Propagation guidée

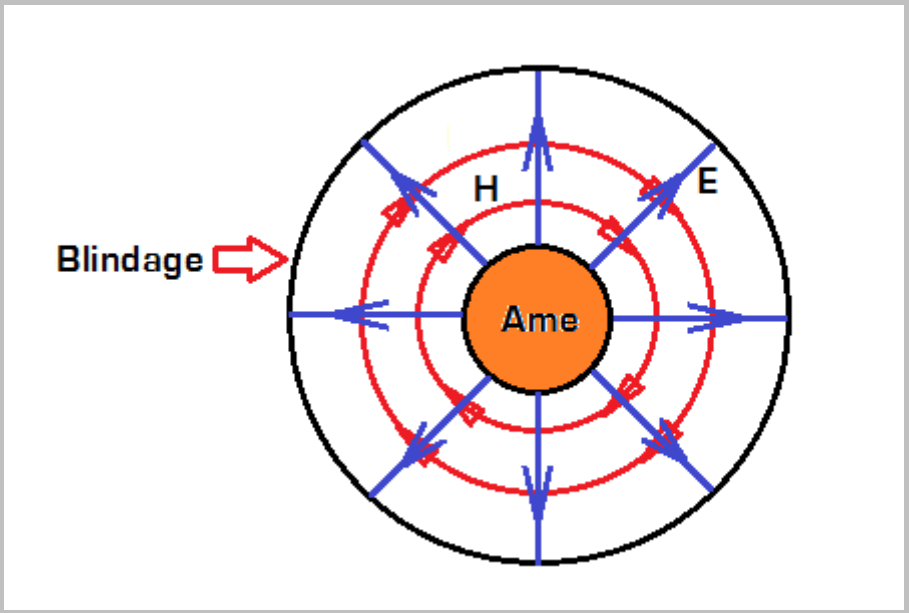
- Les différents types de lignes
- L'impédance caractéristique d'une ligne
- La propagation d'une impulsion dans une ligne
- La propagation d'une onde sinusoïdale
- Les ondes stationnaires

Une onde électromagnétique peut se propager suivant une ligne. Il s'agit alors d'une propagation guidée.

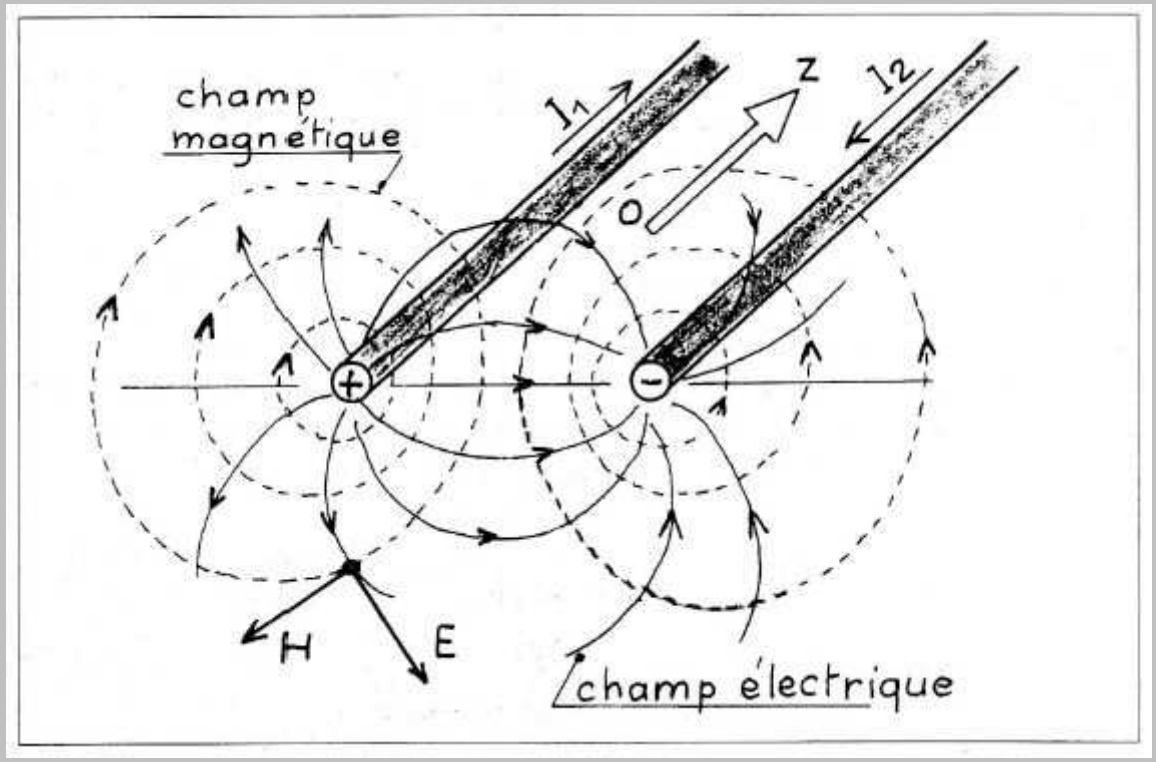
Les lignes permettent de transmettre un signal. Elles existent sous différentes formes, lignes bifilaires à fils parallèles ou torsadées avec ou sans blindage et lignes coaxiales.

Les radioamateurs utilisent des lignes pour effectuer la liaisons entre l'émetteur et l'antenne. Les lignes utilisées sont alors des câbles coaxiaux, des lignes bifilaires à fils parallèles et pour les ondes centimétriques des guides d'ondes.

Dans un câble coaxial les champs E et H sont confinés dans l'espace entre l’âme et le blindage.



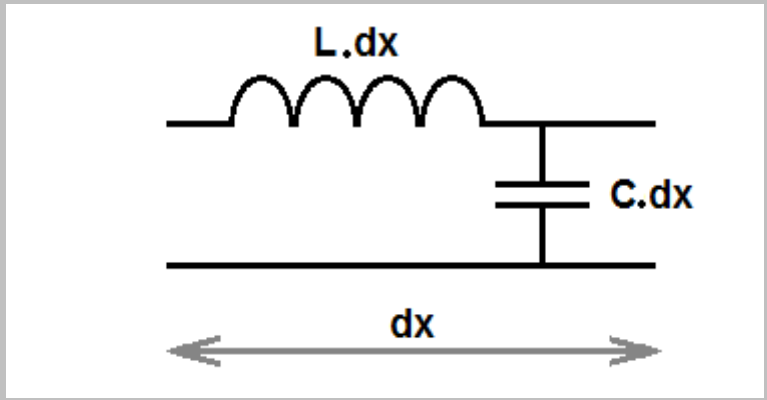
Dans une ligne à fils parallèles les lignes de champ débordent à l'extérieur de la ligne.



Les champs électromagnétiques créés par les courants dans chaque fil s'annulent puisque les courants sont de sens contraires.
La ligne à fils parallèles ne rayonne donc pratiquement pas d'énergie.

Impédance caractéristique d'une ligne

Un tronçon de ligne de faible longueur par rapport λ est équivalent au circuit électrique suivant



Ce modèle simplifié correspond à une ligne sans perte.

L.dx est l'inductance série du segment de ligne. L est exprimé en H/m

C.dx est la capacité parallèle. C exprimé en F/m

Une ligne peut être assimilée à une succession de circuits comme celui ci

On montre que son impédance caractéristique vaut $z_c = \sqrt{\frac{L}{C}}$

Et que la vitesse de propagation de l'onde est $v = \frac{1}{\sqrt{LC}}$

La vitesse de propagation d'une onde dans une ligne est toujours inférieure à la vitesse de la lumière.

Application numérique

Les caractéristiques d'un câble coaxial sont les suivantes :

L = 250 nH/m

C = 100 pF/m

Quelle est son impédance caractéristique ?

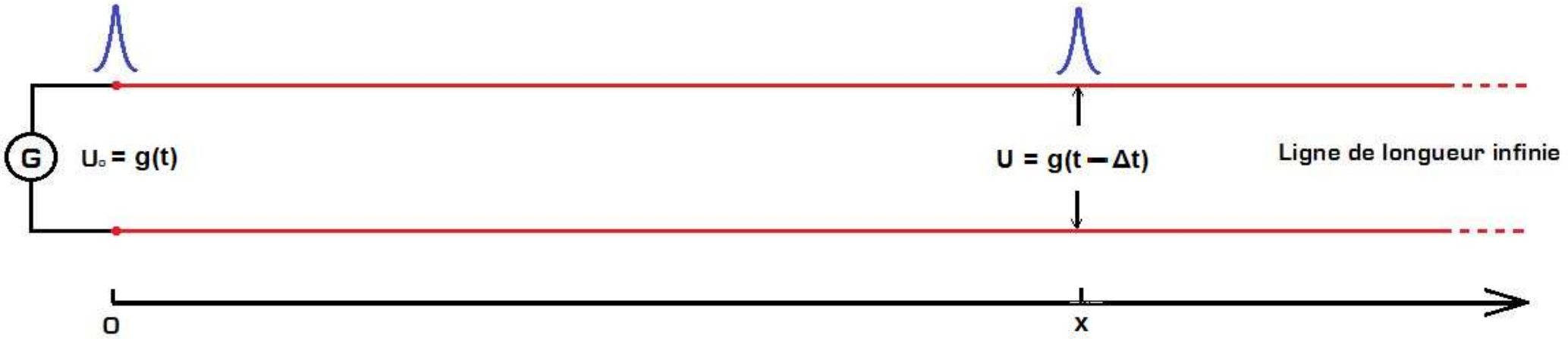
Zc = 50Ω

Quelle est la vitesse de propagation d'une onde dans ce câble ?

2.10^8 m/s

Propagation d'une impulsion sur une ligne

On applique une impulsion de tension U = g(t) à l'entrée d'une ligne de longueur infinie.



L'impulsion se propage dans la ligne à la vitesse V sans se déformer.
C'est une onde progressive.

En x on aura $U = g(t - \Delta t)$ avec $\Delta t = x / V$

D'où $U = g(t - x/v)$

Application numérique

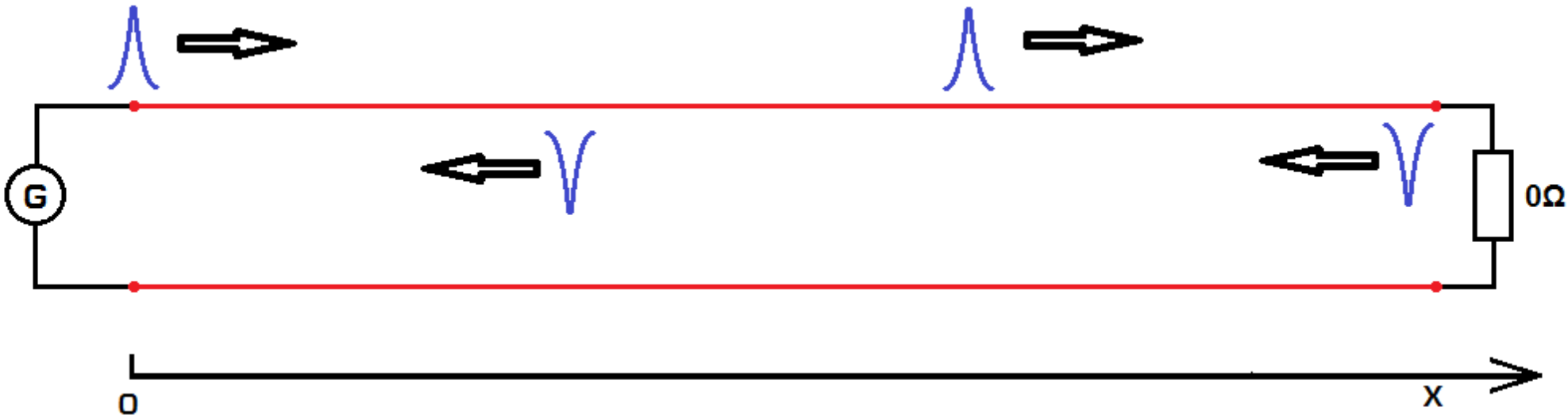
On applique avec un générateur une impulsion de 1nS à l'entrée d'une ligne coaxiale de 100m de longueur.
La vitesse de propagation de l'onde qui transporte cette impulsion est de 2.10^8 m/s.

Calculer avec quel retard cette impulsion arrivera à l'extrémité de la ligne.

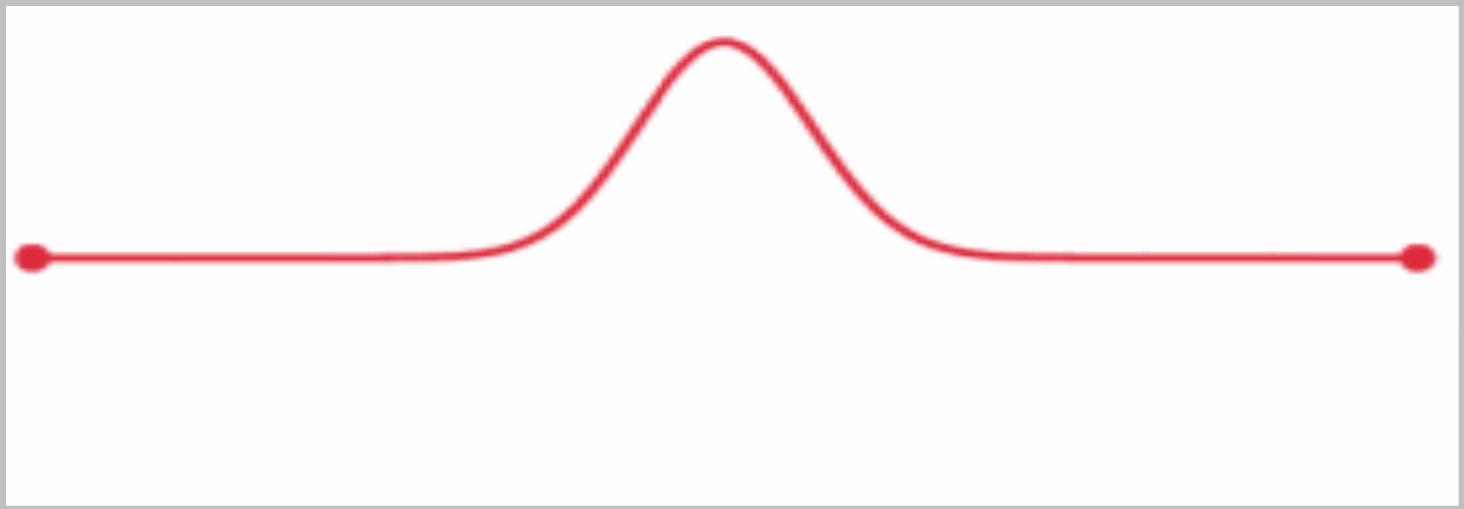
Δt = 500nS

Propagation d'une impulsion sur une ligne finie

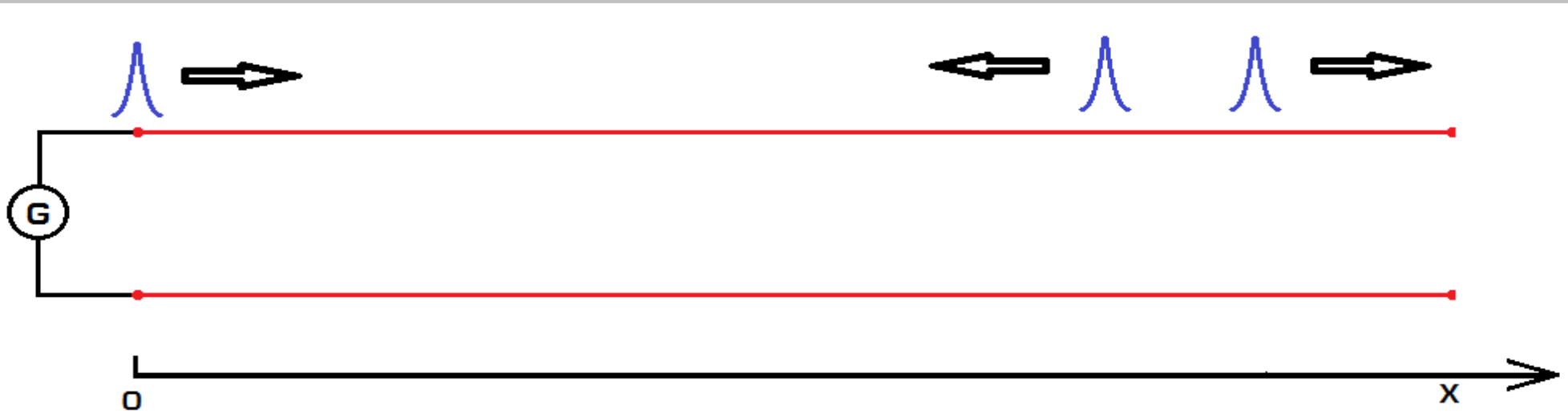
Ligne avec extrémité court circuitée.



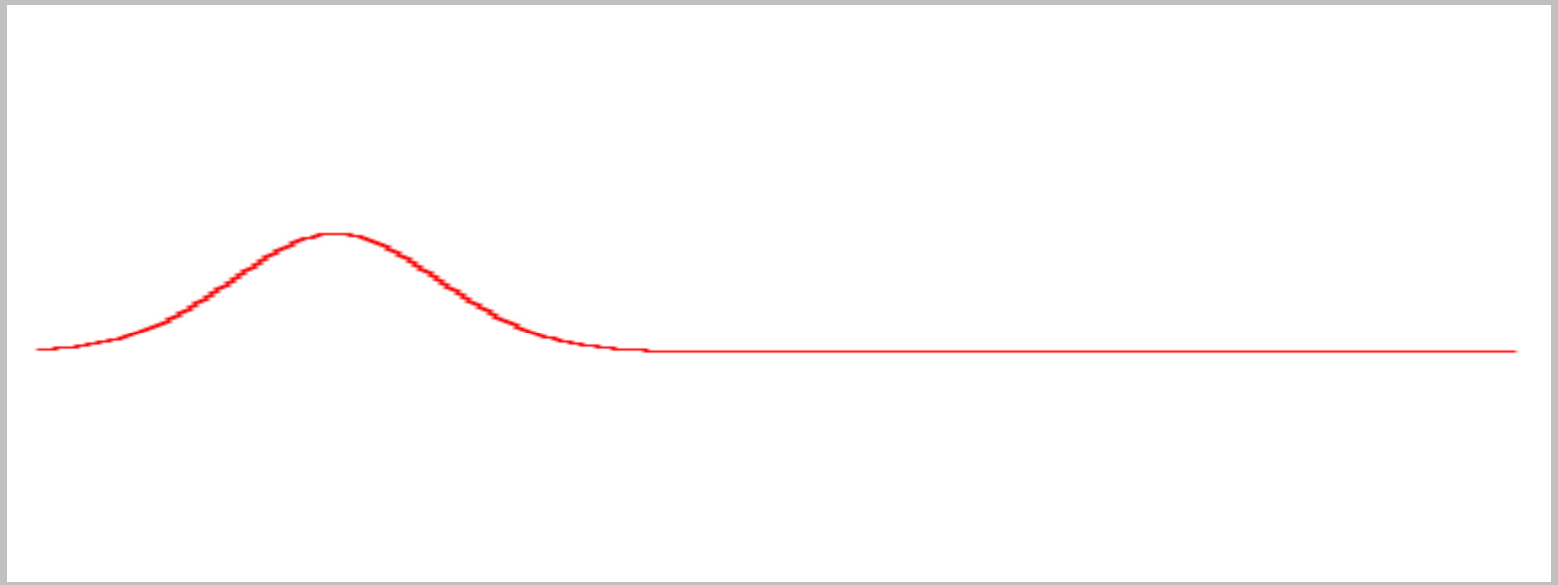
L'impulsion est totalement réfléchie avec un changement de signe



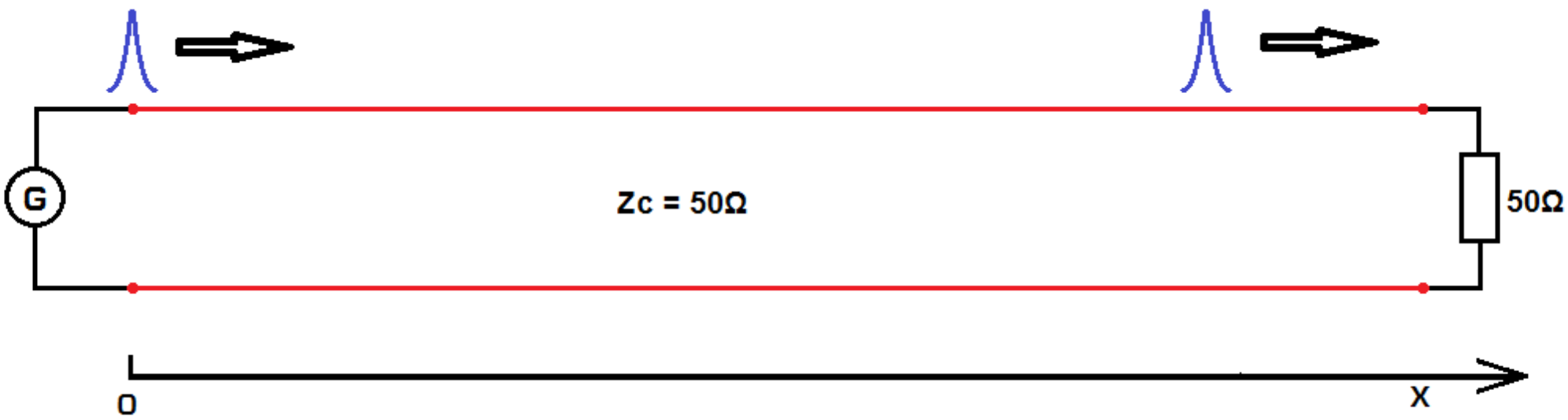
Ligne avec extrémité ouverte. R = ∞



L'impulsion est totalement réfléchie sans changement de signe.



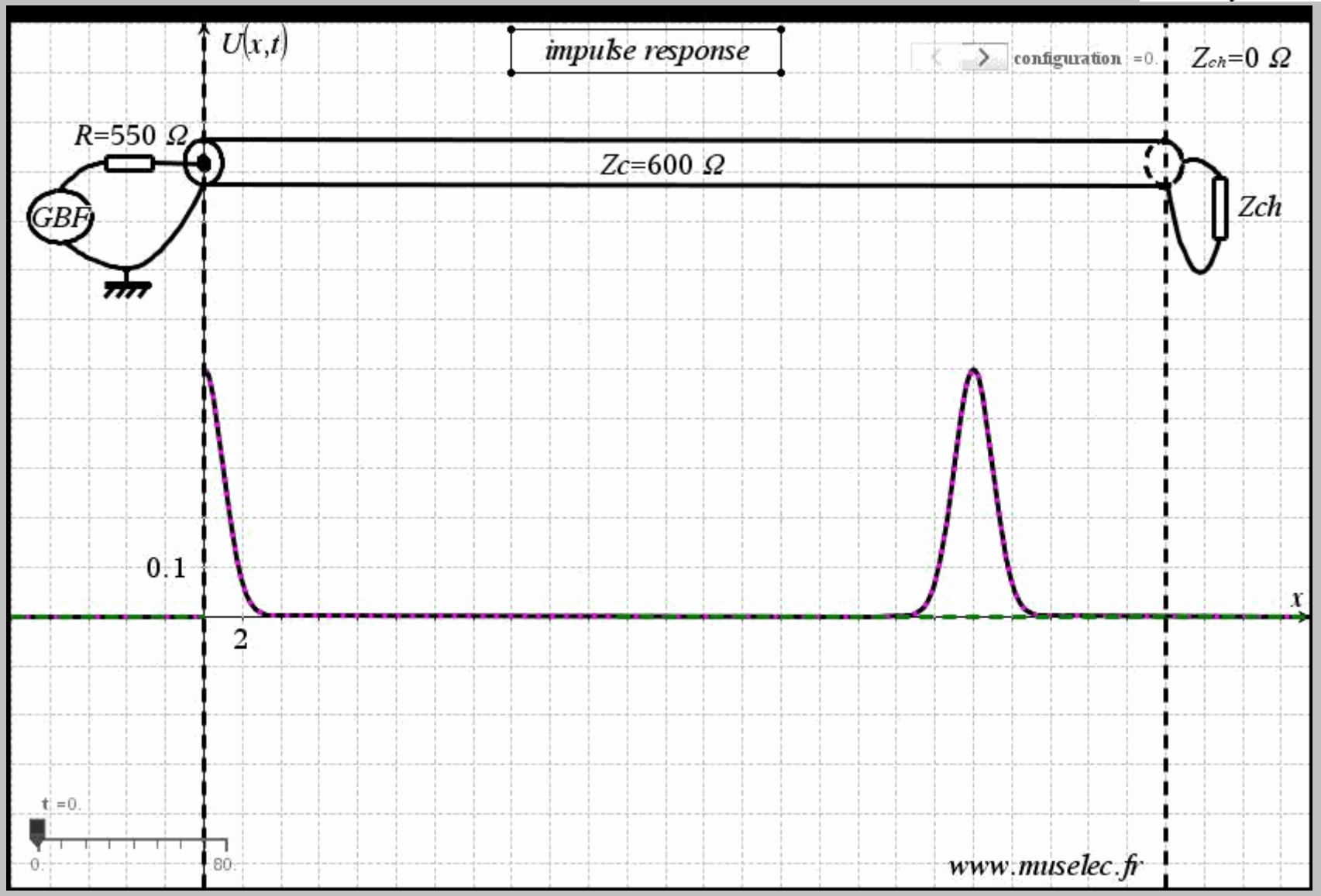
Ligne d'impédance caractéristique 50Ω avec résistance de 50Ω à l'extrémité.



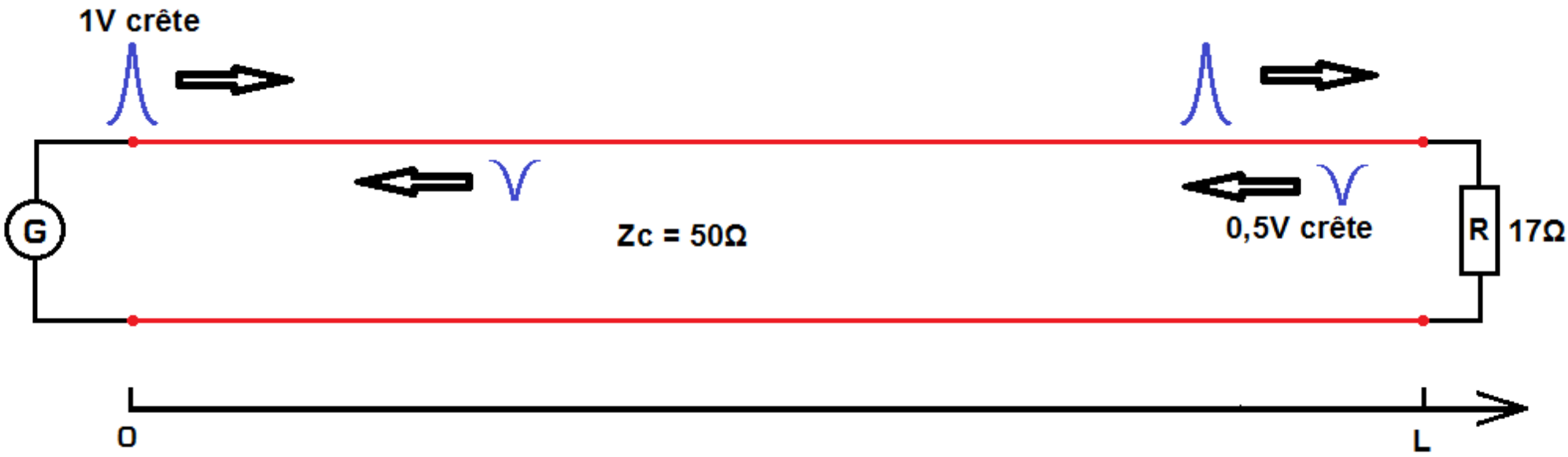
L'impulsion est totalement absorbée par la charge. Il n'y a pas de réflexion.

La ligne est adaptée. Elle se comporte comme une ligne infinie.

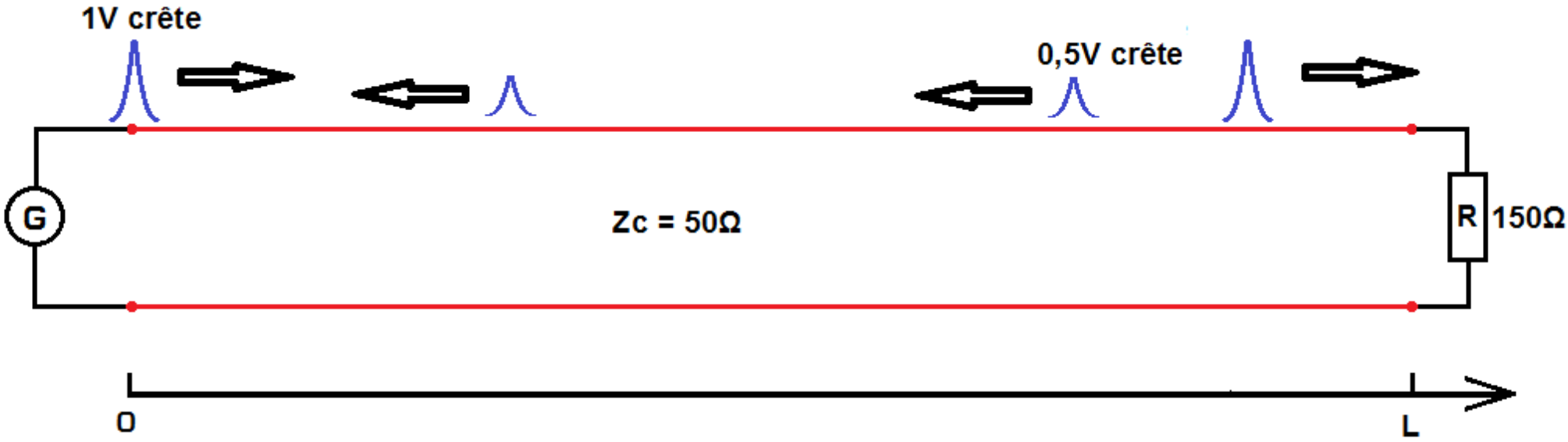
Dans les transmissions d'informations par ligne on s'efforcera d'adapter les impédances de la ligne et de la charge pour éviter les réflexions.


Impédance de charge
U(x,t)
impulse response
configuration =0.
Zch=0 Ω
R=550 Ω
Zc=600 Ω
GBF
Zch
0.1
x
2
t =0.
0.
80.
www.muselec.fr

Ligne d'impédance caractéristique de 50Ω avec charge terminale de 17Ω



Ligne d'impédance caractéristique de 50Ω avec charge terminale de 150Ω



Il n'y a pas de changement de signe de l'impulsion pour R ≥ Zc

En résumé il faut retenir que

1- Une ligne finie ouverte ou fermée réfléchit totalement le signal propagé par l'onde électromagnétique.

2- Sur une ligne terminée par son impédance caractéristique il n'y aucune réflexion.

3- Il y a une réflexion partielle si l'impédance en bout de la ligne n'est pas égale à l'impédance de la ligne.

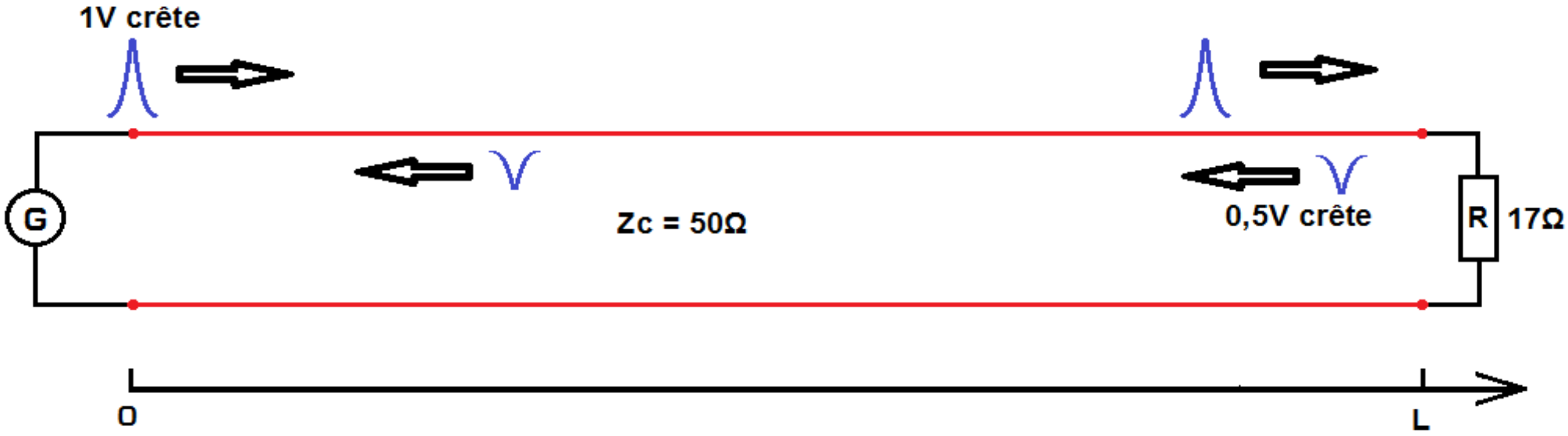
On définit un coefficient de réflexion gamma $\Gamma = \frac{V\,réf}{Vin}$

On démontre que $\Gamma = \frac{R - Zc}{R + Zc}$

Dans le cas de la ligne d'impédance 50Ω terminée par une résistance de 150Ω l'impulsion de départ était de 1V crête.
L'impulsion réfléchie était de 0,5V crête d'où Γ = 0,5.
On retrouve bien Γ = 0,5 en reportant les valeurs de R et Zc dans la seconde formule.

Les charges dans les exemples précédents étaient des résistances pures. En fait on a souvent des impédances comportant des inductances et des capacités. Le coefficient de réflexion est alors un nombre complexe.

Application numérique

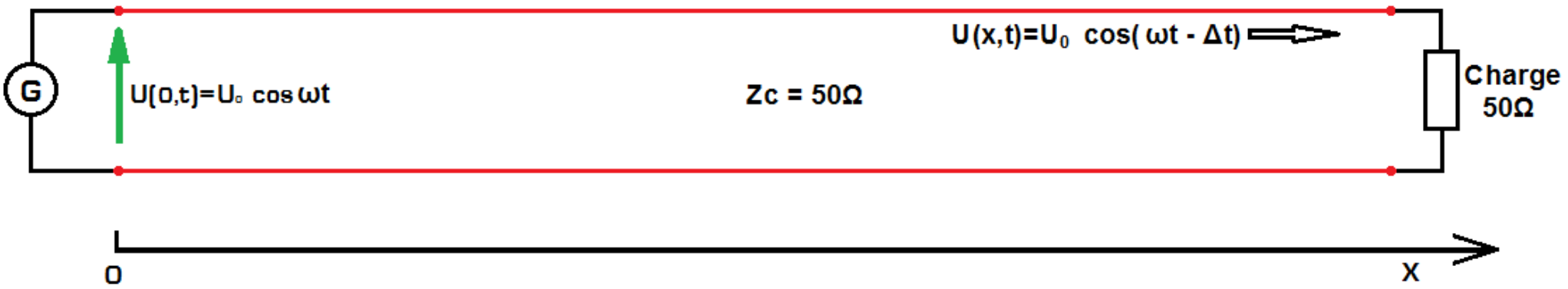


L'impédance caractéristique de la ligne est 50Ω.
Une mesure précise de l'impédance de charge marquée 17Ω donne une valeur réelle de 16,66Ω.
Calculer le coefficient de réflexion Γ à l'aide de la formule.

Γ = - 0,5

Cas d'une onde sinusoïdale

On applique à l'entrée de la ligne adaptée à la charge une tension $U(t) = U0 \cos \omega t$ avec $\omega = 2\pi F$.



La ligne est adaptée à la charge. Il n'y aura pas d'onde réfléchie.
Il s'agit d'une onde progressive.

En x l'onde a un retard $\Delta t = x / v$

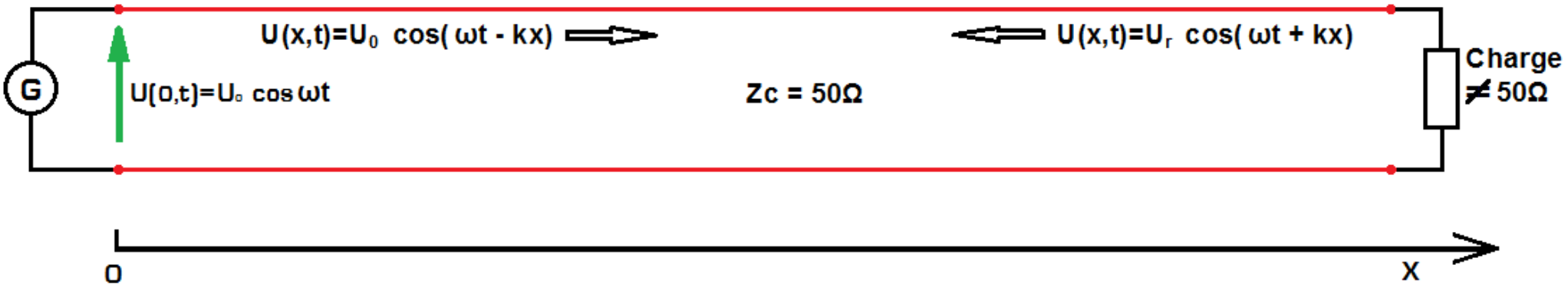
d'où $U(x,t) = U_0 \cos \omega(t - \Delta t) = U_0 \cos(\omega t - \omega x/v) = U_0 \cos(\omega t - (2\pi/\lambda)x)$

On pose $k = 2\pi/\lambda$

$$U(x,t) = U_0 \cos(\omega t - kx)$$

kx est le déphasage entre U en x et U à l'origine.

Cas d'une ligne désadaptée



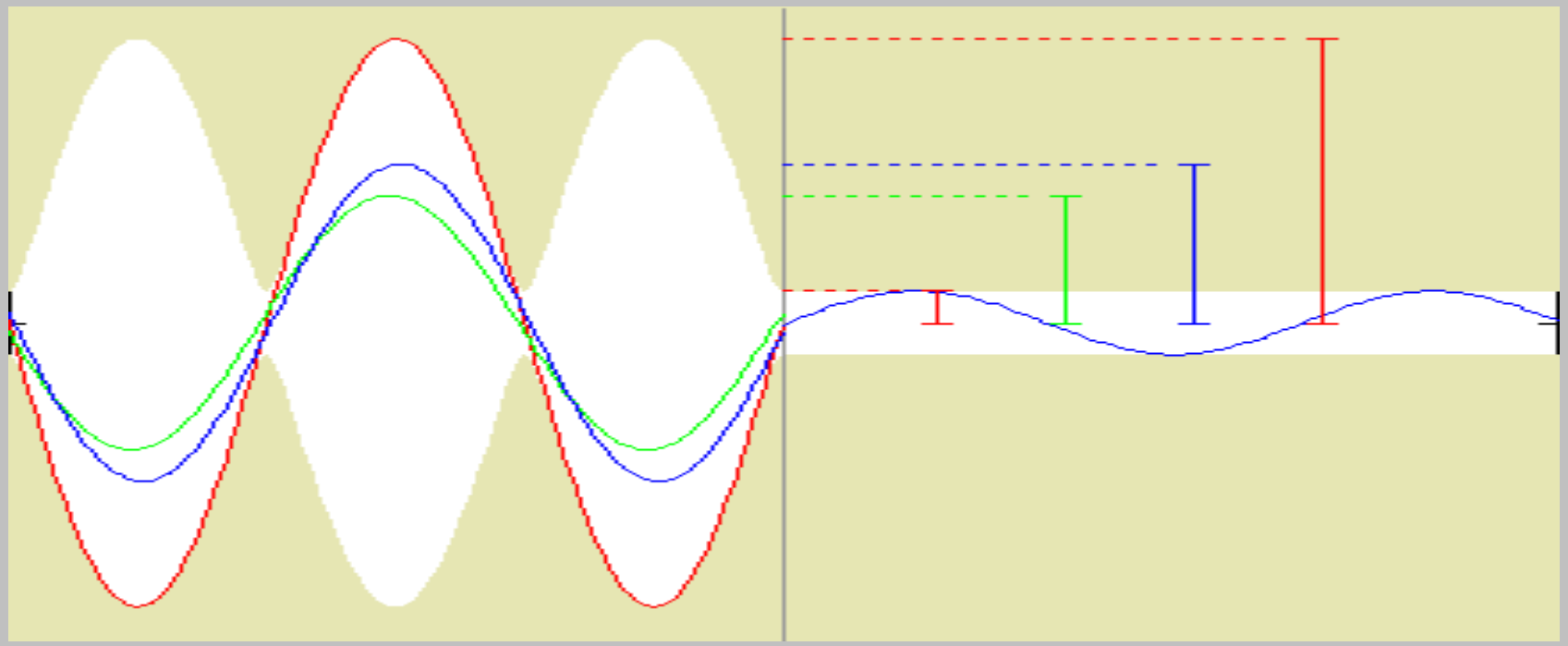
L'onde incidente $U(x,t) = U_0 \cos(\omega t - kx)$ se propage vers la charge.

La désadaptation de la charge provoque une onde réfléchie $U(x,t) = U_r \cos(\omega t + kx)$ se propageant vers le générateur.

La superposition de ces deux ondes de même fréquence produit une onde stationnaire $U = U_0 \cos(\omega t - kx) + U_r \cos(\omega t + kx)$.

Ondes stationnaires avec Γ = Vr /Vi = - 0,8

Onde incidente avant la charge $U_0(x,t) = \cos(\omega t - kx)$
Onde réfléchie $U_r(x,t) = - 0,8 \cos(\omega t + kx)$
L'onde stationnaire vaut $U = \cos(\omega t - kx) - 0,8 \cos(\omega t + kx)$
En développant on trouve que l'amplitude crête (ventre de tension) de l'onde stationnaire vaut 1,8V et son minimum (nœud de tension) vaut 0,2V



Après la charge l'amplitude de l'onde incidente = 0,2V

Remarque

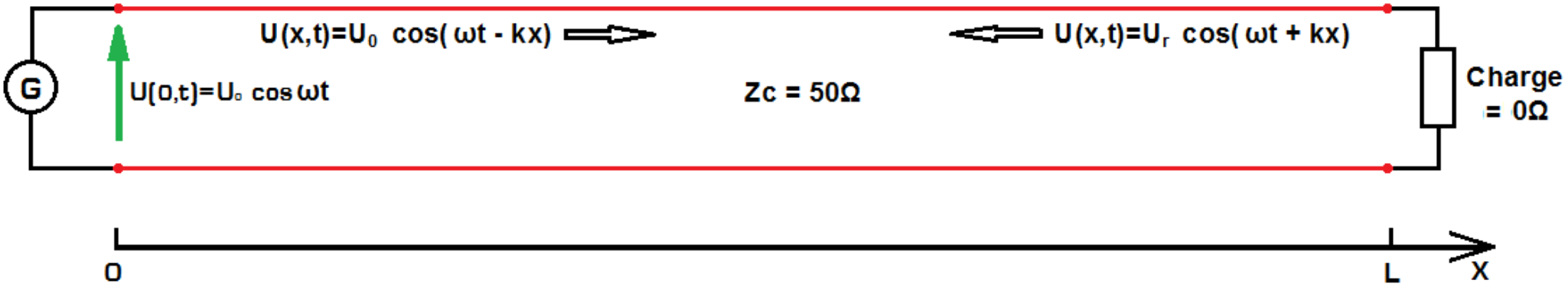
Les radioamateurs utilisent le ROS (Rapport d'Onde Stationnaire) pour mesurer l'adaptation de leurs lignes de transmission.

Le ROS est le rapport entre les Umax et Umin dans la partie positive de l'enveloppe de l'onde stationnaire.

On montre que $ROS = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|}$

Dans l 'exemple précédent on avait un coefficient de réflexion de -0,8
En le reportant dans la formule on obtient un ROS de 9.
On avait Umax = 1,8V et Umin = 0,2. On retrouve bien un ROS de 9.

Ondes stationnaires d'une ligne en court circuit



On a une réflexion totale de l'onde incidente avec un changement de signe. (Ur = - U_0). Les 2 ondes vont interférer et produire une onde stationnaire.

L'onde stationnaire Us est égale à $U_0 \cos(\omega t - kx) - U_0 \cos(\omega t + kx)$

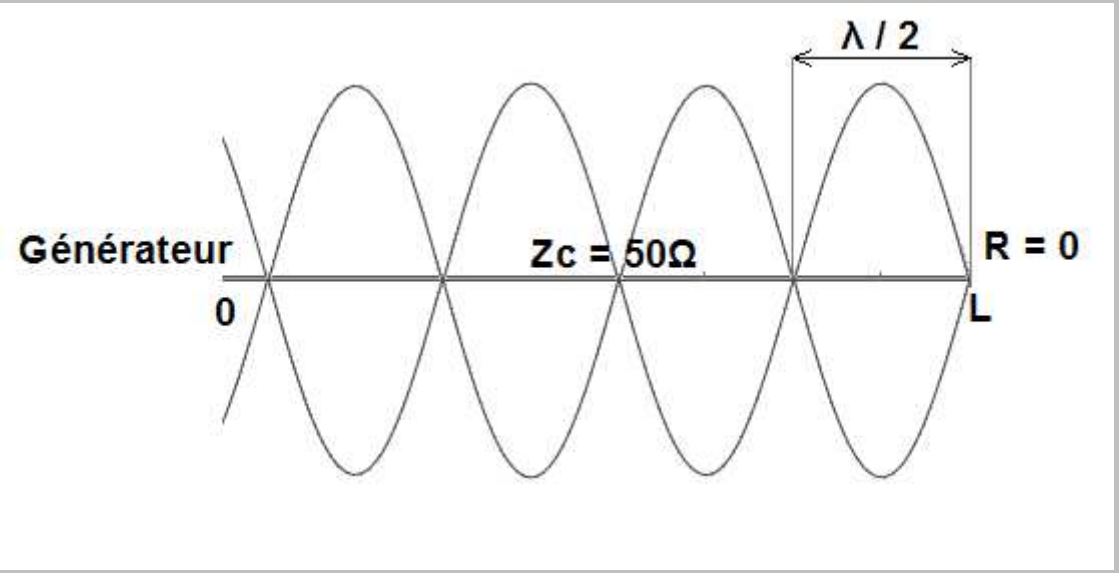
$Us = U_0 (\cos\omega t \cos kx + \sin\omega t \sin kx) - U_0 (\cos\omega t \cos kx - \sin\omega t \sin kx)$

$$Us = 2U_0 \sin kx \sin \omega t$$

A l'extrémité de la ligne on a U = 0. C'est un nœud de tension.
Il impose $\sin kL = 0$ et $kL = n\pi$.
On trouve le nœud de tension précédent à $kx = (n-1)\pi$ d'où $x = (n-1)\lambda/2$

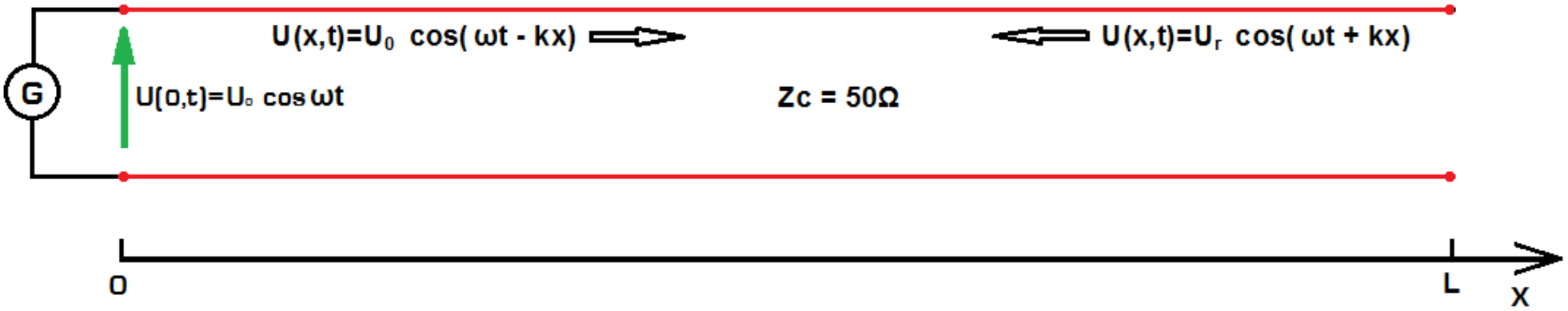
La distance entre 2 nœuds de tension est $\lambda/2$

Enveloppe de l'onde stationnaire



A l'extrémité de la ligne il y a un nœud de tension.
Les nœuds précédents sont distants de λ/2

Ondes stationnaires d'une ligne ouverte



Il y a une réflexion totale de l'onde incidente sans changement de signe.
Ur = U0

L'onde stationnaire U est égale à $U_0 \cos(\omega t - kx) + U_0 \cos(\omega t + kx)$

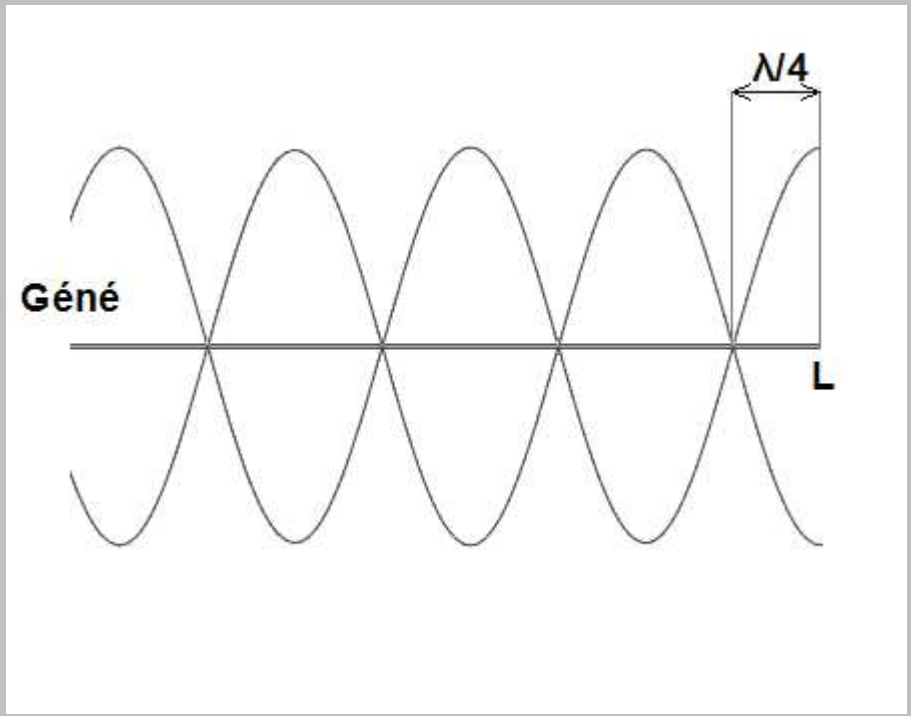
$U = U_0 (\cos\omega t \cos kx + \sin\omega t \sin kx) + U_0 (\cos\omega t \cos kx - \sin\omega t \sin kx)$

$$U = 2U_0 \cos kx \cos \omega t$$

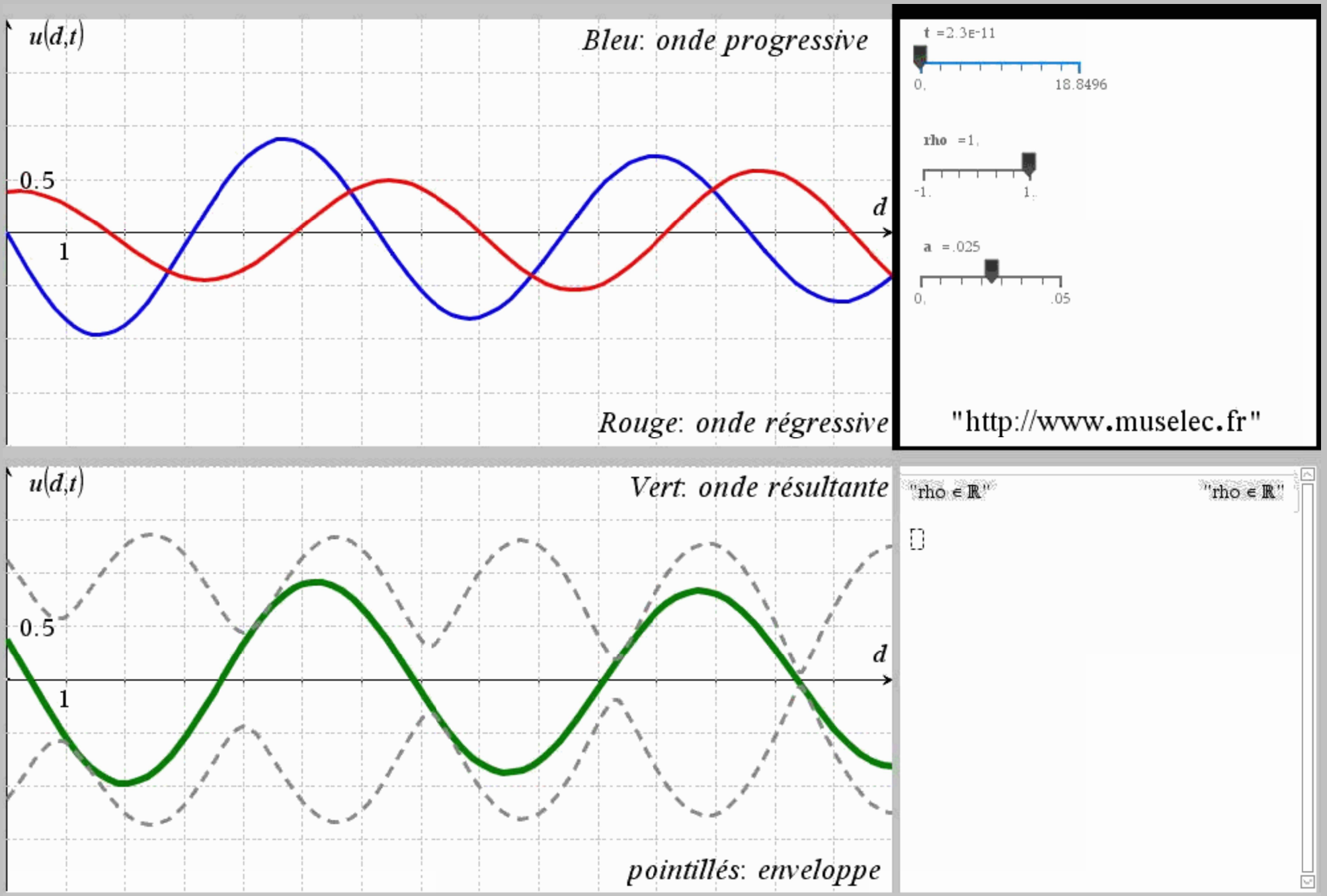
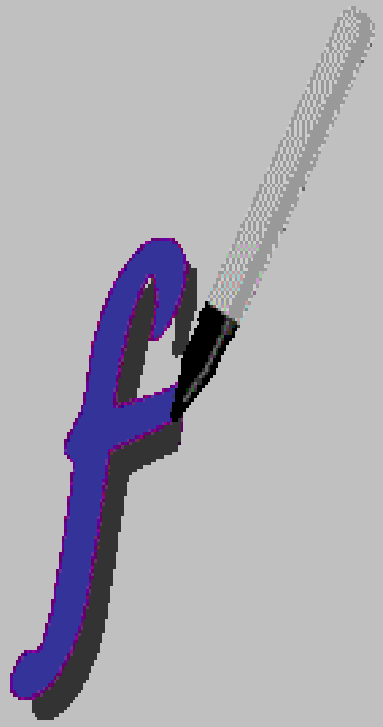
A l'extrémité de la ligne on a un ventre de tension.
Il impose $\cos kL = 1$ et $kL = (2n-1)\pi/2$.
Le dernier nœud de tension sera à $\lambda/4$ de extrémité.

Enveloppe de l'onde stationnaire ligne ouverte

$$U = 2U_0 \cos kx \cos \omega t$$



Le dernier nœud de tension est situé à λ/4 de l'extrémité de la ligne


u(d,t)
Bleu: onde progressive
0.5
1
d
Rouge: onde régressive
t =2.3e-11
0.
18.8496
rho =1.
-1.
1.
a =.025
0.
.05
"http://www.muselec.fr"
u(d,t)
Vert: onde résultante
0.5
1
d
pointillés: enveloppe
"rho ∈ ℝ"
"rho ∈ ℝ"