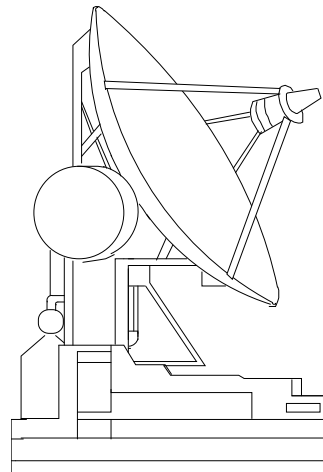


Institut Universitaire de Technologie 1
Université Grenoble Alpes

Module R306-HF

INTRODUCTION AUX PHENOMENES DE PROPAGATION
SUR LES LIGNES-CABLES



Réseaux & Télécommunications

Objectifs :

Connaitre les phénomènes de propagation sur les câbles ;
Identifier les types de câbles utilisés en télécom ;
Mesurer les caractéristiques des câbles à l'aide des appareils ;
Vérifier la conformité d'un câble (impédance, atténuation...) ;
Identifier les principaux défauts d'une installation/d'un câble.

Formation :

- 2 séances de cours
- 2 séances de TD
- 3 TP (Propagation, VNA propagation, ligne fendue)

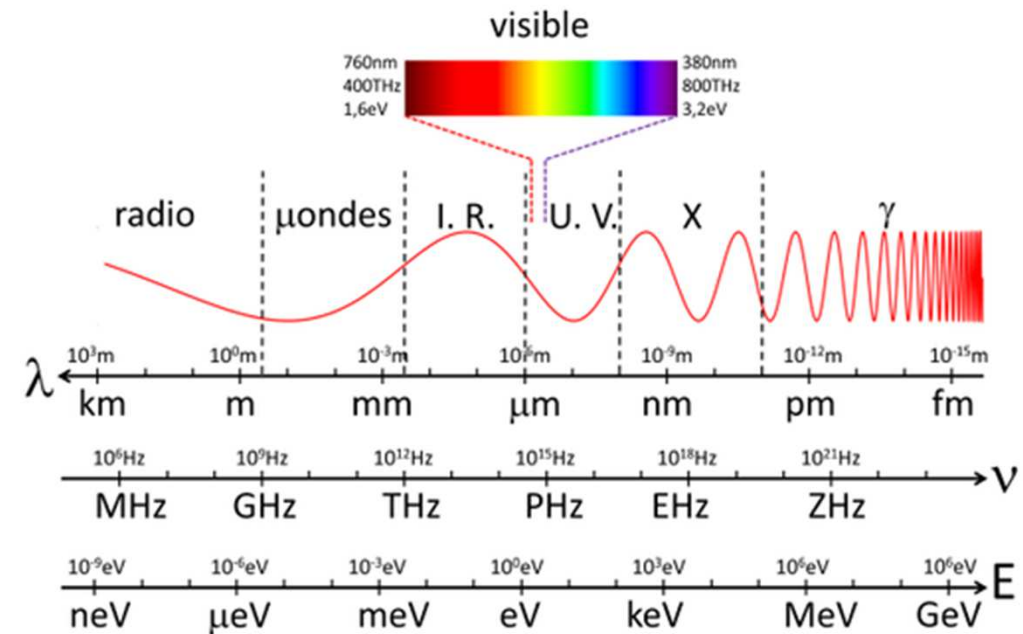
Evaluation :

- 1 DS
- 1 note de TP

1. La propagation

Solide, liquide, gaz ou vide

Les ondes électromagnétiques se propagent dans tous les milieux, mais attention à l'atténuation.

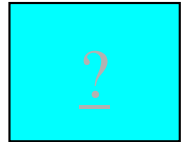


Milieu de propagation : un ensemble de constantes qui lui sont propres.

Une onde :

Vitesse de l'onde : v [m/s] (c vitesse de la lumière dans le vide)

Longueur d'onde (fréquence spatiale) : λ [m]
(Distance entre deux points de même amplitude dans l'espace)



La période, la fréquence « temporelle » : T [s]
(temps pour voir passer une période du signal en un point fixe de l'espace)

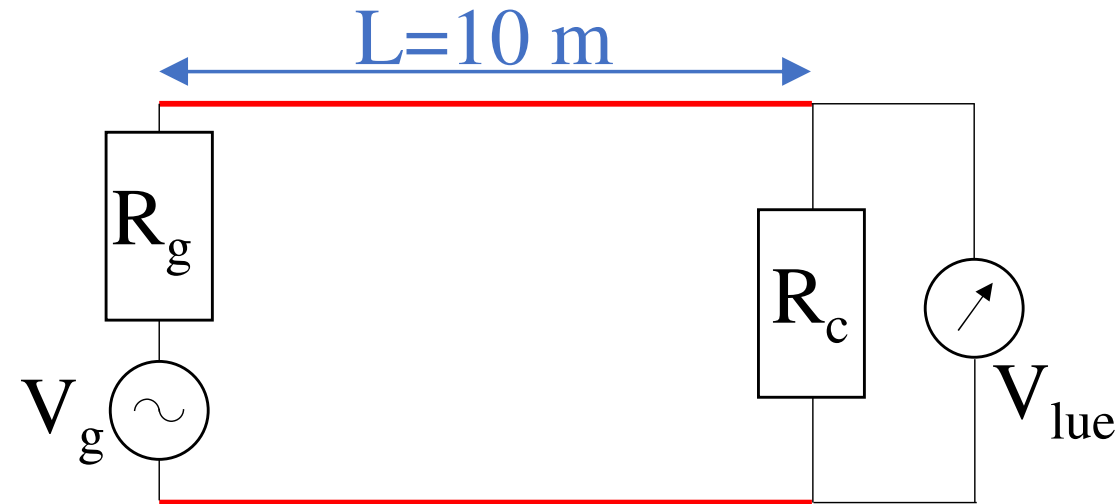
$$\lambda = v T$$

Les phénomènes de propagation sont
négligeables lorsque la longueur du
support de propagation est petite devant
la longueur d'onde $L < \lambda/10$.

Phénomènes de propagation en électricité :

$$F < 1 \text{ MHz} : V_{\text{lue}} = V_g \frac{R_c}{R_c + R_g}$$

~~$$F > \text{qques MHz} : V_{\text{lue}} = V_g \frac{R_c}{R_c + R_g}$$~~



Théorie électromagnétique :

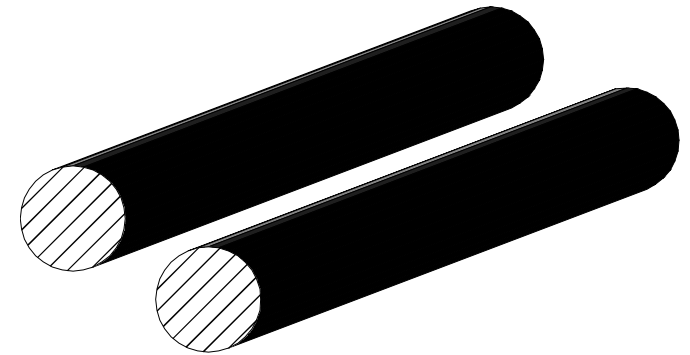
- une onde progressive
- une onde régressive

2. Les lignes et les câbles en télécom

2.1. La ligne bifilaire

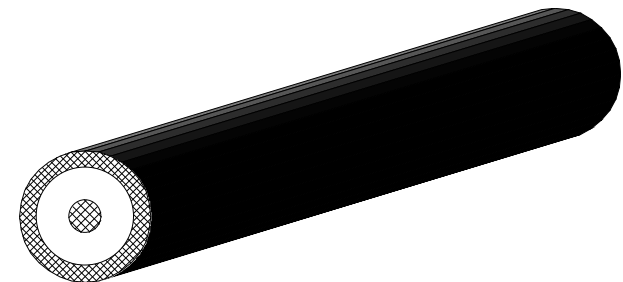
La première ligne qui a été utilisée en télécommunications.

Les deux conducteurs étaient espacés de 20 cm



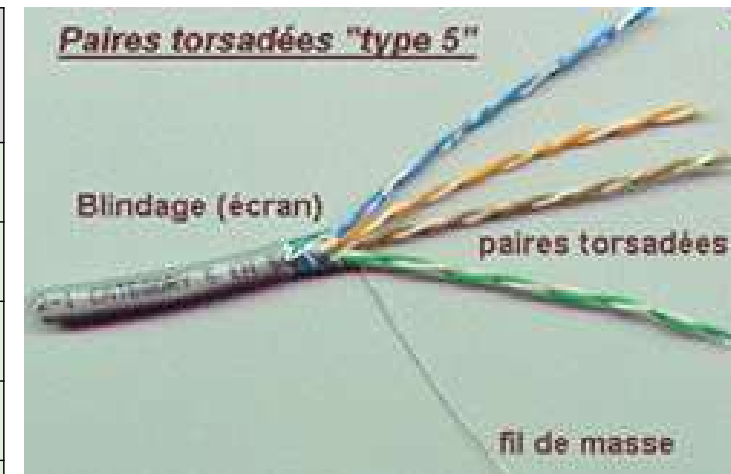
2.2. La ligne coaxiale

L'enveloppe extérieure sert de blindage pour le conducteur central mais aussi de conducteur de retour.

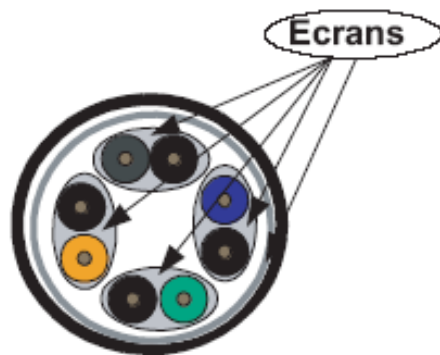


2.3. La paire torsadée (Twisted pair)

Dénomination industrielle	ISO 11801 (norme)	Blindage du câble	Blindage de paire
UTP	U/UTP	aucun	aucun
STP	U/FTP	aucun	feuillard
FTP, STP	F/UTP	feuillard	aucun
STP	S/UTP	tresse	aucun
SFTP, S-FTP, STP	SF/UTP	tresse, feuillard	aucun
FFTP, STP	F/FTP	feuillard	feuillard
SSTP, SFTP, STP	S/FTP	tresse	feuillard
SSTP, SFTP, STP	SF/FTP	tresse, feuillard	feuillard



U : unshielded
S : shield
F : foiled
T : twist
P : pair



Câble catégorie 7 (600 MHz)

Longueurs de 100 m

Cat.5 (UTP) : 100 Mb/s.

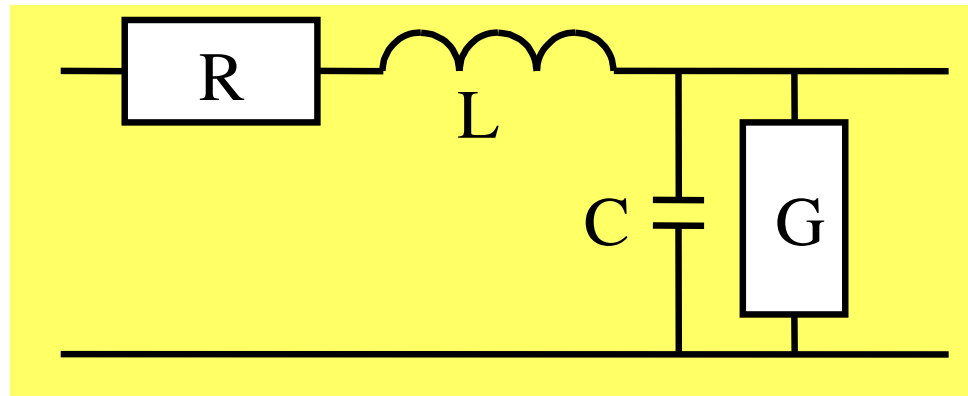
Cat.5e (FTP) : 1 Gb/s (100 MHz)

Cat.6 (FTP) : 2,5 Gb/s (250 MHz)

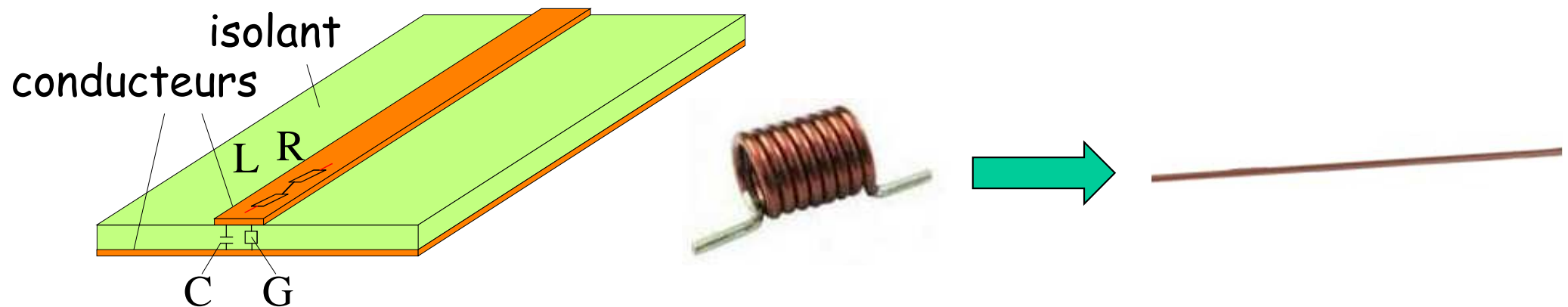
Cat. 6a (F/FTP) : 10 Gb/s (500 MHz)

7 Cat. 7 (SFTP) : 10 Gb/s (600 MHz)

3. Représentation des lignes de transmission



Origine physique du modèle ?
Modèle réparti.



Modèle « RLCG ».

3.1. Constantes primaires

une self linéique L (H/m)

une capacité linéique C (F/m)

une résistance linéique R (Ω /m)

une conductance (perditance) linéique G (S/m)

Remarque : Lorsque R et G sont nuls, la ligne est sans pertes.

3.2. Constantes secondaires

Vitesse de phase

$$v_{\phi} = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

Impédance caractéristique

$$Z_c = \sqrt{\frac{R + j L \omega}{G + j C \omega}}$$

Constante de propagation

$$\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{(G + j C \omega) (R + j L \omega)}$$

PE : polyéthylène, plein, aéré ou sous forme d'entretoises.

PTFE : polytétrafluoréthylène (Téflon)

Câbles coaxiaux

Réf.	diamètre (mm)	Zc (Ω)	V _φ / c0	C (pF/m)	Atténuation à 10 MHz (dB/100m)	Atténuation à 100MHz (dB/100m)	Atténuation à 1000MHz (dB/100m)	Vmax (kV)	
RG6	6,6	75	0,82	48	2,1	6	21	0,3	TV satellite, mousse de PE
RG8-X	11	53	0,82	74,4	2,7	9,3	33,6	0,4	mousse de PE
RG8-U	11	50	0,8	78	1,5	5,1	21	0,4	mousse de PE
RG11A-U	5	75	0,66	100	6	10	21		PE
RG58CU	5	50	0,66	100	5	17	56	2,5	URM76
RG59BU	6,15	75	0,66	70	5	15	46	3,5	
RG62AU	6,15	93	0,86	44	3	9	29		
RG141U	5	50	0,7	87	3,94	12,8	42,65	1,4	PTFE
RG142A	5	70	0,7	87		14,4	50,2	1,4	PTFE
RG174AU	2,54	50	0,66	100	9	27	90	5	PE
RG178	2	50	0,7	100	15	48	150		PTFE
RG179	2,5	75	0,85	70	17,4	26,9	86,3	2	PTFE
RG213U	10,3	50	0,66	100	2	6,8	25	6	
RG214	10,8	50	0,66	96	1,65	6	26	3,7	PE
RG218U	22	50	0,66	101	3	6	16	11	PE
RG223	5,4	50	0,66	96		13	44	1,9	PE
RG405	2,2	50	0,7	105		17	60	5	semi-rigide/PTFE
UR76	5	50	0,66	100	5	16	53	2,6	RG58

Paires torsadées

Catégorie	Dénomination	Zc (Ω)	V ϕ / c0	C pF/m	Atténuation à 10 MHz (dB/100m)	Atténuation à 100MHz (dB/100m)	Atténuation à 250MHz (dB/100m)	Atténuation à 500MHz (dB/100m)	Atténuation à 1000MHz (dB/100m)	Diamètre (mm)	Isolant	Vmax (V)
Cat 5e	FTP	100 ($\pm$ 15%)	0,7	56	6	21				6,5	PE	300
Cat 6	FTP	100 $\pm$ 15 (1-100 MHz) 100 $\pm$ 20 (100-250 MHz)	0,7		6	19,9	33			7,2	PE	500
Cat 6a	F-FTP	100 $\pm$ 15 (1-100 MHz) 100 $\pm$ 20 (100-250 MHz) 100 $\pm$ 25 (250-500 MHz)	0,7	45	6	19,1	31,1	45,3		7,4	PE	
Cat 7	SFTP	100 $\pm$ 15 (1-100 MHz) 100 $\pm$ 20 (100-250 MHz) 100 $\pm$ 25 (250-500 MHz) 100 $\pm$ 30 (500-1000 MHz)	0,8		5,8	19,02	30,97	45,26	65	7,8	PE	
Cat 7a	SFTP	100 $\pm$ 15 (1-100 MHz) 100 $\pm$ 20 (100-250 MHz) 100 $\pm$ 25 (250-500 MHz) 100 $\pm$ 30 (500-1000 MHz)	0,8		5,8	18,5	29,7	42,8	61,9	8,2	PE	

Remarques :

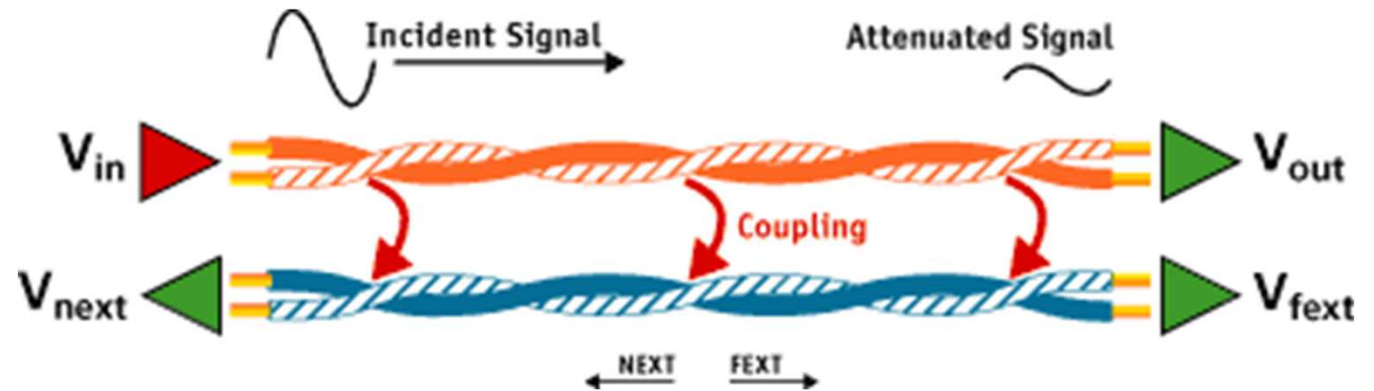
- Pour une même catégorie, différents fabricants n'auront pas les mêmes performances
- Les câbles USB ont une impédance de 90 Ω .
- Les classes concernent plutôt l'installation :

Câbles installés avec les connecteurs et parfois d'autres composants : norme internationale **ISO/CEI 11801**

classe	A	B	C	D	E	Ea	F	Fa
f _{max}	100 kHz	1 Mhz	16 MHz	100 Mhz	250 MHz	500 MHz	600 MHz	1 GHz

Paired twisted : test equipment in TP

En travaux pratiques : DSX-602 FLUKE (8000 € TTC)



Principales mesures :

- Atténuation
- Next et ACR-F
- ELFEXT - ACR-N

Ce qu'il faut savoir. Indispensable mais pas suffisant !

Paramètres primaires : R, L, C, G

Paramètres secondaires : v_ϕ , Z_c , $\gamma = \alpha + j\beta$

Lignes avec pertes :

$$v_\phi = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

$$Z_e = \sqrt{\frac{R + jL\omega}{G + jC\omega}}$$

$$\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{(G + jC\omega)(R + jL\omega)}$$

$$\alpha = \frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}} + \frac{G}{2} \sqrt{\frac{L}{C}}$$

$$\beta = \omega \sqrt{LC}$$

Lignes sans pertes ou à très faibles pertes ou à pertes négligeables :

$$v_\phi = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

$$Z_c = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

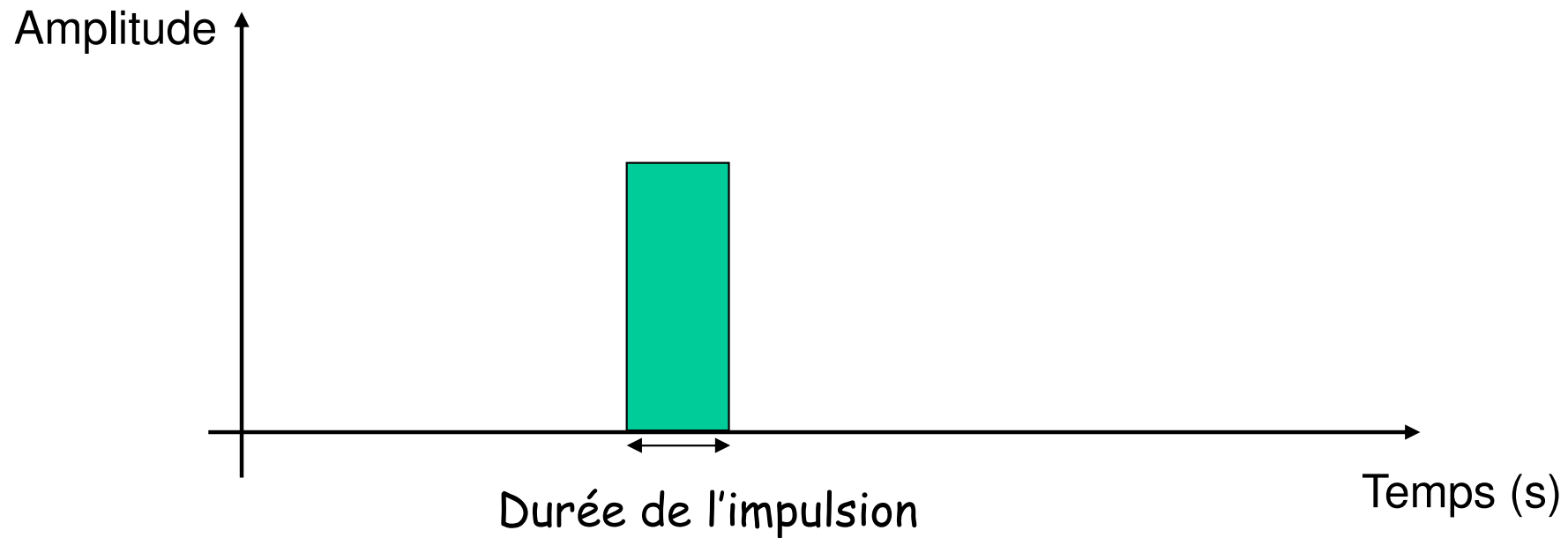
$$\gamma = \alpha + j\beta$$

$$\alpha = 0$$

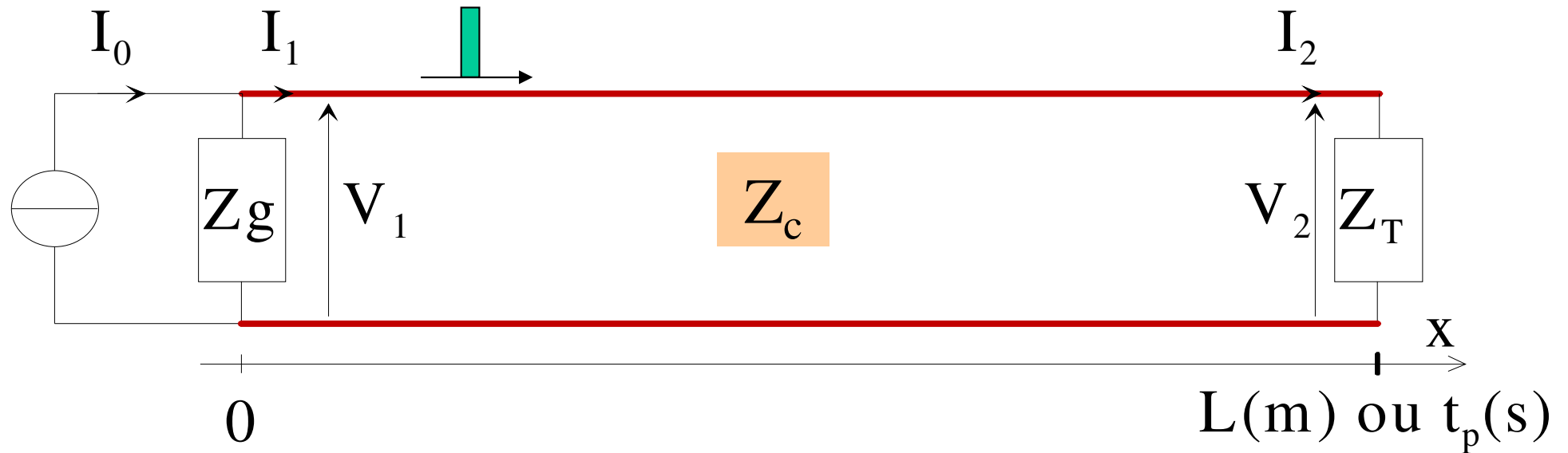
$$\beta = \omega \sqrt{LC}$$

4. Les lignes en régime impulsionnel

Définition de l'impulsion :

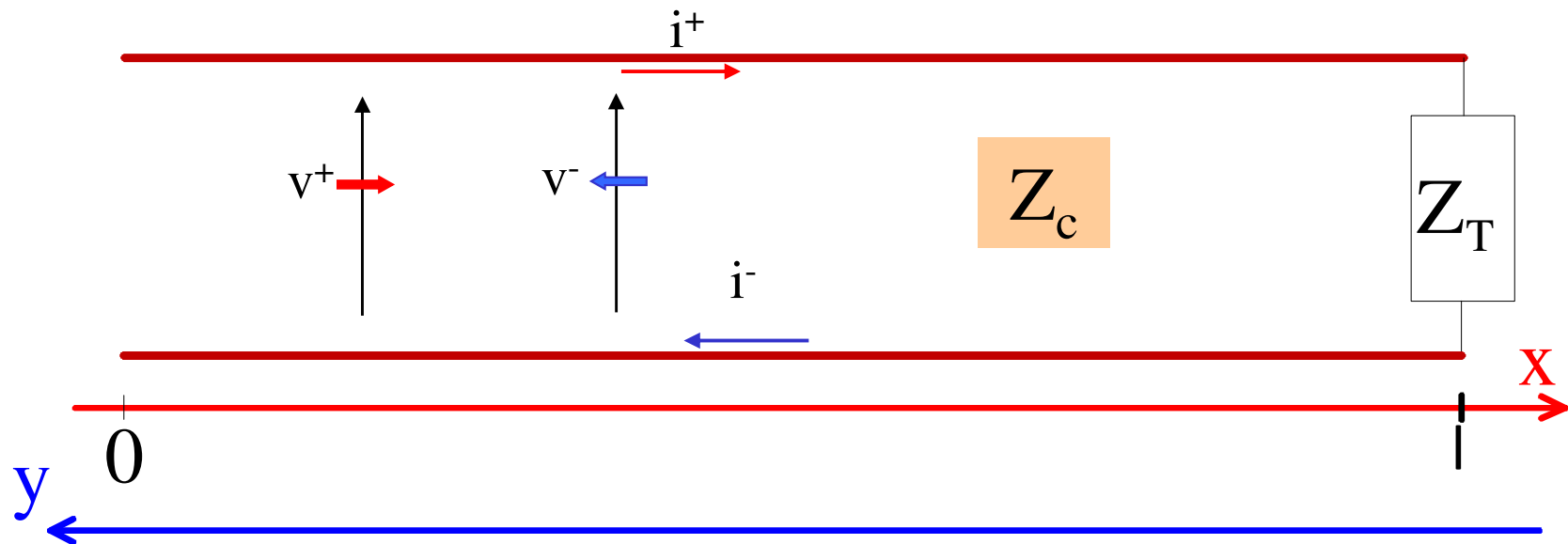


4.1. Description des conditions



Signaux (ondes de courant et de tension) fonction de Z_g , Z_T et Z_c .

4.2. Coefficient de réflexion



$$\Gamma_T = \frac{Z_T - Z_c}{Z_T + Z_c} \text{ (ou encore } S_{11})$$

4.3. Générateur adapté à la ligne : $Z_g = Z_C$

A $t=0$, à l'entrée : $V_1(t) = I_0 (Z_g // Z_C) = I_0 \frac{Z_C}{2}$

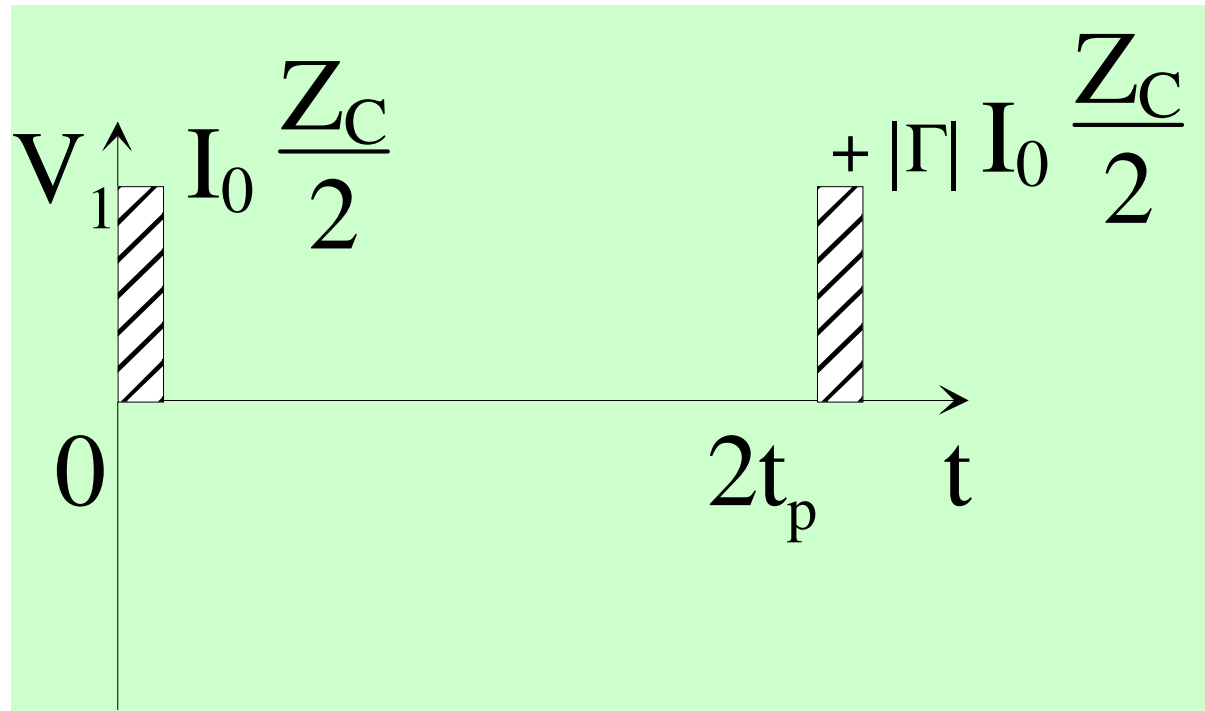
Trois cas particuliers peuvent alors être étudiés :

$$Z_T = \infty, \text{ alors } \Gamma_T = +1$$

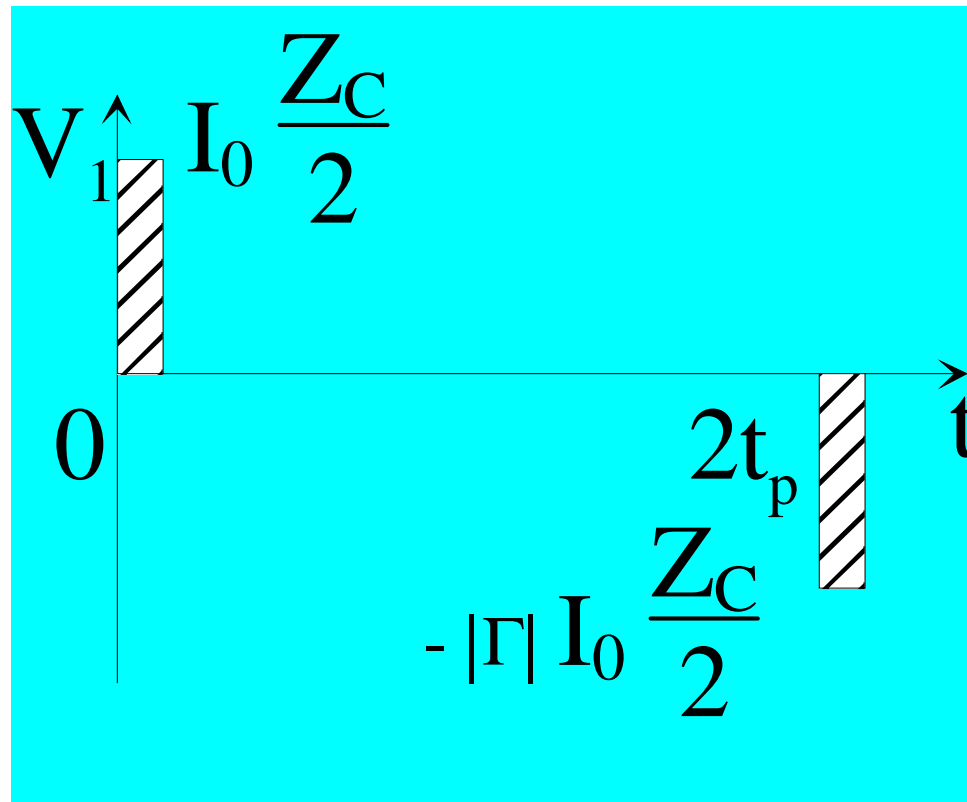
$$Z_T = 0, \text{ alors } \Gamma_T = -1$$

$$Z_T = Z_C, \text{ alors } \Gamma_T = 0$$

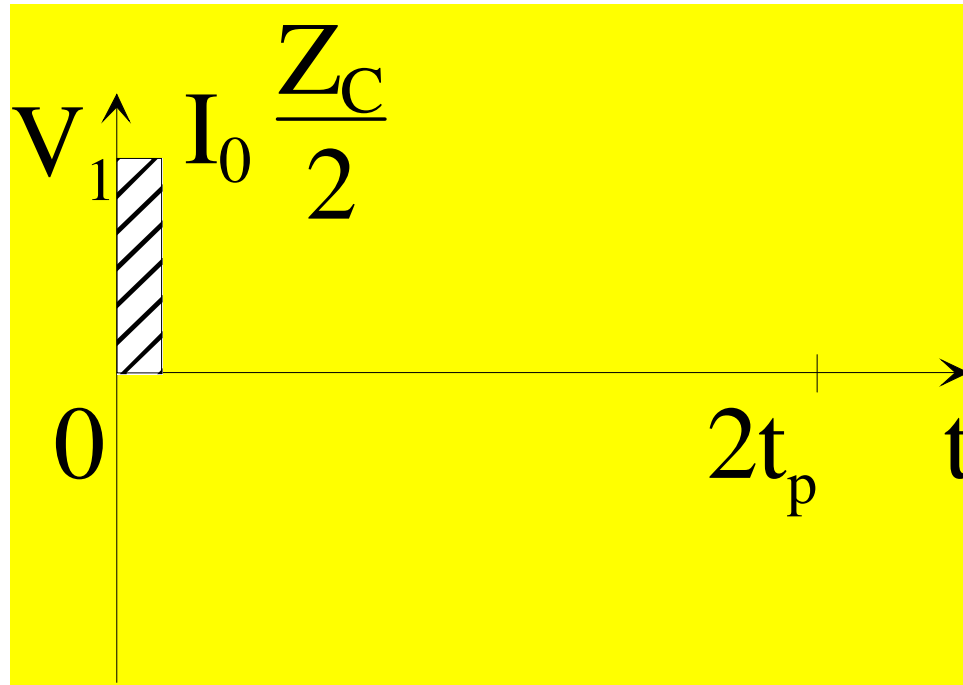
4.3.1. $Z_T = \infty$, alors $\Gamma_T = + 1$



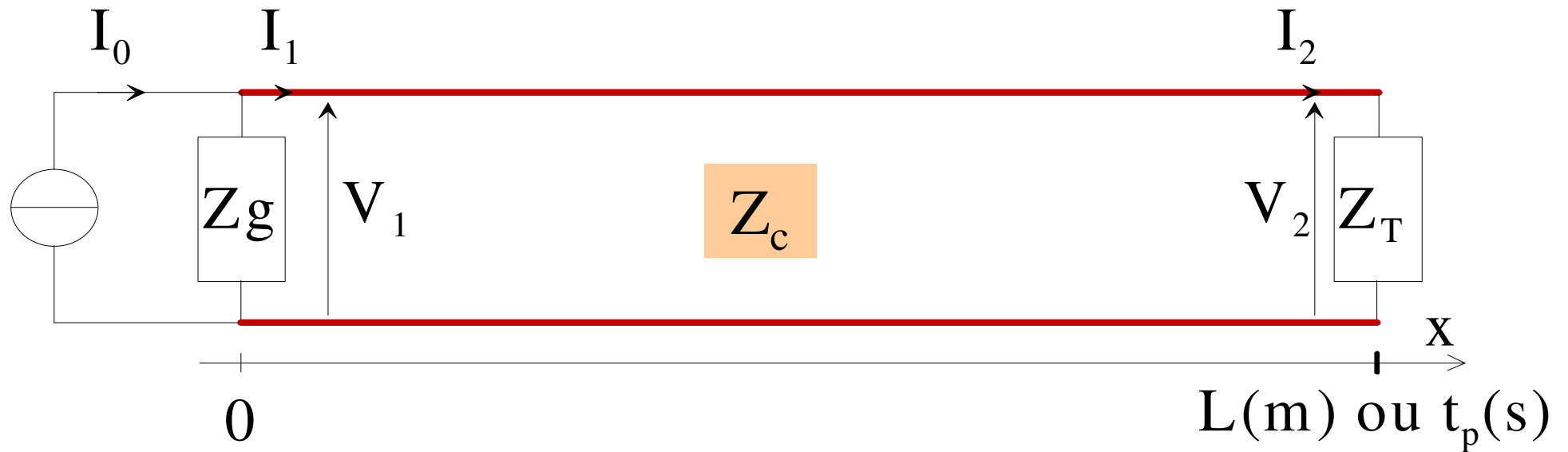
4.3.2. $Z_T = 0$, alors $\Gamma_T = -1$



4.3.3. $Z_T = Z_C$, alors $\Gamma_T = 0$



4.4. Générateur désadapté à la ligne



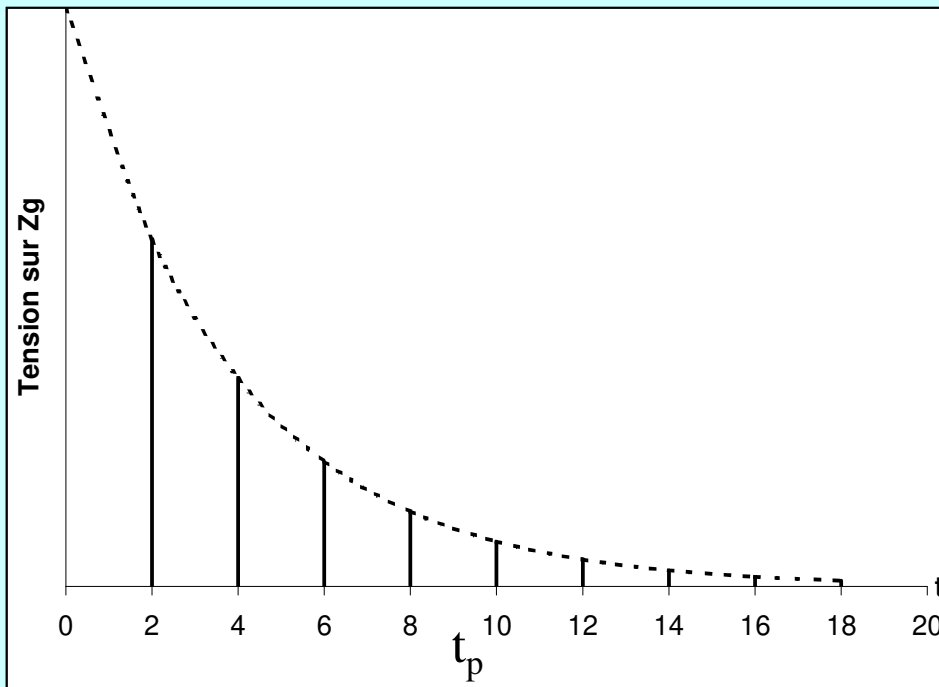
L'impulsion délivrée par le générateur pourra être réfléchiée au niveau du générateur (entrée de la ligne) comme au niveau de la charge (extrémité de la ligne).

$$Z_g I_g = Z_c I_1 \text{ et } I_0 = I_g + I_1 = \frac{Z_c}{Z_g} I_1 + I_1 = \frac{Z_c + Z_g}{Z_g} I_1$$

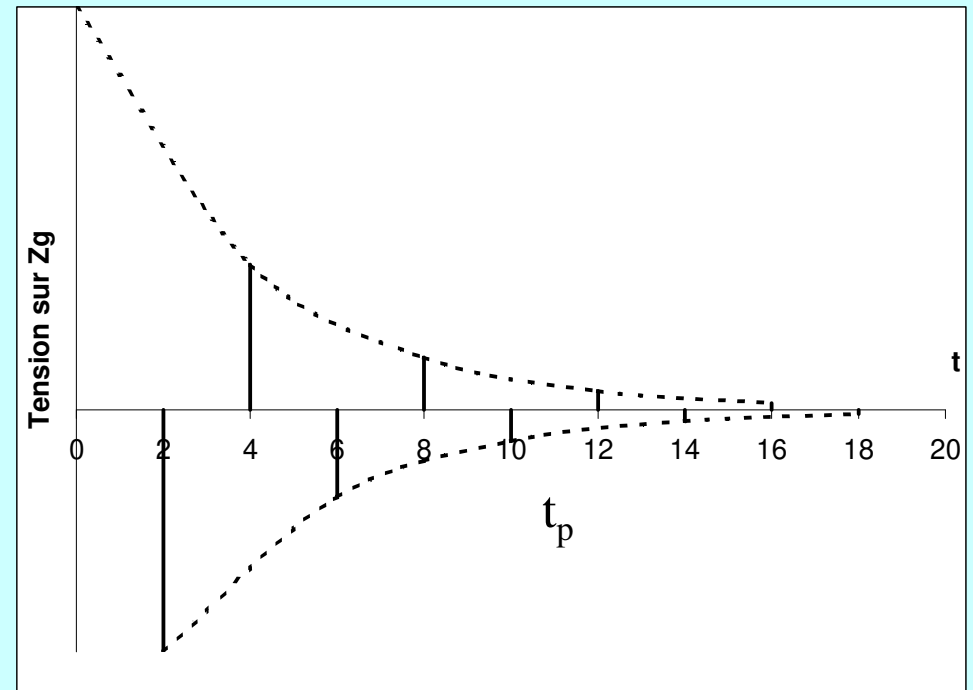
$$\text{alors l'onde de tension } V_1 = Z_c I_1 = \frac{Z_c Z_g}{Z_c + Z_g} I_0$$

L'onde V_1 se réfléchit sur la charge à l'instant t_p et revient vers le générateur avec une amplitude $\Gamma_T V_1$. A l'instant $2 t_p$ elle est réfléchi sur le générateur et repart vers la charge avec une amplitude $\Gamma_g \Gamma_T V_1$ et ainsi de suite.

- à l'entrée de la ligne une succession d'impulsions $\Gamma_g \Gamma_T V_1$, $\Gamma_g^2 \Gamma_T^2 V_1$, $\Gamma_g^3 \Gamma_T^3 V_1$... aux instants $2 t_p$, $4 t_p$, $6 t_p$...



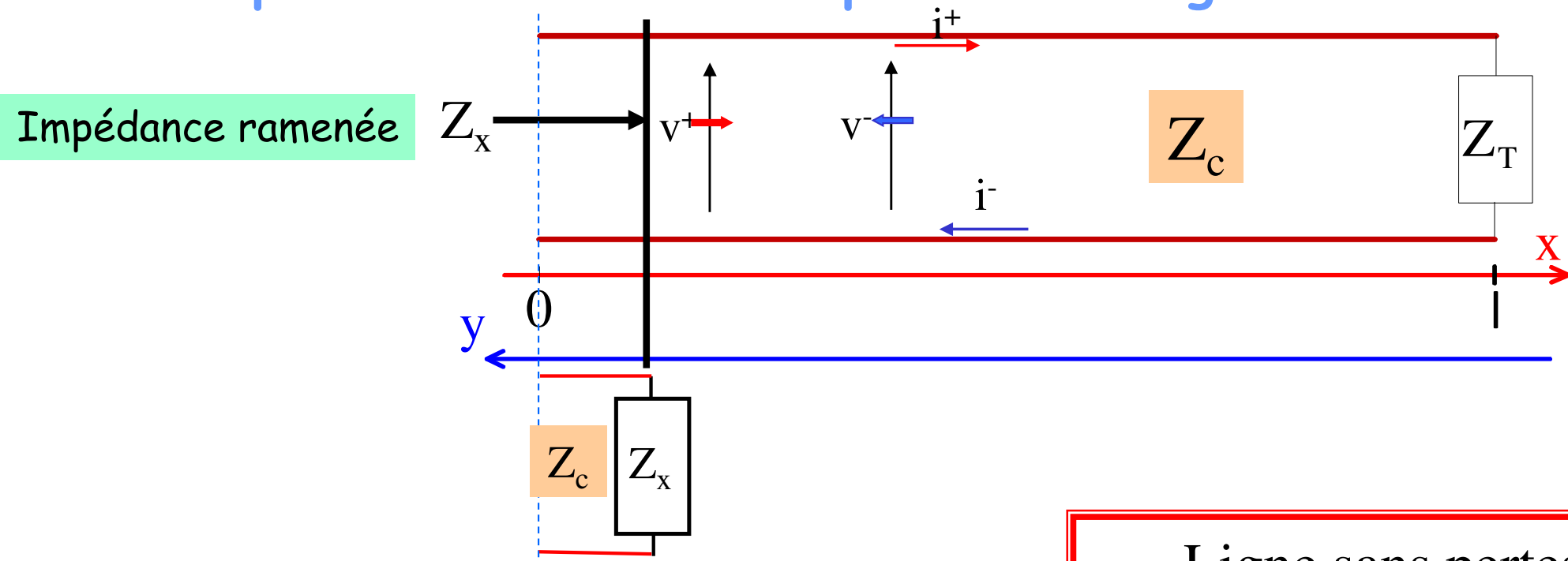
$$\Gamma_g \Gamma_T = 0,6$$



$$\Gamma_g \Gamma_T = -0,6$$

- sur la charge une succession d'impulsions $\Gamma_T V_1$, $\Gamma_g \Gamma_T^2 V_1$, $\Gamma_g^2 \Gamma_T^3 V_1$... aux instants t_p , $3 t_p$, $5 t_p$...

5. Impédance ramenée - impédance en ligne



$$Z_x = Z_c \frac{Z_T + Z_c \operatorname{th}(\gamma y)}{Z_c + Z_T \operatorname{th}(\gamma y)}$$

$$\gamma = \alpha + j\beta$$

Ligne sans pertes :

$$Z_x = Z_c \frac{Z_T + j Z_c \operatorname{tg}(\beta y)}{Z_c + j Z_T \operatorname{tg}(\beta y)}$$

Ligne en court circuit à son extrémité

$$Z_x = Z_c j \operatorname{tg}(\beta y)$$

Ligne en circuit ouvert à son extrémité

$$Z_x = Z_c j \operatorname{cotg}(\beta y)$$

Toutes les valeurs de Z_x sont comprises entre Z_T et $1/Z_T$

Ce qu'il faut savoir. Indispensable mais pas suffisant !

Coefficients de réflexion : Γ ou S_{11}

$$\Gamma_T = \frac{Z_T - Z_c}{Z_T + Z_c}, \text{ en impédance normalisée, } z_T = Z_T / Z_c \text{ alors } \Gamma_T = \frac{z_T - 1}{z_T + 1}$$

$$\Gamma_x = \frac{v_x^-}{v_x^+} = - \frac{i_l^-}{i_l^+} = \frac{v_l^- e^{-\gamma y}}{v_l^+ e^{\gamma y}} = \Gamma_T e^{-2\gamma y}$$

Ligne en court circuit à son extrémité

$$\Gamma_T = -1 = - \frac{v_x^-}{v_x^+} = \frac{i_l^-}{i_l^+}$$

Ligne en circuit ouvert à son extrémité

$$\Gamma_T = 1 = \frac{v_x^-}{v_x^+} = - \frac{i_l^-}{i_l^+}$$

6. L'abaque de Smith (régime harmonique)

Relation entre impédance et coefficient de réflexion :

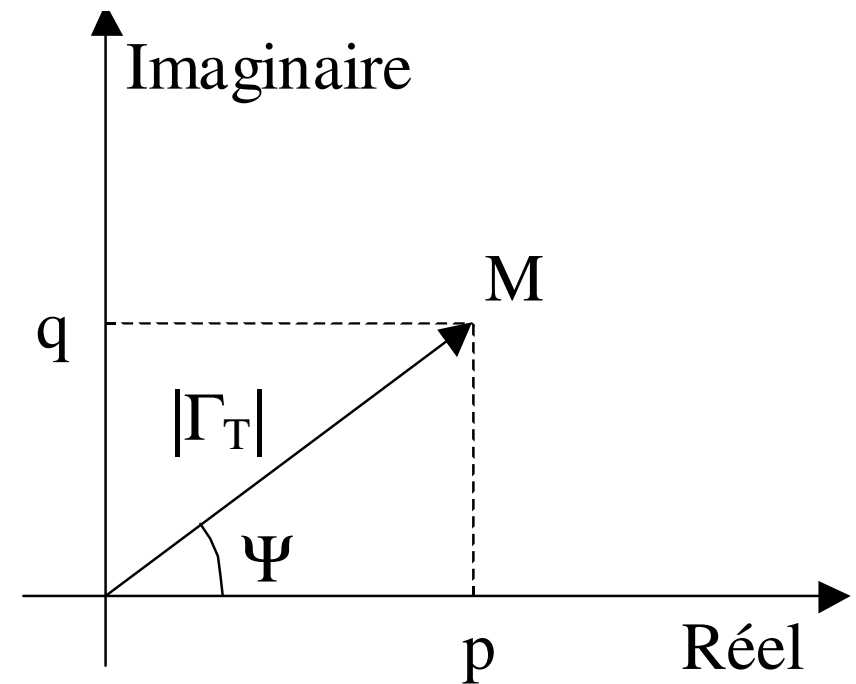
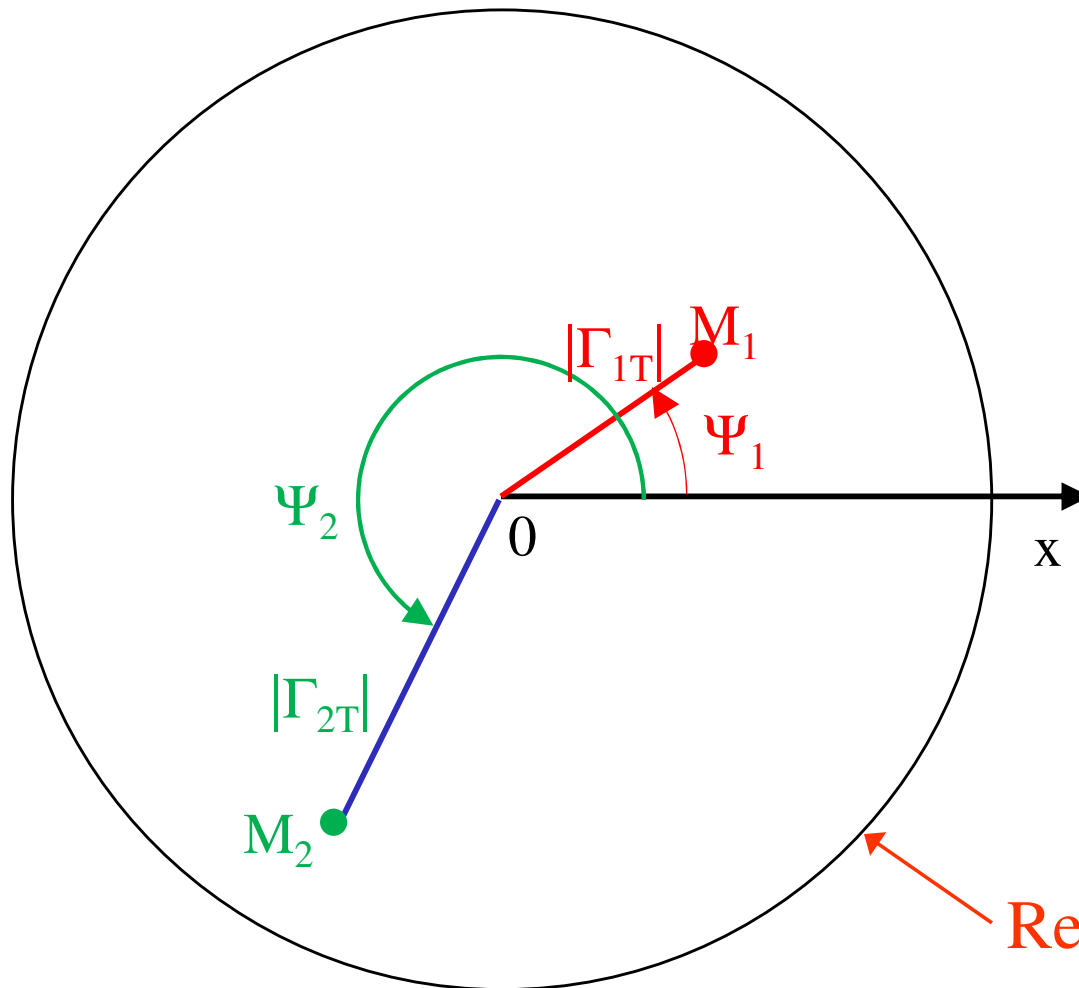
$$\left. \begin{array}{l} \text{Point quelconque de la ligne : } Z_x = Z_c \frac{1-|\Gamma|}{1+|\Gamma|} \\ \text{Extrémité de la ligne } Z_T = Z_c \frac{1+|\Gamma_T|}{1-|\Gamma_T|} \end{array} \right\} \text{ Relations complexes (a+jb)}$$

En impédance réduite :

$$z_x = \frac{Z_x}{Z_c} \text{ alors } z_x = \frac{1-|\Gamma|}{1+|\Gamma|} \text{ et } z_T = \frac{1+|\Gamma_T|}{1-|\Gamma_T|}$$

Points représentatifs des valeurs du coefficient de réflexion :

- 1 point de référence, O
- 1 axe de référence, Ox



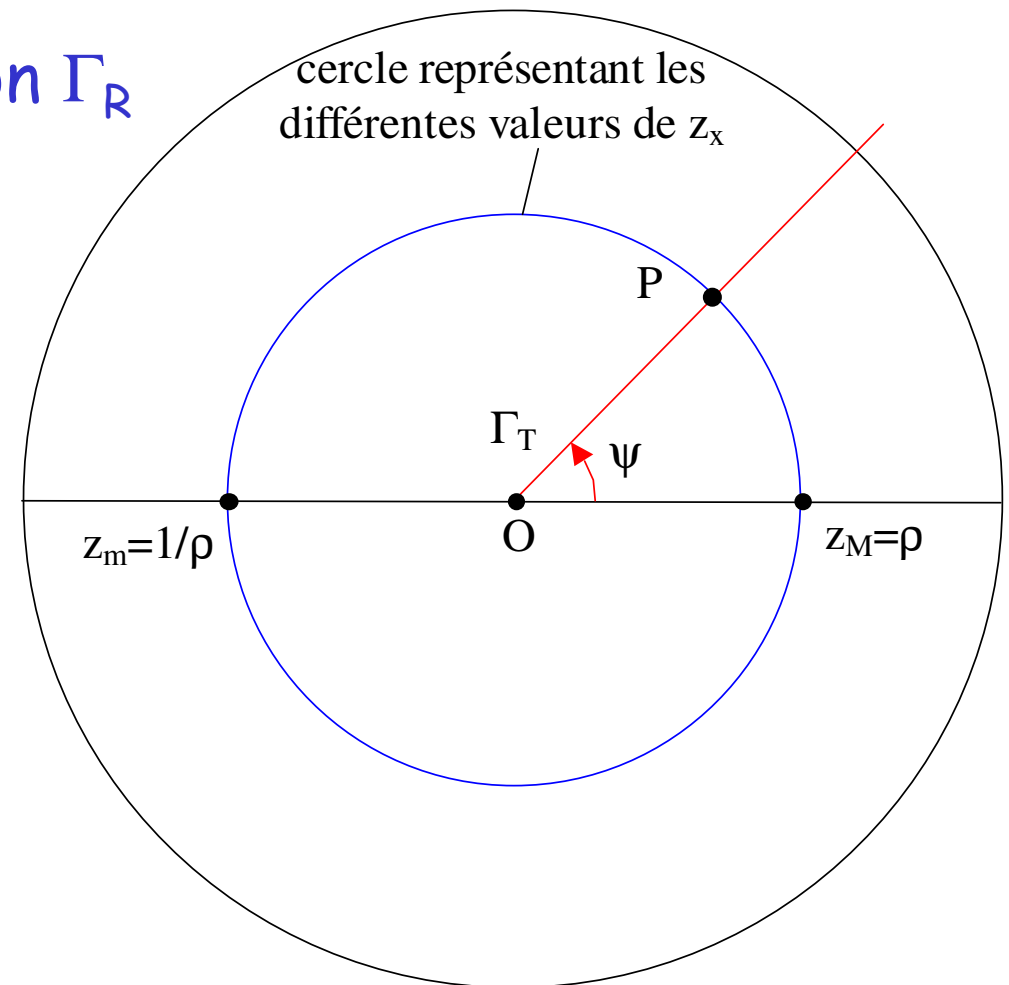
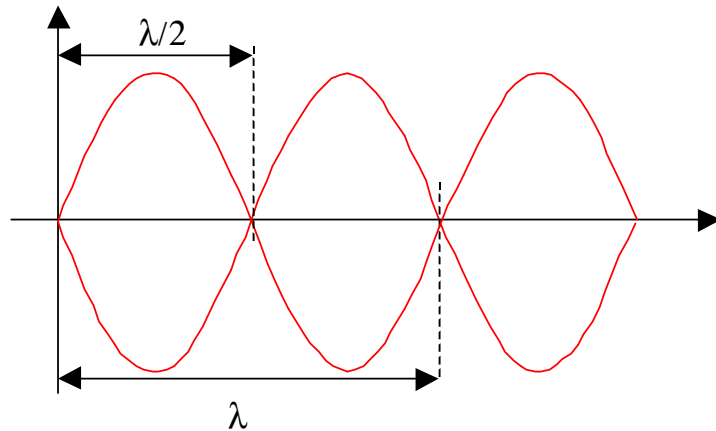
Remarque : $\Gamma \leq 1$, cercle de rayon unité.

$$\Gamma_x = \frac{z_x - 1}{z_x + 1}$$

$$\Gamma_x = \Gamma_R e^{j(\phi - 2\beta x)} \text{ ligne sans pertes}$$

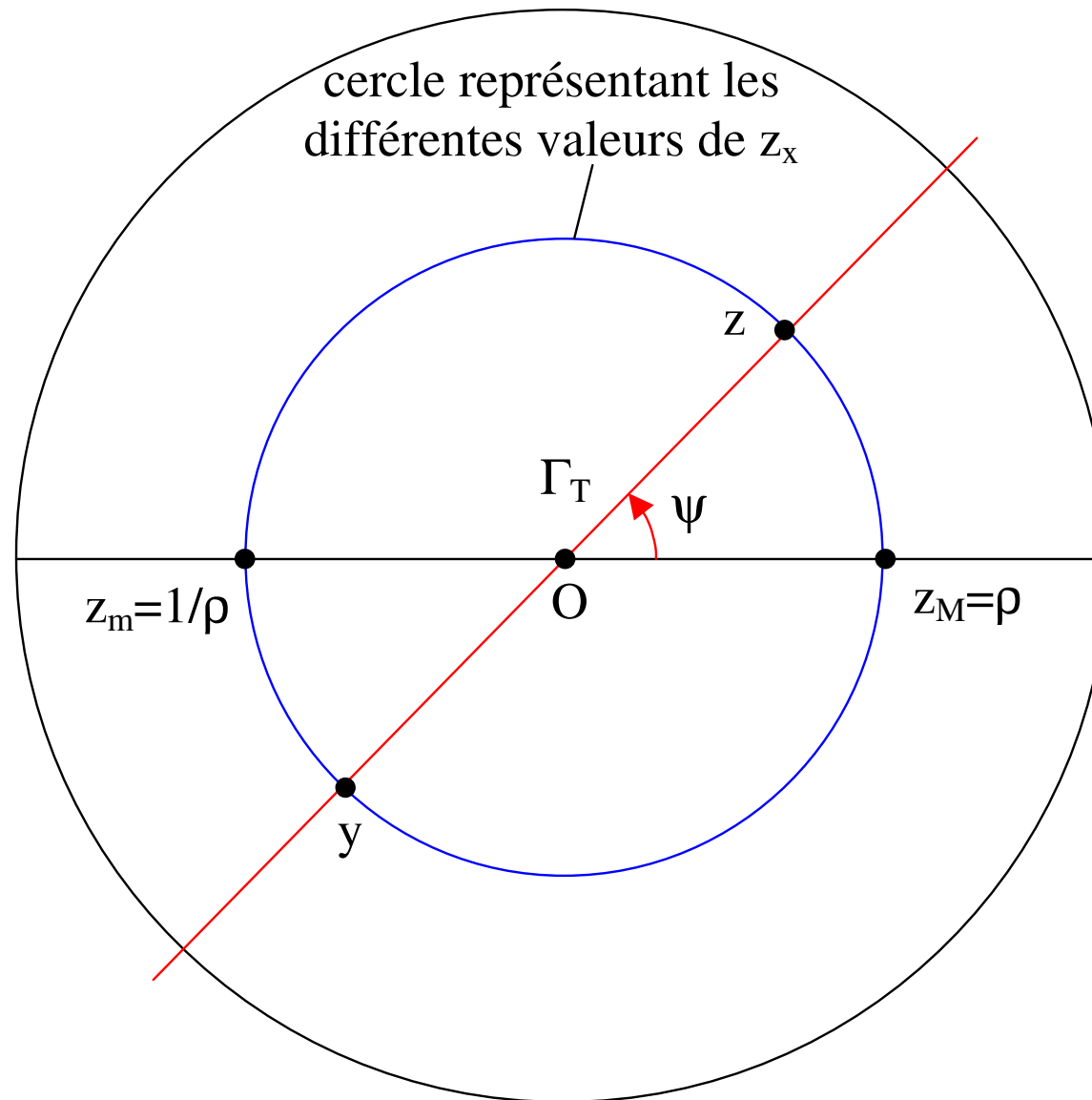
$$\Gamma_x = \Gamma_R e^{-2\alpha x} e^{j(\phi - 2\beta x)} \text{ ligne avec pertes}$$

Sans pertes : cercle en bleu de rayon Γ_R
périodicité : $\lambda/2$



Avec pertes : spirale logarithmique

Connaissant $z = r+jx$, il faut déterminer $y = g+jb$



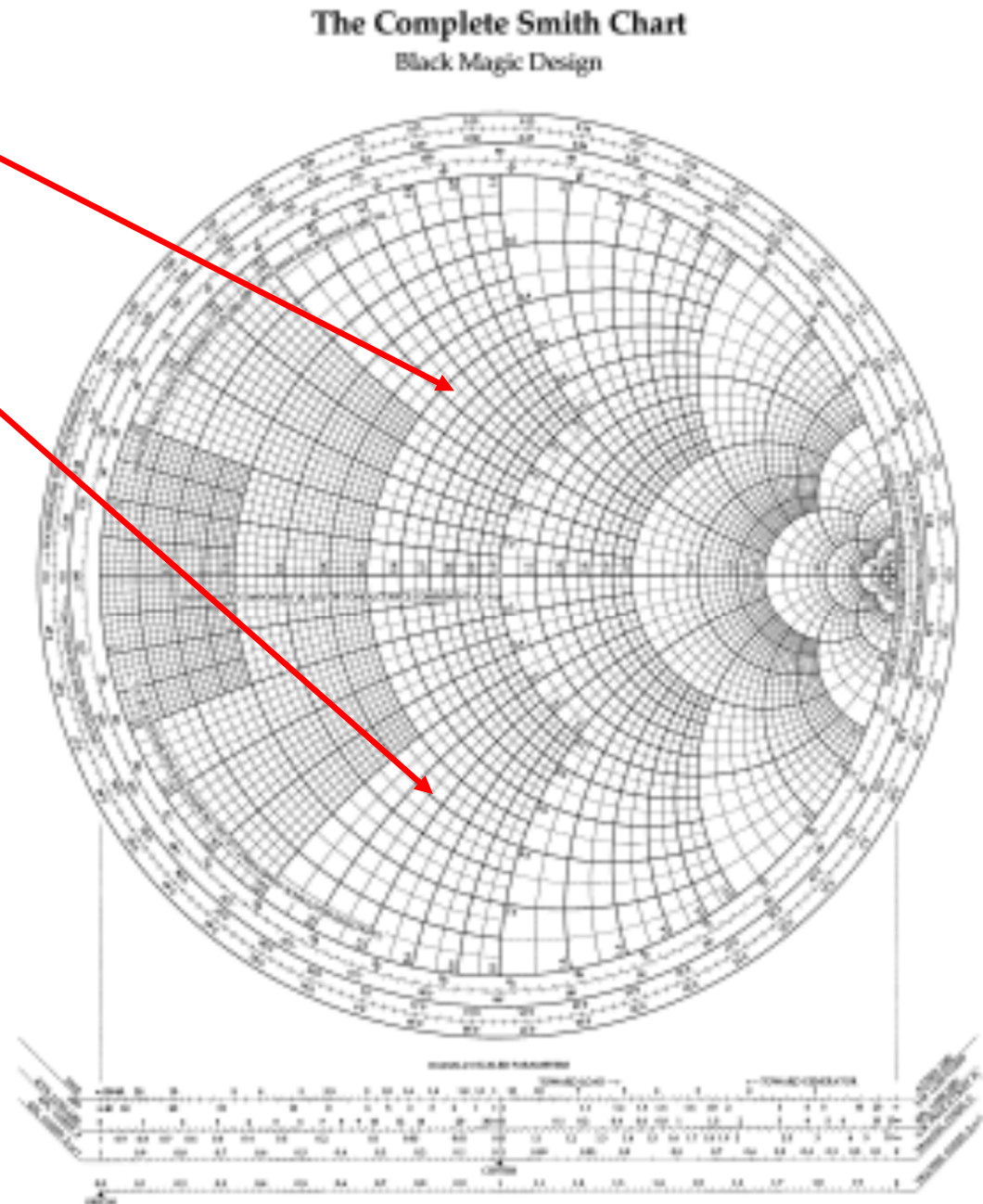
*Partie supérieure réactance inductive.

*Partie inférieure réactance capacitive.

*Déplacement dans le sens trigonométrique : vers la charge.

* Déplacement dans le sens trigonométrique : vers le générateur.

* Echelles complémentaires : ROS, SWR, atténuation...



Exemple d'utilisation de l'abaque de Smith

Détermination de l'impédance d'entrée d'une ligne

Soit une ligne de transmission sans pertes, d'impédance caractéristique $Z_c = 200 \Omega$, de longueur électrique $\beta l = 130^\circ$ terminée par une impédance $Z_T = R + j X = 400 - j 300 \Omega$.

La longueur électrique évite de préciser la longueur réelle de la ligne et la fréquence du générateur. Cette longueur électrique est égale à $\beta l = 2 \pi (l/\lambda) = 2,27 \text{ rad } (130^\circ)$ soit $l/\lambda = 0,36$.

1) les impédances sur l'abaque sont normalisées :

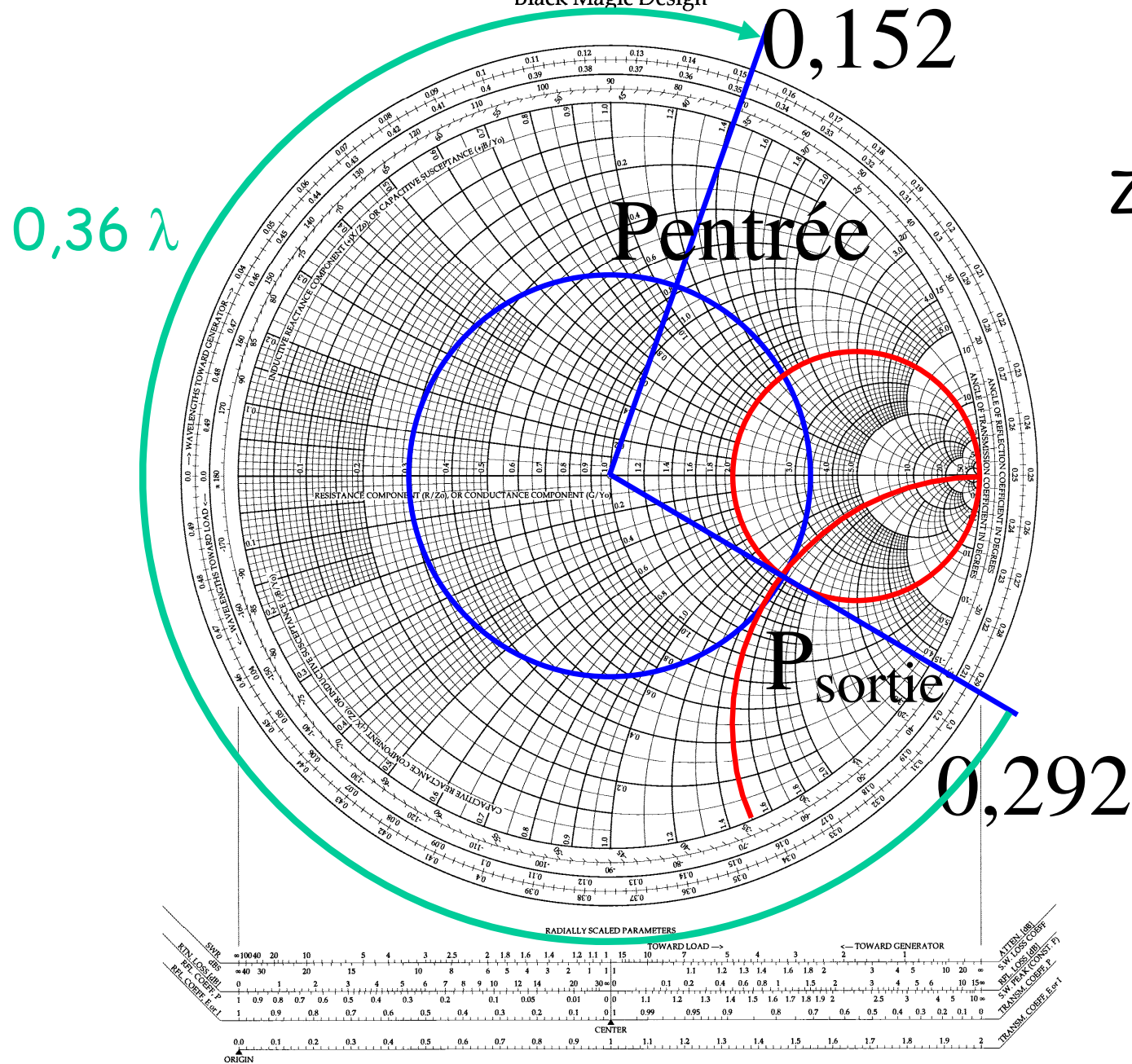
$$z_T = 2 - j 1,5$$

2) Cette impédance est représentée sur l'abaque :

à l'intersection des cercles 2 (partie réelle) et 1,5 (partie imaginaire) au point P_0 .

The Complete Smith Chart

Black Magic Design



$$Z_e = 0,75 + j 1,1$$

Phénomène d'ondes stationnaires

Se produit lorsque la ligne est désadaptée à une ou deux de ses extrémités.

Une onde incidente et une onde réfléchie vont de « combiner »

L'onde résultante est appelée onde stationnaire car elle ne se déplace pas.



Ligne $\lambda/2$ et $\lambda/4$

Une ligne de longueur $1 \cdot \lambda/2$ est chargée par un court-circuit.
Quelle est son impédance ramenée à l'entrée ?

Une ligne de longueur $100 \cdot \lambda/2$ est chargée par un court-circuit.
Quelle est son impédance ramenée à l'entrée ?

Une ligne de longueur $1 \cdot \lambda/4$ est chargée par un court-circuit.
Quelle est son impédance ramenée à l'entrée ?

Une ligne de longueur $99 \cdot \lambda/4$ est chargée par un court-circuit.
Quelle est son impédance ramenée à l'entrée ?

Conclusion sur ces lignes ?

Ce qu'il faut savoir. Nécessaire mais pas suffisant !

L'abaque de Smith permet de représenter des coefficients de réflexion.

L'axe horizontal représente les valeurs réelles.

Un tour sur l'abaque correspond à une demi-longueur d'onde ($0,5 \lambda$).

Un point placé dans la demi partie supérieure correspond à un comportement inductif.

Un point placé dans la demi partie inférieure correspond à un comportement capacitif.

Un cercle centré sur l'abaque représente toute les valeurs d'impédance ramenée tout au long d'une ligne sans pertes.

CONCLUSION

Ondes de tension et de courant

Adaptation d'impédance

Coefficient de réflexion

Ondes incidentes et réfléchies