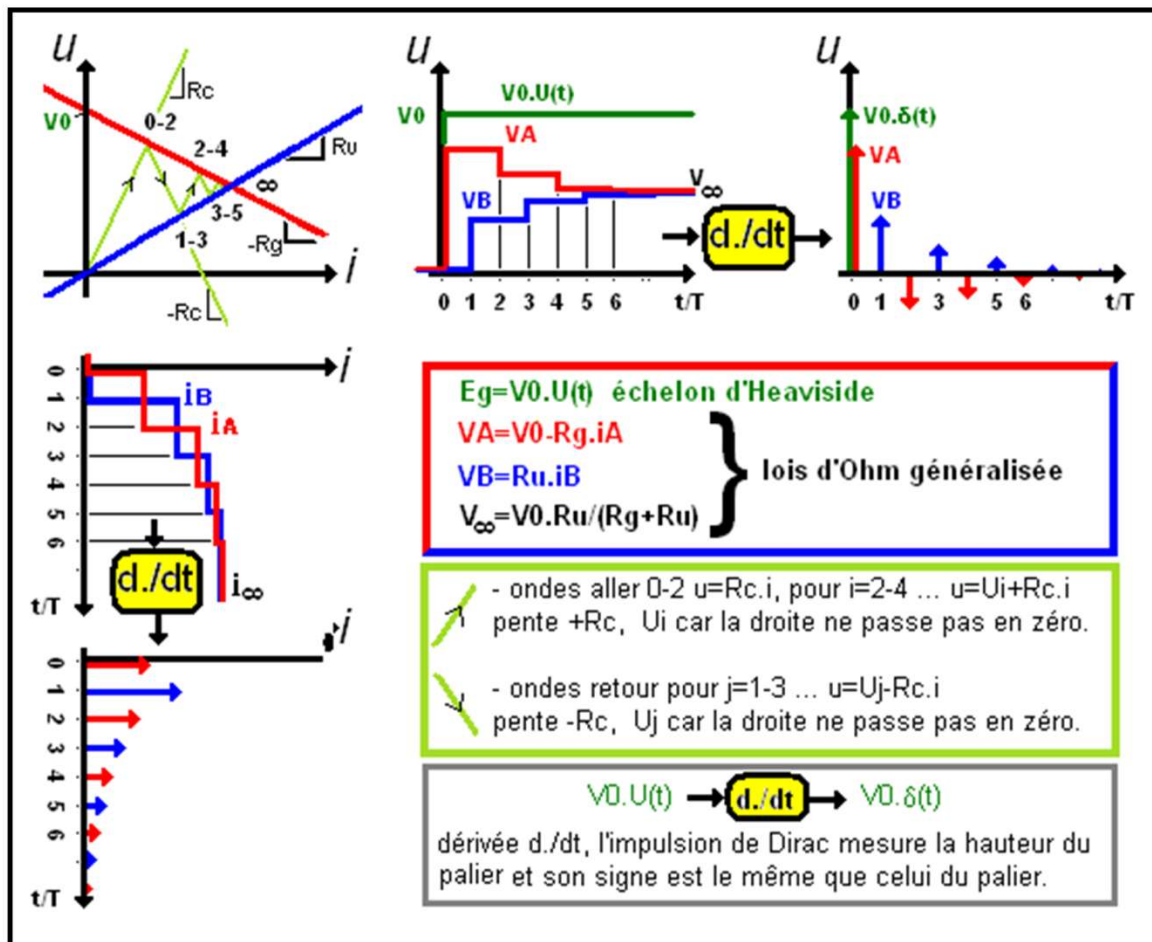


Figure 14 : Etude graphique par la méthode de Bergeron

La méthode de Bergeron consiste donc à représenter dans un repère (u, i) de la loi d'Ohm généralisée, la source (droite rouge), la charge (droite bleue) et une succession d'ondes mobiles de pente $+R_c$ et $-R_c$. Dans cette construction, les ondes mobiles seront transitoirement équivalentes à des charges ou à des sources et elles seront représentées comme des résistances de pentes $\pm R_c$ selon leur sens de parcours avec ou sans électromoteur. La tension en **A** évolue aux instants d'indice pair **0** à **2T** puis **4T**, etc., en la repérant sur la droite de la source (rouge), la tension en **B** évolue aux instants d'indice impair de **T** à **3T** puis **5T**, etc. En la repérant sur la droite de la charge. En reportant sur les axes des temps, nous retrouvons les chronogrammes en tension et en courant. En dérivant $(d./dt)$, nous trouvons les réponses à une impulsion de Dirac, celles qui seraient mesurées avec un TDR.

Etude des cas typiques

L'adaptation avec $R_u = R_c$ avec par exemple $R_g = 0$. Le signal émis se retrouve à l'extrémité avec un temps de retard T , il n'y a aucune réflexion. Graphiquement l'onde mobile aller se confond avec la charge R_u . Nous sommes dans le cas de l'adaptation avec le meilleur transfert de puissance.

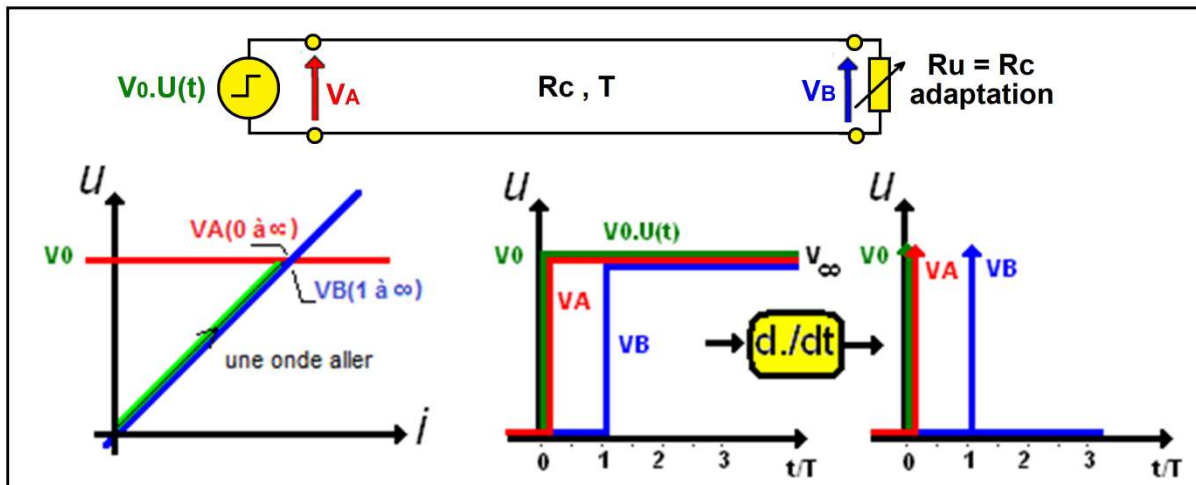


Figure 15 : Adaptation de la charge à la ligne de transmission $R_u = R_c$

Toute l'énergie est transmise à la charge, c'est l'adaptation d'impédance au sens des transmissions. La ligne se comporte comme une simple ligne à retard T et les signaux impulsionnels transmis par le générateur ne sont pas déformés quelque soit leur forme.

Si on désadapte en modifiant R_u , il y aura des réflexions successives et les signaux impulsionnels seront déformés par des transitoires indésirables. Pour ne pas avoir ce problème, c'est-à-dire ne pas déformer les impulsions quelque soit R_u , on procède à la pseudo-adaptation en choisissant $R_g = R_c$.

Si $R_g = R_c$, la forme des signaux du générateur est respectée à l'extrémité **B**, l'amplitude est plus petite, car il n'y aura pas eu de deuxième réflexion, c'est ce qu'on peut appeler **la pseudo-adaptation**. Les générateurs de fonction ou de petits signaux possèdent une résistance $R_g = 50\Omega$ pour cette raison car nous travaillons avec des lignes 50Ω ., il n'est pas alors question de transfert de puissance car celui-ci serait le meilleur pour $R_g = 0$. La pseudo adaptation avec $R_u < R_c$ et $R_g = R_c$. En **B** la forme de l'impulsion est respectée, elle est seulement atténuée à cause de R_g , alors qu'en **A** elle est déformée. En **A** nous observons deux impulsions de Dirac alors qu'il y en a eu qu'une d'émission, c'est l'effet de la réflexion, mais ce n'est pas grave pour l'utilisateur, ce qui compte c'est à l'extrémité de la ligne, en **B**.

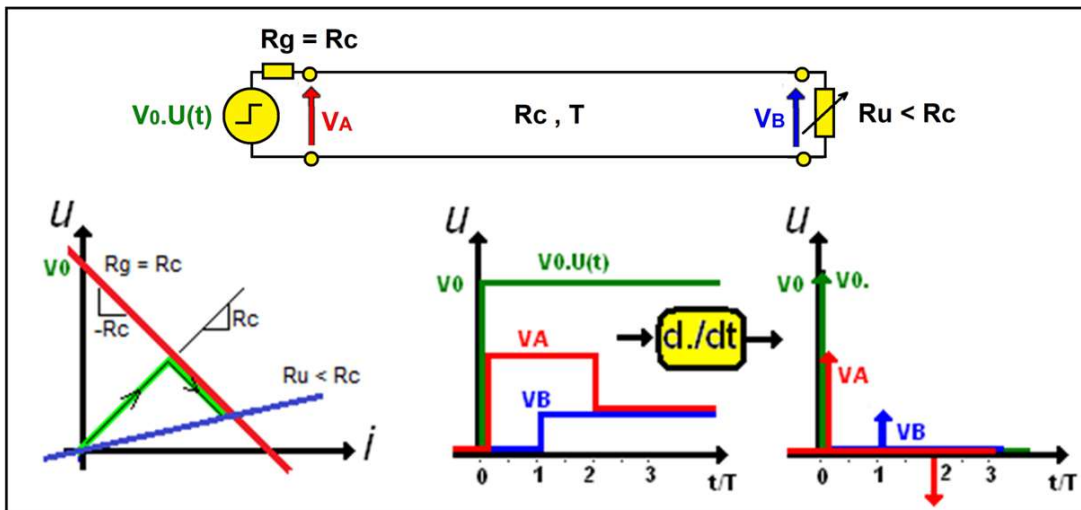


Figure 16 : pseudo-adaptation $R_g = R_c$ avec $R_u < R_c$

La pseudo adaptation avec $R_u > R_c$ et $R_g = R_c$. Nous pouvons observer un effet remarquable qui prouve que la ligne se comporte comme un transformateur, l'impulsion de Dirac qui arrive en **B** à l'instant **T** est plus grande que l'impulsion émise en **A** à l'instant zéro.

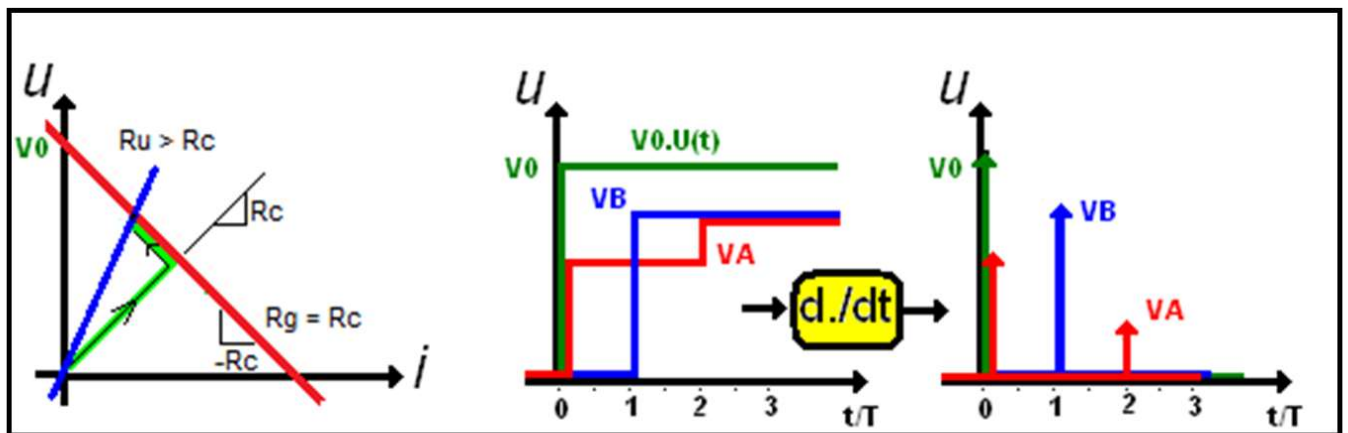


Figure 17 : pseudo-adaptation $R_g = R_c$ avec $R_u > R_c$

Avec un échelon, la tension est constante en **A** et oscillatrice en **B**. Aucun élément ne peut dissiper l'énergie de l'onde, elle est entretenue. En pratique l'oscillation s'amortit exponentiellement car la ligne n'est pas parfaite et possède des pertes, il faut entretenir l'oscillation avec un montage actif pour réaliser un oscillateur.

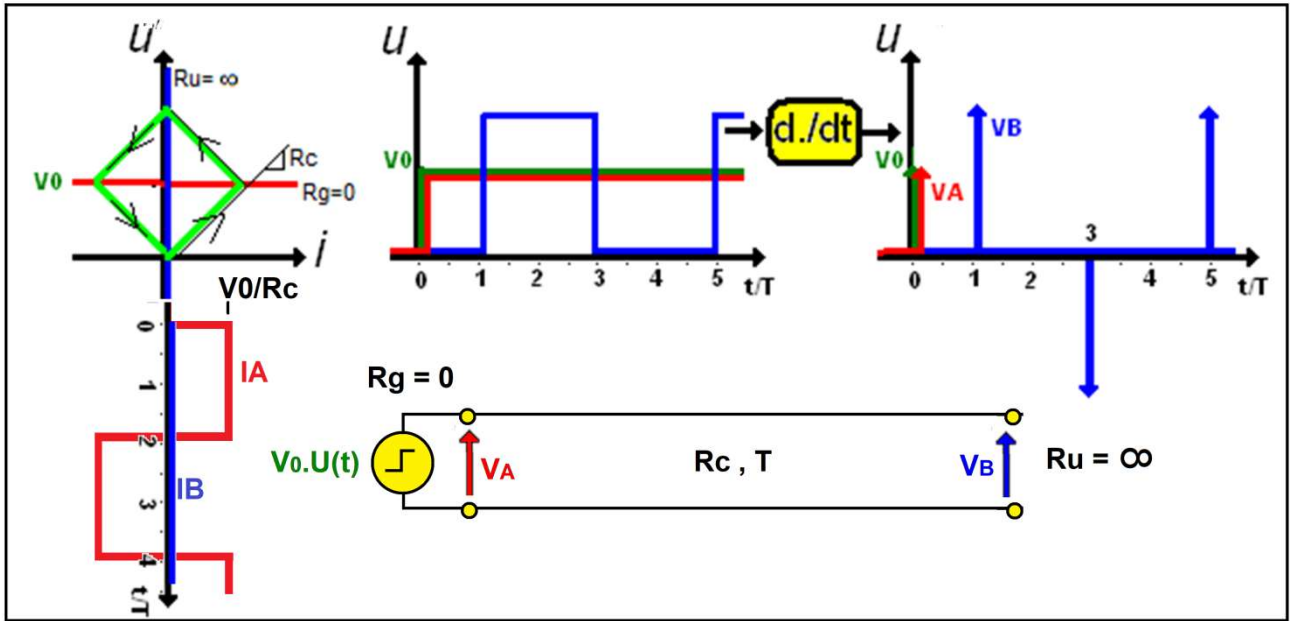


Figure 18 : oscillateur à ligne ouverte

Avec R_g infinie (source de courant parfaite) et R_u nulle, de même dans la pratique l'oscillation s'amortit.

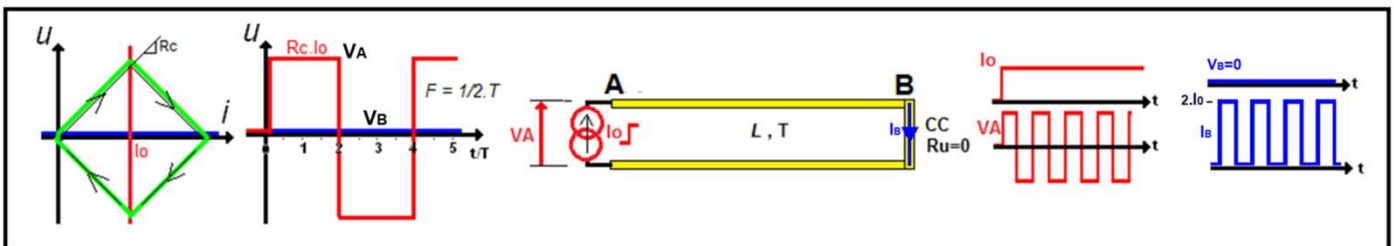


Figure 19 : oscillateur à ligne court-circuitée

Si R_g est faible et R_u très grand devant R_c , ce qui serait le cas d'une liaison numérique très mal calculée avec une source de tension à très basse impédance (genre transistor en collecteur commun) avec une charge élevée (genre transistor en collecteur commun). Pour une impulsion de Dirac émise, plusieurs sont reçues avant d'atteindre le niveau de seuillage.

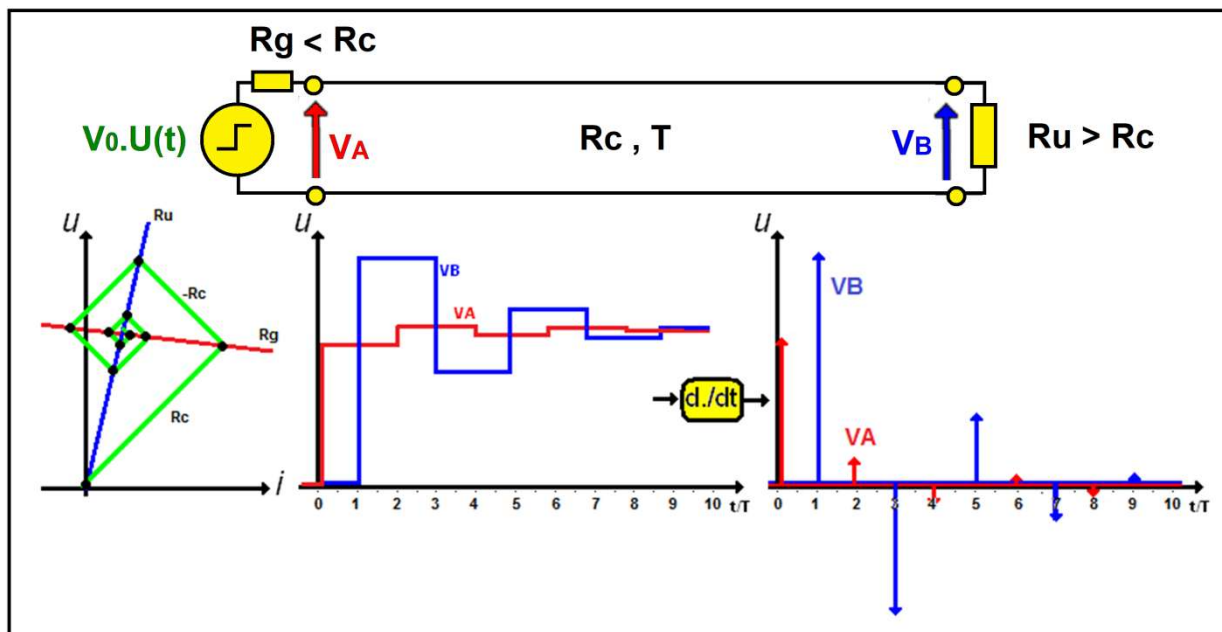


Figure 20 : régime oscillatoire amorti : $R_g < R_c$, $R_u > R_c$

Les récepteurs de ligne ont un seuil de décision, si le signal est inférieur à ce seuil, il est régénéré comme étant un niveau bas (0), s'il est supérieur, il est régénéré comme étant un niveau haut (1) et ceci avec éventuellement de l'hystérésis.

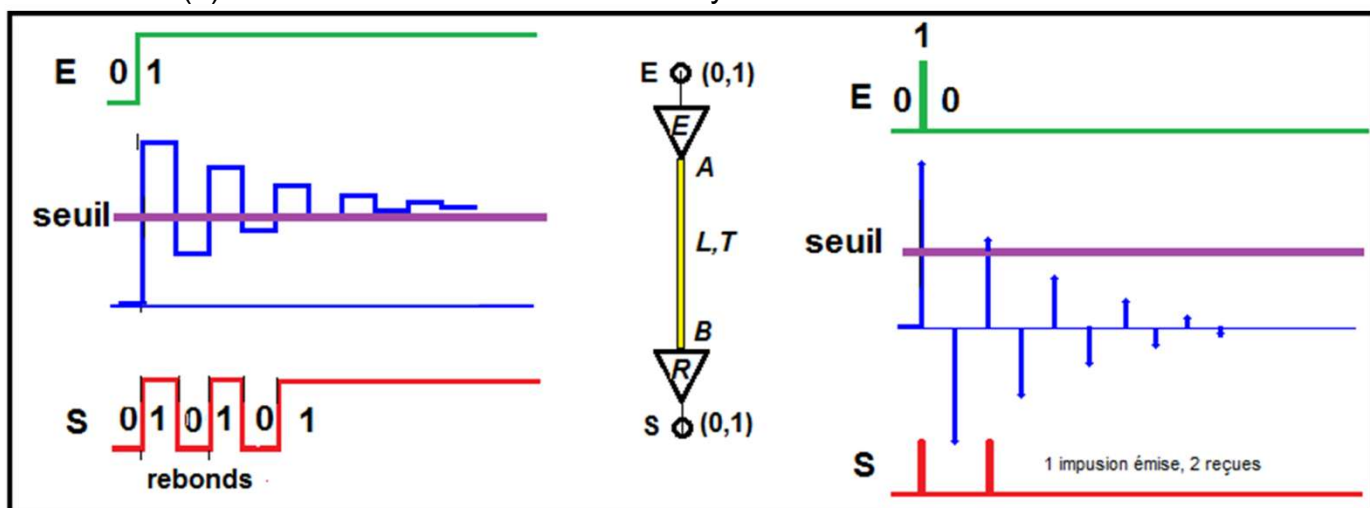


Figure 21 : erreurs de transmission: rebonds, comptage

Si R_g est faible et R_u très petit devant R_c : avec un échelon il faut parfois attendre plusieurs aller-retours avant d'attendre le niveau de seuillage pour avoir l'information, avec des impulsions de Dirac le seuillage n'est jamais atteint. Ce qui veut dire que dans une liaison numérique la ligne passera des faibles débits et ne passera pas un débit élevé.

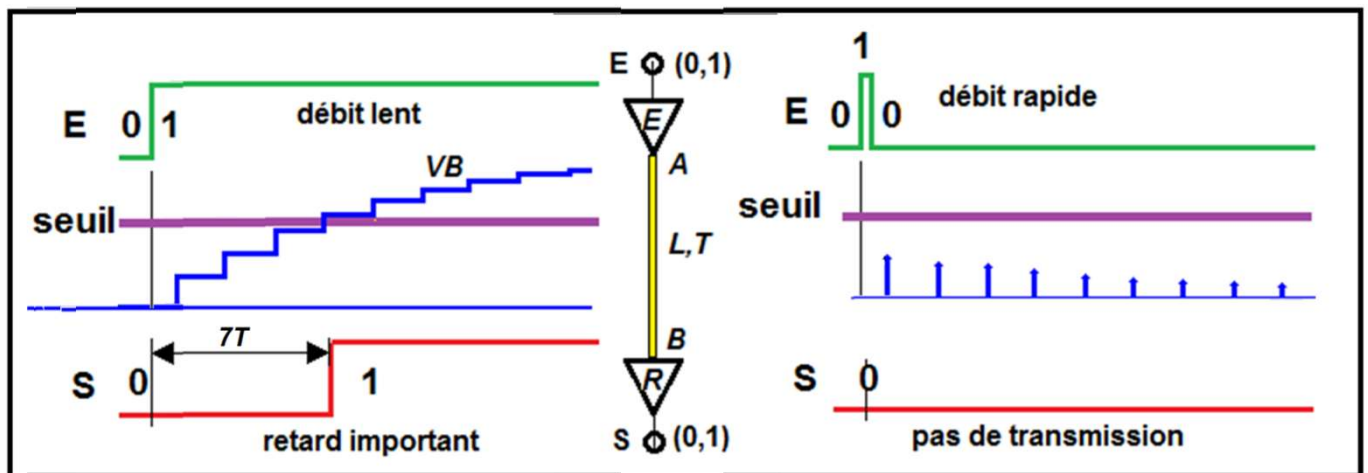


Figure 23 : erreurs de transmission: retard important et vitesse limitée

En diminuant encore $R_g = 0$ et R_u tendant vers le court-circuit, l'intersection se fera à l'infini, en pratique à un courant très fort qui montera graduellement par paliers de $2V_0/R_c$ de durée $2T$.

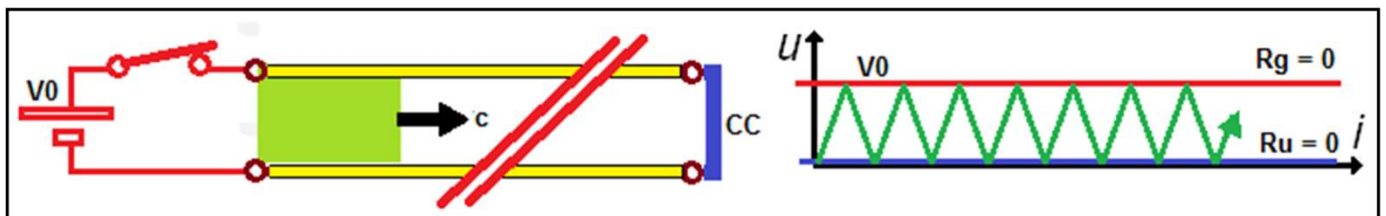


Figure 24: établissement du courant avec un court-circuit en bout de ligne

La méthode de Bergeron est utilisable avec des fonctions électroniques non linéaires, comme les portes logiques ou les émetteurs de ligne. L'exemple suivant traite d'une interconnexion en technologie TTL-AS, à partir du schéma à transistor, il est assez aisé pour un électronicien d'élaborer le schéma équivalent selon les états logiques de ces portes ou d'effectuer un relevé de courbe : $u = f(i)$.

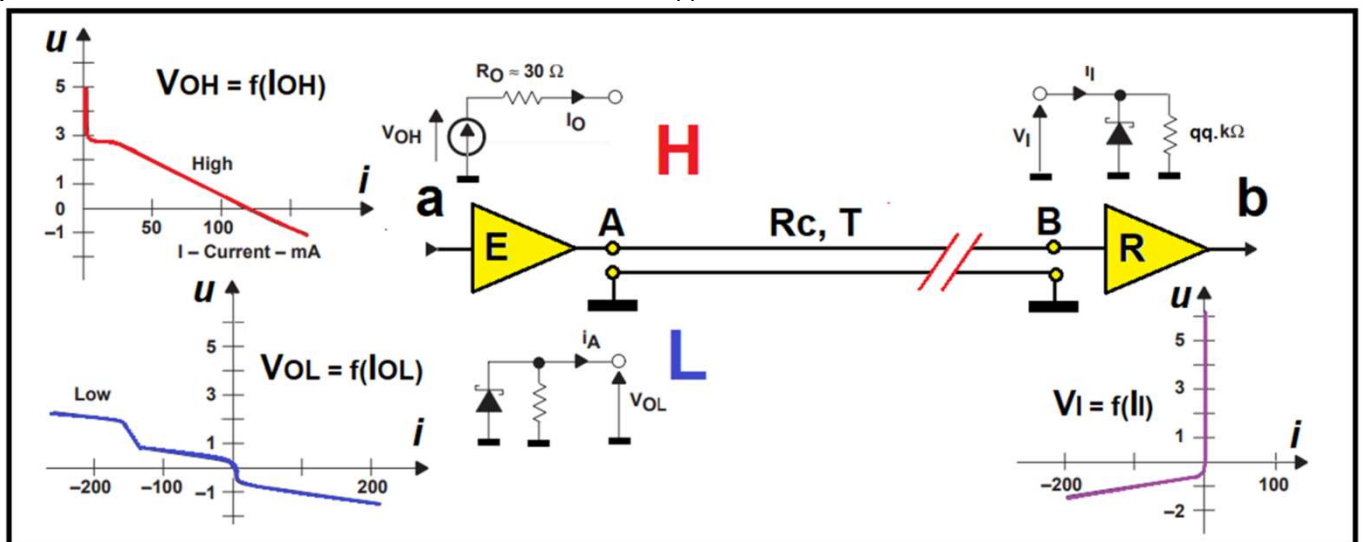


Figure 25 : interconnexion en technologie TTL-AS

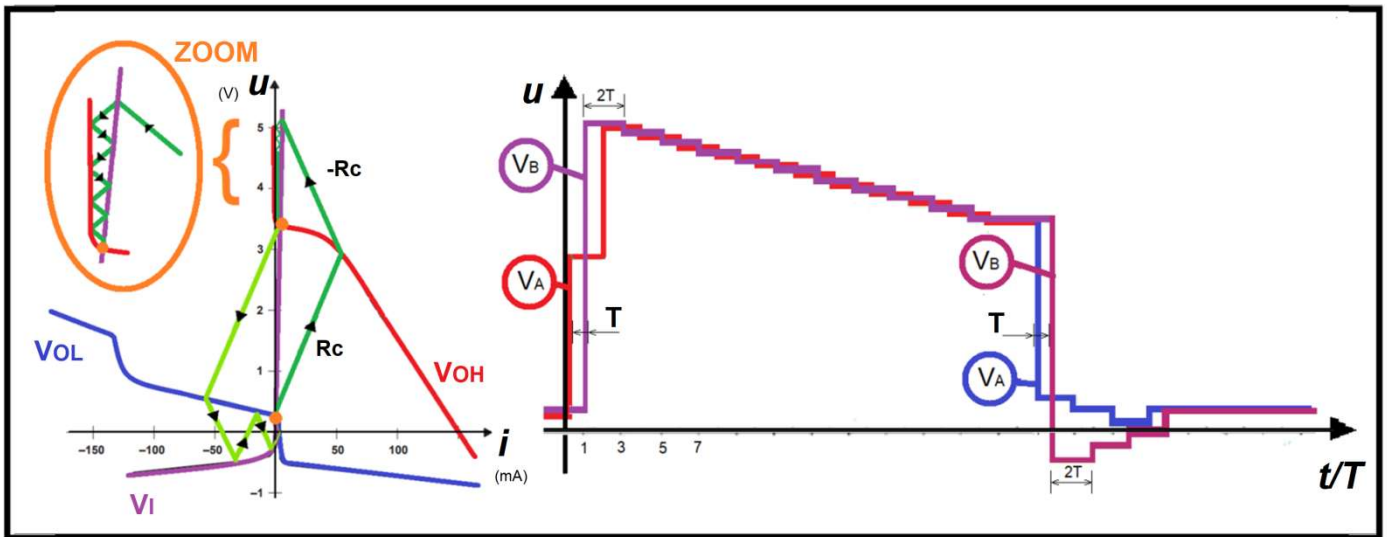


Figure 26 : construction de Bergeron en technologie TTL-AS

La méthode de Bergeron permet, pour les concepteurs d'élaborer des circuits d'électronique rapide, en adaptant les lignes en agissant sur la largeur des pistes ou par des résistances additionnelles aux extrémités ou bien en éliminant les rebonds avec des diodes par exemple.

La compréhension des mécanismes de transmission et de réflexion avec des impulsions les aléas causés fait partie des connaissances nécessaires en CEM, les diaphonies inductives ou capacitives relèvent des même phénomènes physiques.

Pour les essais sur les câbles, la méthode de Bergeron permet de comprendre et de prévoir les mesures du type TDR des analyseurs d'impédance, ces appareils permettent de localiser la distance et la nature des défauts sur une ligne de transmission.

Cette méthode permet de mieux comprendre les lignes en régime sinusoïdal car les phénomènes de réflexion sont plus distincts et séparables, ils ne se superposent pas uniformément.

Quelques éléments abordés ici permettent de mieux appréhender l'étude des paramètres diffusion (S) et l'emploi des analyseurs vectoriels (VNA).

