

Université de Relizane
Département Génie Electrique
Master 02 Electrotechnique Industrielle

**Matière: Régimes transitoires
des systèmes électriques**

Chapitre 01: : Etude des régimes transitoires des circuits réactifs

Chapitre 02: Généralités sur les surtensions électriques

Chapitre 01: Etude des régimes transitoires des circuits réactifs

Origine des processus transitoires

En analysant les résultats obtenus à partir des considérations physiques sur les inductances et les capacités, nous pouvons nous poser une question générale : pourquoi toute modification de la charge de capacité et toute modification du courant d'inductance prend du temps, alors que, par exemple, les modifications des grandeurs d'une résistance, du courant de condensateur et de la tension d'inductance peuvent être instantanées ?

La réponse à cette question peut être donnée en considérant l'évolution de l'état énergétique d'un circuit contenant des éléments réactifs.

Energie des éléments réactifs

Un condensateur charge emmagasine un champ électrique entre ses électrodes.

$$W_C = \frac{CU_C^2}{2} = \frac{Q_C^2}{2C}.$$

Une bobine par laquelle passe un courant I_L emmagasine un champ magnétique à l'intérieur de ses spires.

$$W_L = \frac{LI_L^2}{2} = \frac{\Phi^2}{2L}.$$

Un élément réactif, en revanche, ne peut pas dissiper l'énergie qui lui est transmise par le circuit : cette énergie est accumulée dans le champ électrique ou magnétique de l'élément, et peut être rendue au circuit.

Analyse des processus transitoires

En régime transitoire, les tensions et les courants du circuit évoluent dans le temps pour trouver les lois d'évolution, il faut établir et résoudre les équations différentielles qui décrivent le système.

Système du 1° ordre

Définition

Un système du 1° ordre d'entrée $e(t)$ et de sortie $s(t)$ sera régi par une équation différentielle du 1° ordre à coefficients constants :

$$\tau \dot{s}(t) + s(t) = f(t)$$

$f(t)$ est proportionnel au signal d'entrée (impulsion ,échelon ...) et τ est une constante qui caractérise le système (constante de temps)

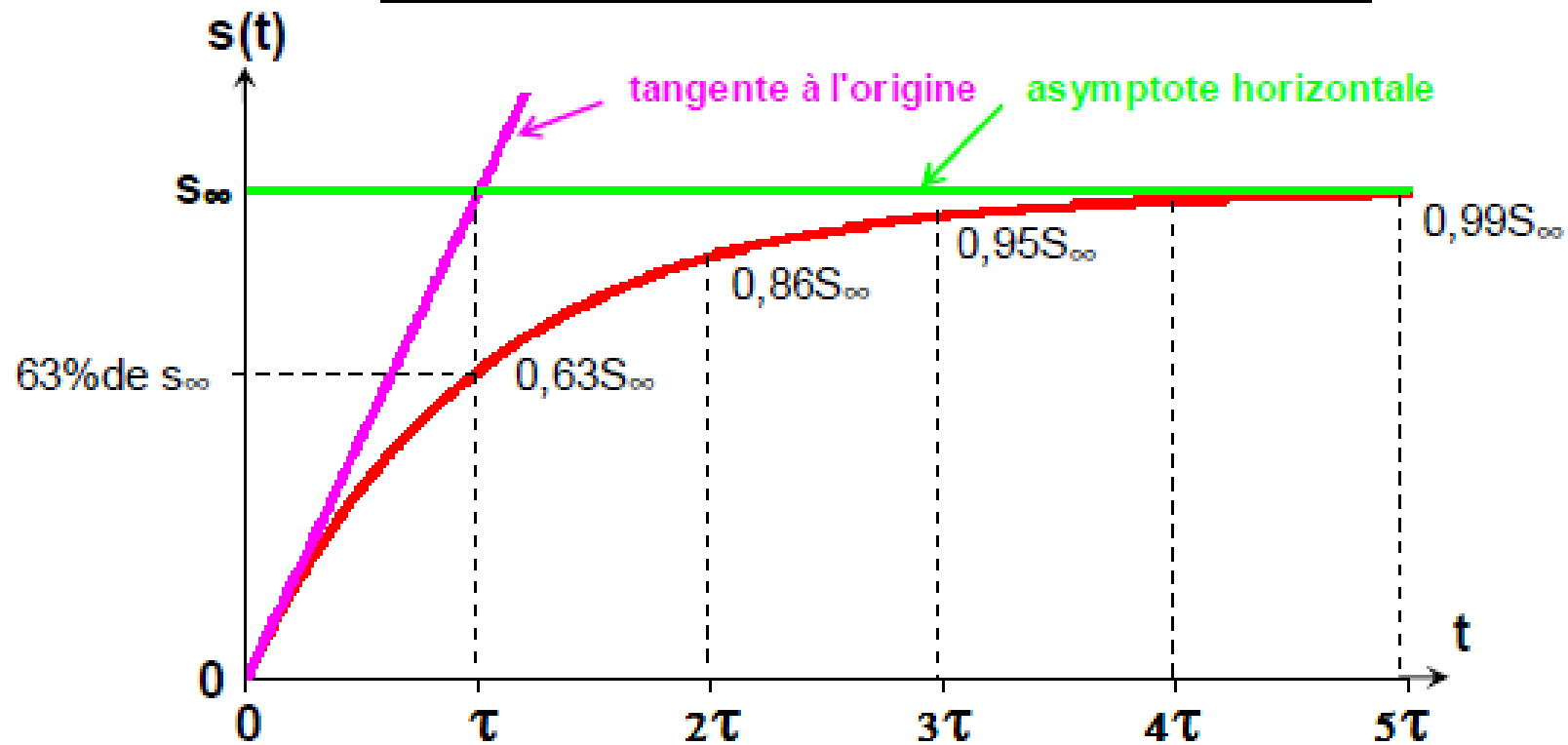
On rappelle que $\dot{s}(t)$ est la notation simplifiée de s' ou $\frac{ds}{dt}$.

La solution générale de l'équation est : $s(t) = A + B.e^{-t/\tau}$

Les constantes A et B seront déterminées en considérant $s(0)$ et $s(\infty)$.

Propriétés de la courbe de réponse à un échelon (1^o ordre)

Courbe générale $s(t)$ de réponse à un échelon
d'un système du 1^o ordre



Système du 2° ordre

Définition (limitée au cas de la réponse à un échelon)

Un système du 2° ordre d'entrée $\mathbf{e(t)}$ et de sortie $\mathbf{s(t)}$ sera régi par une équation différentielle du 2° ordre à coefficients constants :

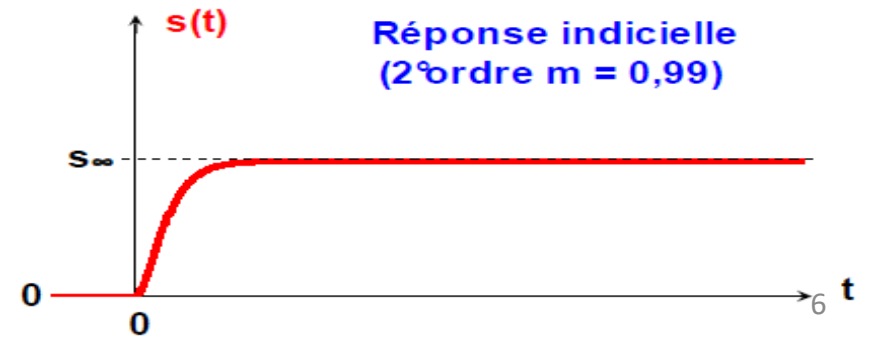
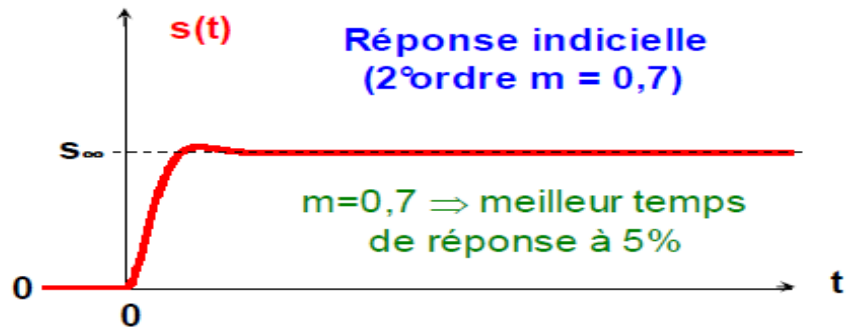
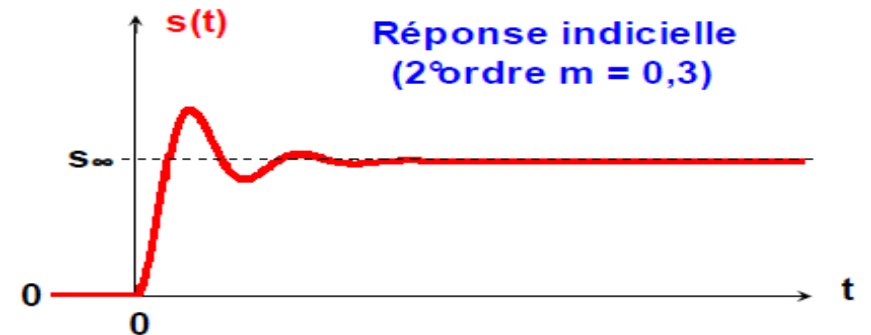
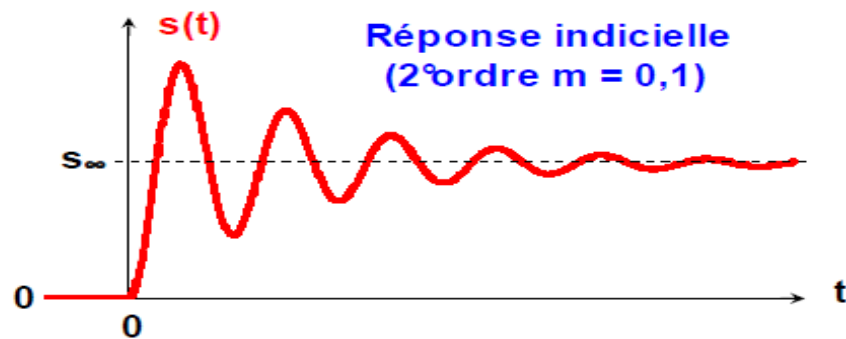
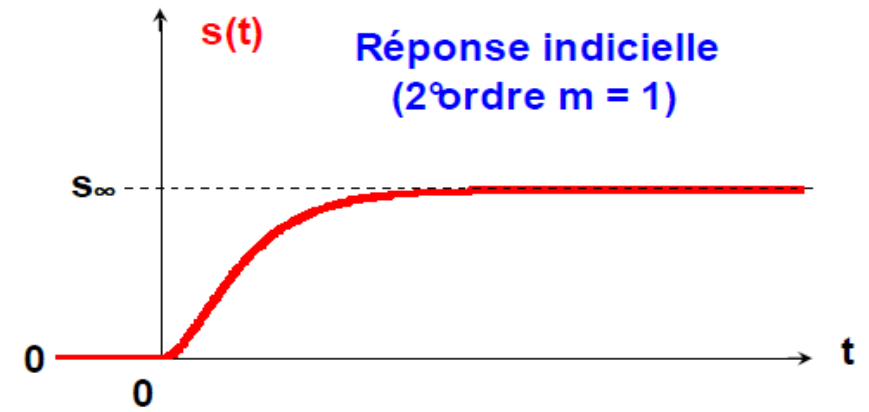
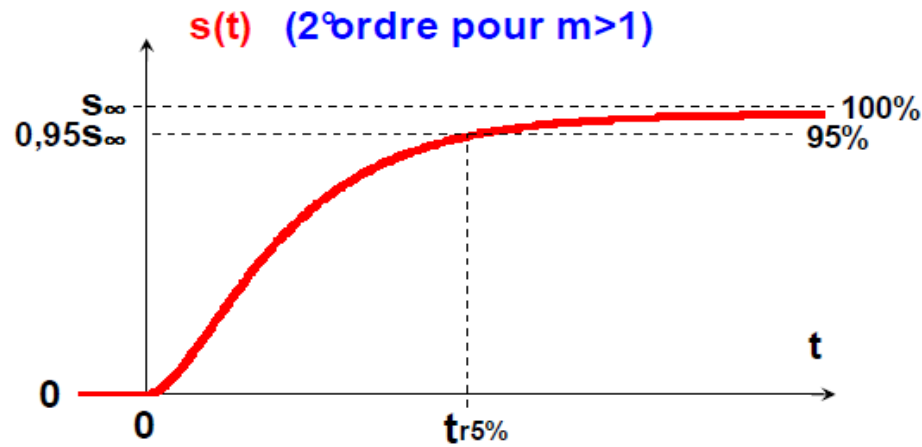
$$\frac{1}{\omega_0^2} \ddot{s}(t) + 2m \frac{1}{\omega_0} \dot{s}(t) + s(t) = f(t)$$

- $\mathbf{f(t)}$ est proportionnel au signal d'entrée $\mathbf{e(t)}$ et on aura $\mathbf{f(t) = s(\infty)}$ si le système est stable (plus de variations lorsque $t \rightarrow +\infty$).
- ω_0 est une constante qui caractérise la pulsation d'oscillation propre du système (pulsation propre).
- $\mathbf{m}$ est une constante qui caractérise l'amortissement du système (coefficient d'amortissement $\mathbf{m > 0}$).

On rappelle que $\dot{s}(t)$ est la notation simplifiée de s' ou $\frac{ds}{dt}$ et que $\ddot{s}(t)$ est la notation

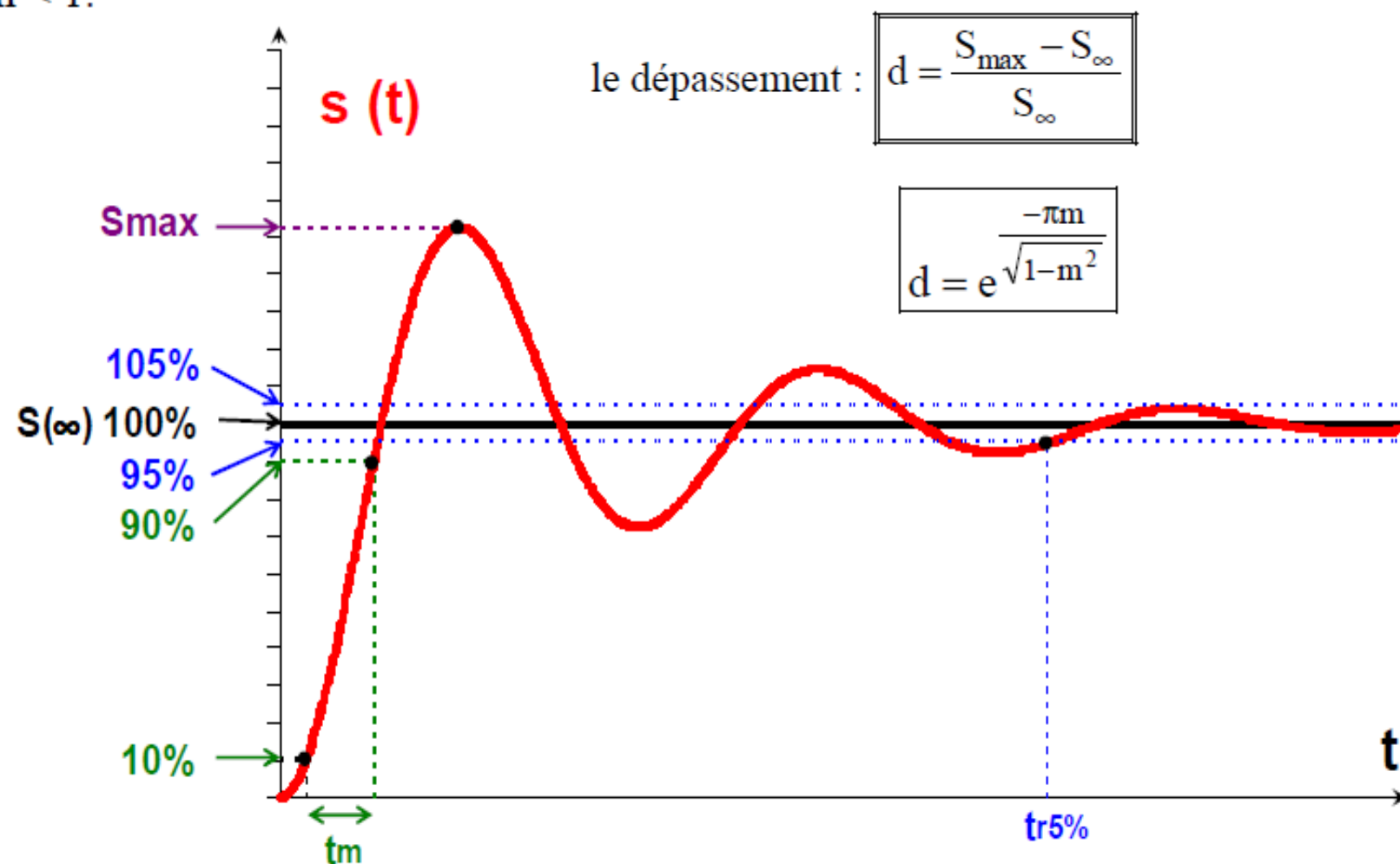
simplifiée de s'' ou $\frac{d^2s}{dt^2}$.

La solution générale de l'équation dépend de la valeur de m .



Propriétés de la courbe de réponse à un échelon (2° ordre avec $m < 1$)

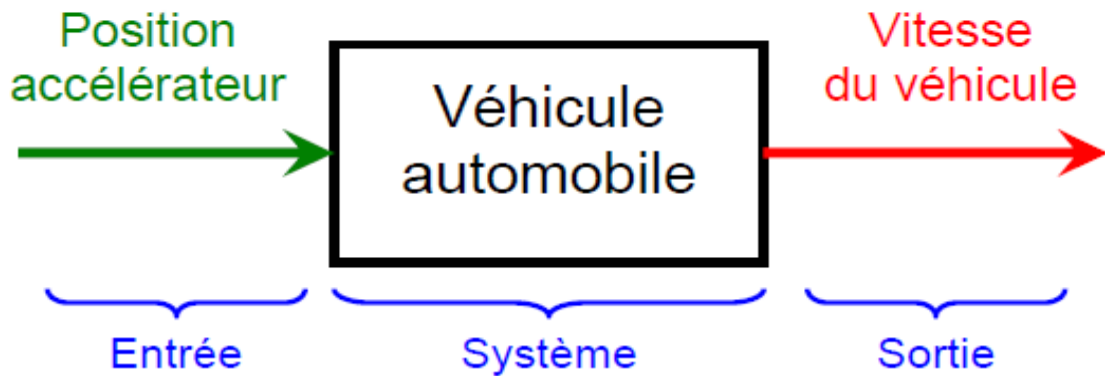
Le graphe ci-dessous représente la réponse à un échelon d'un système du 2° ordre avec $m < 1$.



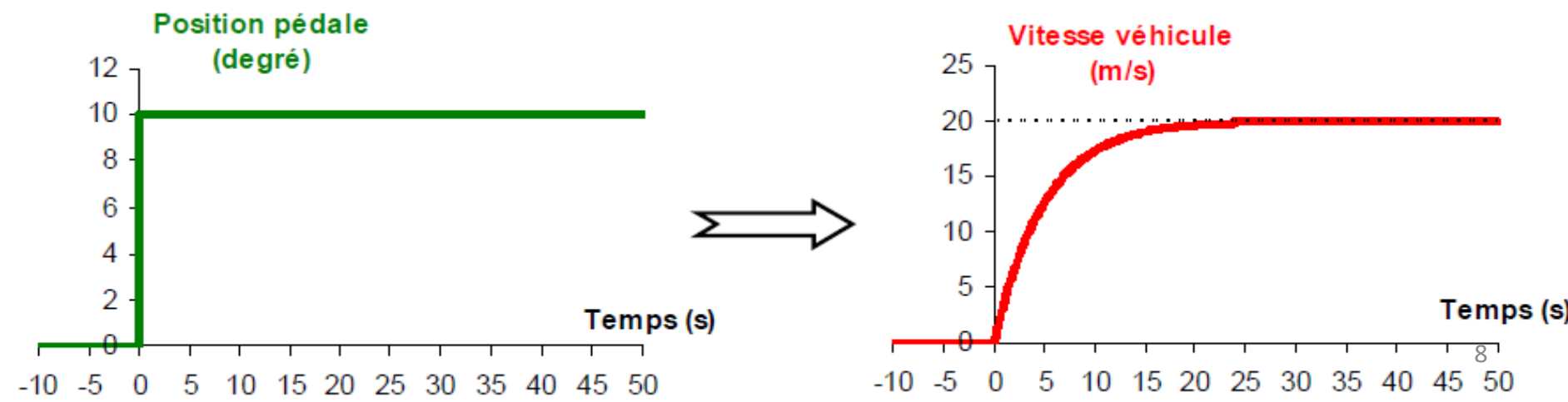
1- Exemple 1

Considérons le système constitué d'une automobile :

- l'entrée du système sera la position angulaire (en degré) de la pédale d'accélérateur,
- la sortie du système sera la vitesse du véhicule (en km/h).



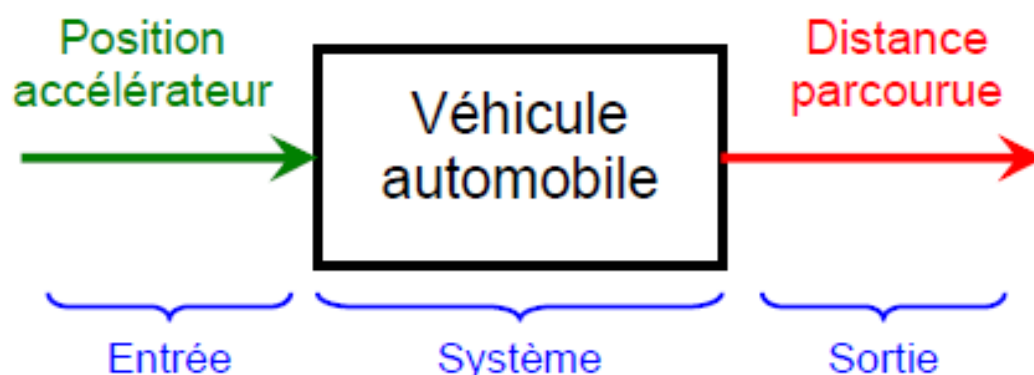
Observons l'évolution de la vitesse (sortie du système) lorsque le conducteur actionne brutalement la pédale d'accélérateur de 10° (entrée du système) :



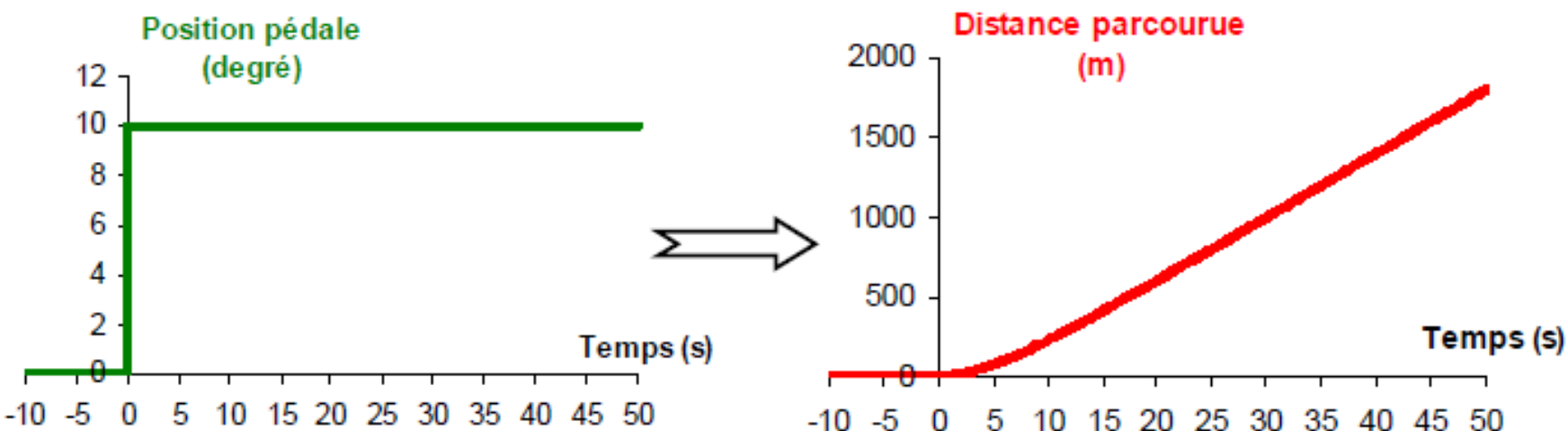
2- Exemple 2

Considérons toujours le système constitué d'une automobile :

- l'entrée du système sera la position angulaire, en degré, de la pédale d'accélérateur,
- la sortie du système est maintenant la distance parcourue par le véhicule.



Observons l'évolution de la distance parcourue (sortie du système) lorsque le conducteur actionne brutalement la pédale d'accélérateur de 10° (entrée du système) :

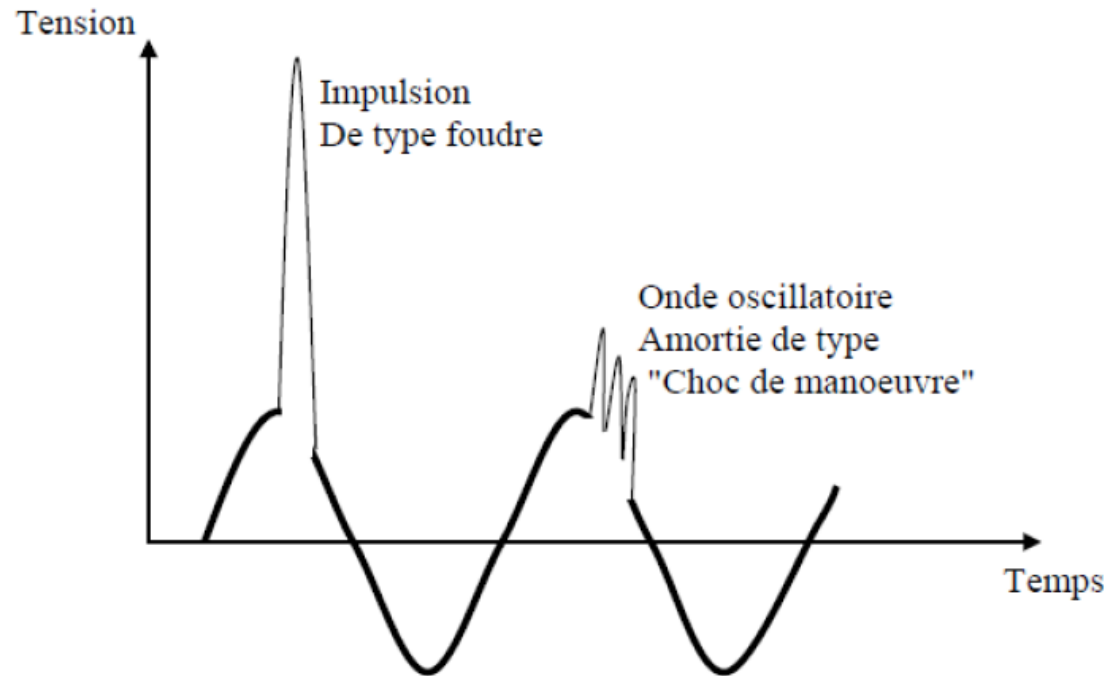


Chapitre 02: Généralités sur les surtensions électriques

Surtensions

On qualifie de surtension toute tension fonction du temps qui dépasse la tension crête de régime permanent à sa tolérance maximale.

On définit aussi une surtension comme une impulsion ou une onde de tension qui se superpose à la tension nominale du réseau. La figure ci-dessous montre un exemple de surtension:



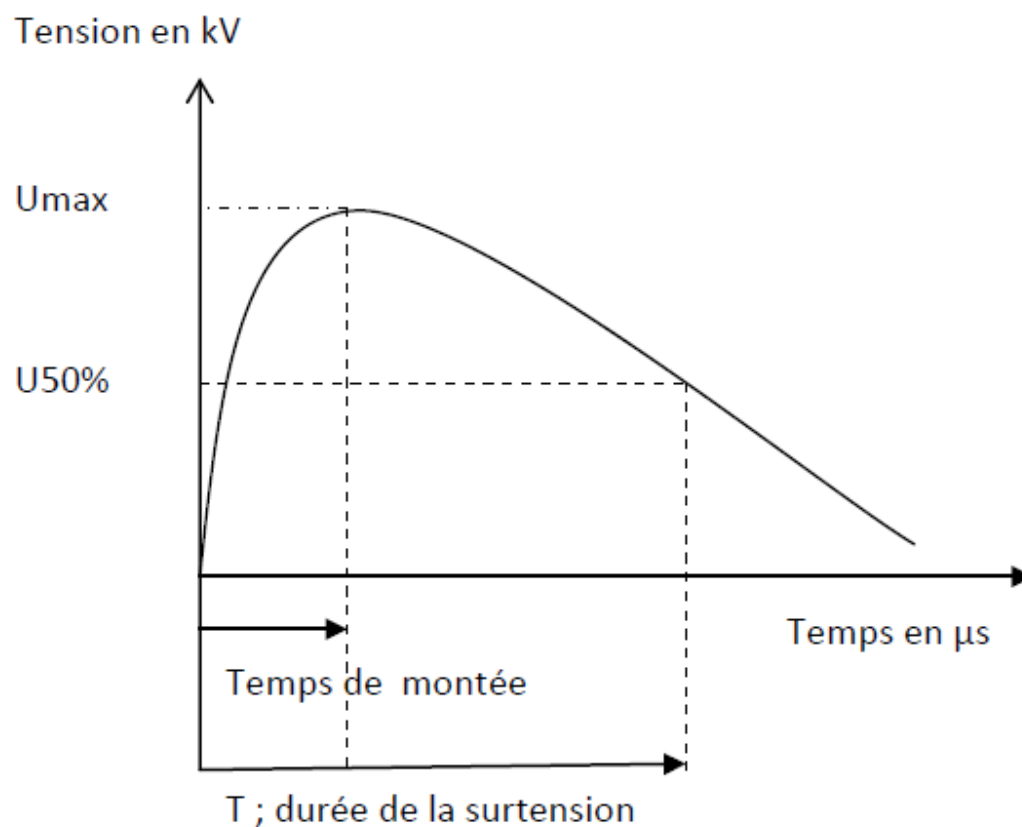
Sur cette courbe on voit deux types de surtensions caractérisées par une impulsion de type choc de foudre et une impulsion de type choc de manoeuvres.

Ce type de surtension est caractérisé par :

- Le temps de montée en (μs)
- Une pente S ($\text{kV}/\mu\text{s}$)

Caractéristiques d'une onde de surtension

Une surtension perturbe les équipements et produit un rayonnement électromagnétique. En plus, la durée de la surtension (T) cause un pic énergétique dans les circuits électriques qui est susceptible de détruire des équipements.



Classification des surtensions

Selon leur durée d'application, les surtensions sont classées :

- Les surtensions transitoires de durée inférieure à 0,1s en 50Hz comprenant les ondes de foudre et de manœuvres.
- Les surtensions temporaires de durée supérieure à 0,1s de nature périodique ou oscillatoire.

1. Les surtension temporaires:

Elles apparaissent lors de la modification brusque de la configuration du réseau ou lors d'un défaut à la terre. Les surtensions temporaires, ont une amplitude relativement non élevée ; elles sont de longue durée (quelques secondes) et de basse fréquence. En persistant sur le réseau pendant une période relativement longue. Parmi les causes on peut citer :

- Défauts entre phase et terre (déplacement du point du neutre);
- Déclenchement brusque d'une charge;
- Effet Ferranti provoqué par le fonctionnement à vide d'une ligne de grande longueur;
- Alimentation d'une charge capacitive au travers d'une impédance élevée ;
- Phénomène de ferrorésonance; etc.

2. Les surtensions transitoires

Les ondes transitoires sont caractérisées par les paramètres suivants :

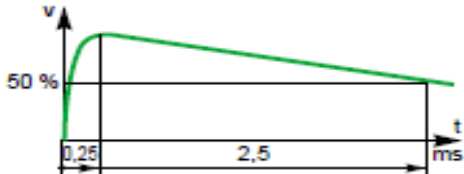
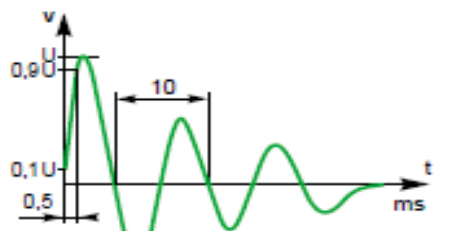
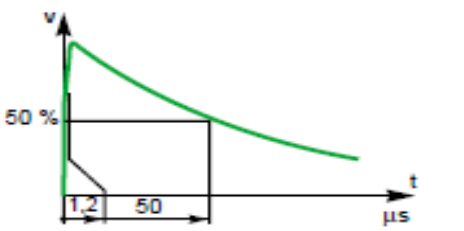
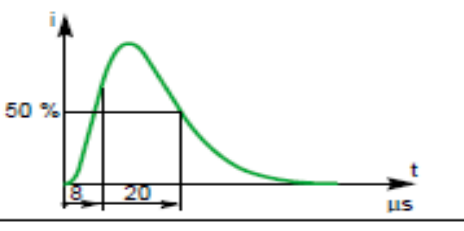
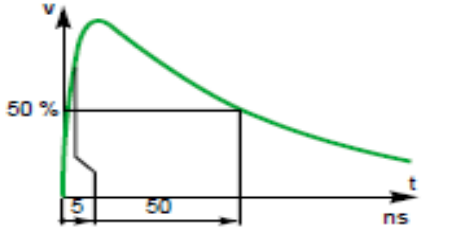
- Le temps de montée (T_{cr}) en μs ;
- La pente de montée mesurée en $kV/\mu s$ ou en $kA/\mu s$;
- La durée de la surtension (T_h) en μs correspondant à la descente à mi-amplitude.

Les surtensions transitoires sont classées en fonctions de leur origine en surtensions atmosphériques (foudre) et en ondes de manœuvres. Elles se superposent à la tension nominale.

2.1 Les surtensions de manœuvres

Les manœuvres d'interrupteurs ou de disjoncteurs entraînent des changements dans la configuration électrique des réseaux. Ces changements provoquent des surtensions plus ou moins élevées:

- Coupure des courants de ligne à vide, des câbles à vide ou de batteries de condensateurs;
- Coupure des faibles courants inductifs ou magnétisants (transformateurs à vide ou chargés par des inductances shunts);
- Mise sous tension des lignes;
- Rétablissement d'une ligne après défaut.

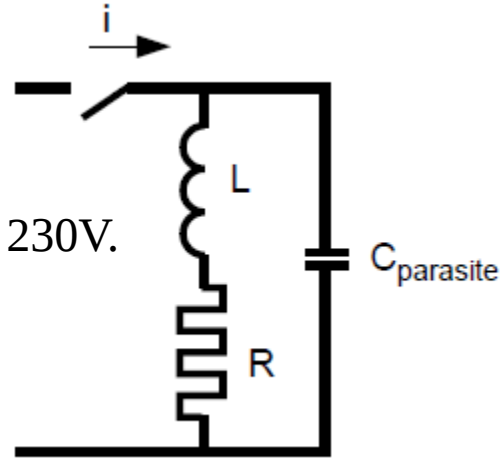
Origine	Type d'onde	Onde de test
■ manoeuvre	Onde longue amortie : 0,25 / 2,5 ms	a 
	Onde oscillatoire amortie récurrente : (100 kHz < f < 1 MHz)	b 
■ foudre	Onde de tension impulsionnelle récurrente : 1,2 / 50 μs	c 
	Onde de courant 8 / 20 μs	d 
■ appareillage BT, (ex. : fusion fusible)	Onde 5 / 50 ns	e 

Les principales formes d'ondes d'essai normalisées

Manœuvres de l'appareillage et fonctionnement des protections BT

Les bobines des relais et les contacteurs ont une impédance de caractère selfique, et interrompre un courant selfique provoque presque toujours des surtensions importantes. Dans le cas d'un relais, lorsque le courant est coupé brutalement par l'interrupteur K, l'énergie $\frac{1}{2} LI^2$ se transforme en énergie $\frac{1}{2} CV^2$ d'où une surtension :

$$\frac{1}{2} CV^2 = \frac{1}{2} LI^2 \rightarrow V = I \sqrt{\frac{L}{C}}$$

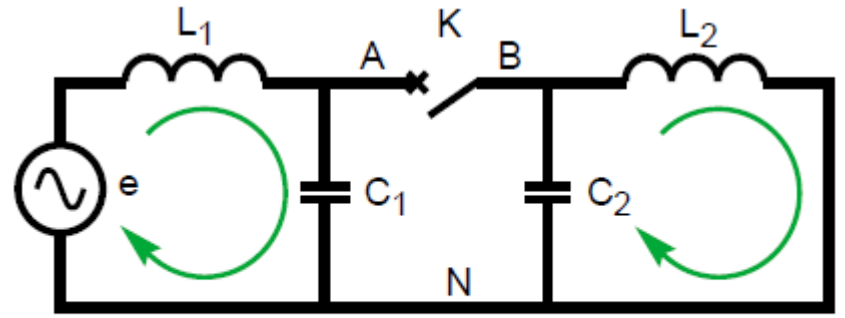


Les surtensions observées peuvent atteindre près de 10 kV sur un circuit 230V.

Sur le circuit monophasé de la , pris pour exemple, lorsqu'on ouvre l'interrupteur K, le courant continue à circuler dans L_2 avec, aux bornes de C_2 , la tension V_{BN} :

$$V_{BN} = i \sqrt{\frac{L_2}{C_2}} \sin \omega_2 t$$

$$V_{AN} = i \sqrt{\frac{L_1}{C_1}} \sin \omega_1 t$$



L_1, C_1 = inductance et capacité du réseau amont,
 L_2, C_2 = inductance et capacité du réseau aval.¹⁵

2.2 Surtensions d'origine atmosphérique

Elles ont pour origine des décharges atmosphériques de foudre. Les surtensions engendrées se propagent guidées par la ligne avec des vitesses proches de la vitesse de la lumière.

Le courant de foudre peut s'écouler directement dans des circuits électriques provoquant des différences de potentiel en raison de l'impédance de ces derniers.

2.2.1 Le coup de foudre direct

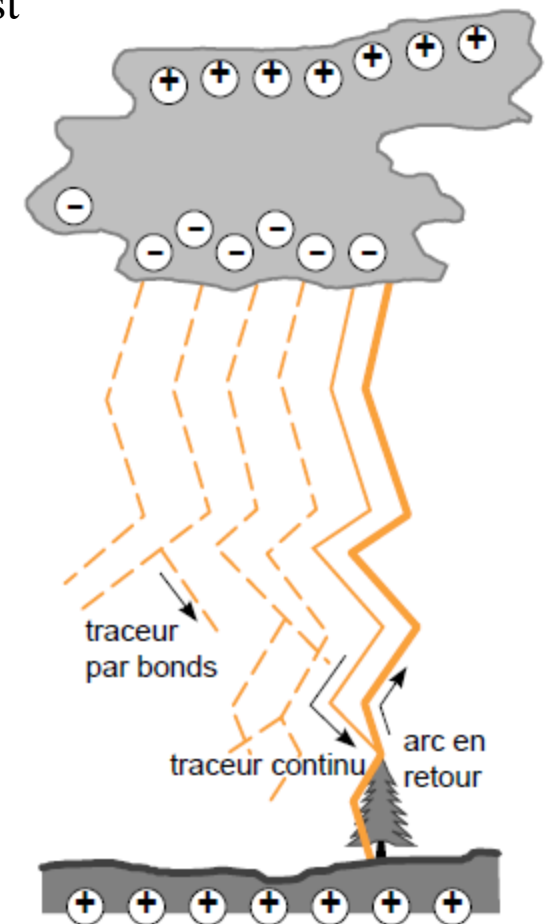
Dans le domaine de l'électrotechnique, le coup de foudre «direct» est celui qui atteint directement les installations électriques (lignes aériennes, postes, ...).

Son énergie est importante puisque 50 % des coups de foudre dépassent 25 kA crête et 1% sont au-delà de 180 kA.

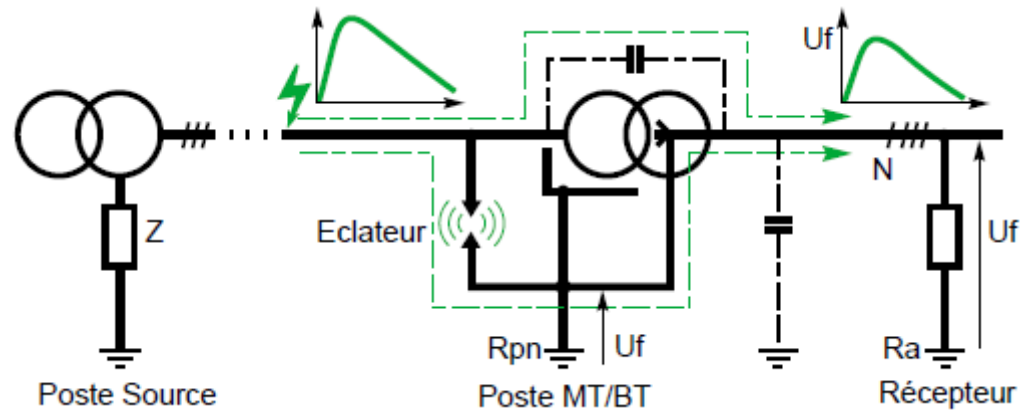
2.2.2 Le coup de foudre indirect

C'est la manifestation à distance d'un coup de foudre direct.

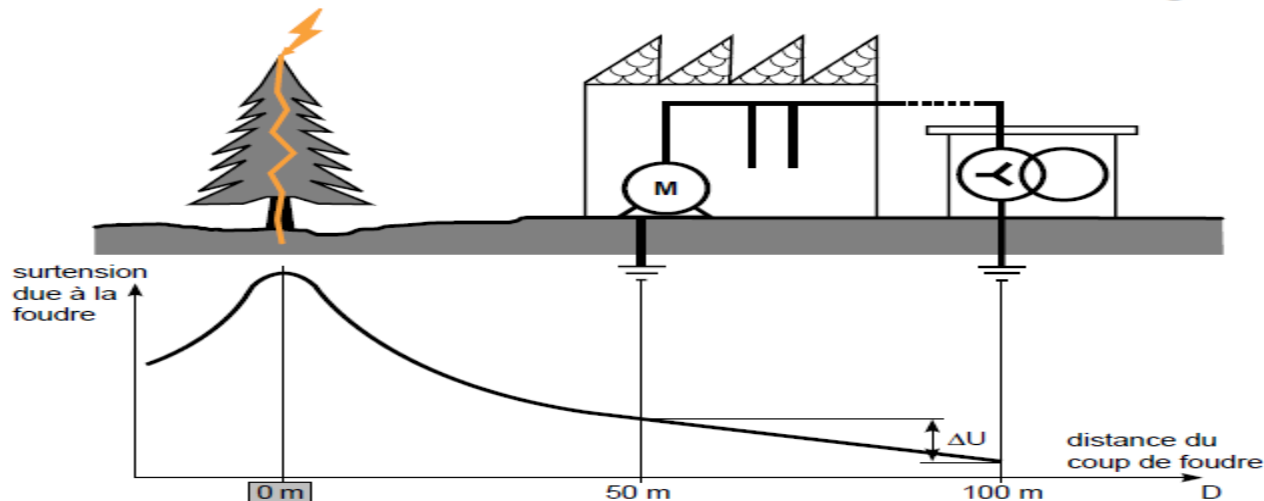
Ses effets sont ici abordés selon trois aspects : les surtensions conduites, l'élévation du potentiel de terre, et le rayonnement.



Surintensités conduites: font suite à un impact sur des lignes aériennes. Elles peuvent atteindre plusieurs centaines de kV. Si l'impact a lieu sur un réseau MT, la transmission par le transformateur à la BT se réalise par couplage capacitif.



Elévation du potentiel de terre : a lieu lorsque le courant de foudre est écoulé par le sol. Cette variation du potentiel de terre touche les installations lorsque l'impact de la foudre au sol est à proximité de leurs prises de terre. Ainsi à une distance donnée D du point d'impact de la foudre, le potentiel U s'exprime par l'équation:

$$U \approx 0,2 \cdot I \cdot \rho_s / D$$


I : courant de foudre,
 ρ_s : résistivité du sol.

transmission des surtensions à travers les transformateurs

Transfert magnétique

Pour un transformateur MT/BT, pas ou peu chargé, les surtensions de foudre et de manœuvre sont transmises au secondaire en fonction du rapport de transformation auquel on applique un coefficient correcteur. Ce coefficient est en général inférieur à 1,3 pour l'onde de foudre 1,2 / 50 μ s, et il ne dépasse que rarement 1,8 pour les surtensions de manœuvre selon l'onde 250 / 2500 μ s.

Transfert capacitif

Il dépend de la disposition des enroulements primaire et secondaire par rapport à la masse du transformateur. Généralement pour chaque « colonne » l'enroulement BT est proche du noyau et l'enroulement MT en est relativement éloigné puisque placé autour de l'enroulement BT.

La surtension transmise au secondaire, par les différentes « capacités parasites » du transformateur, se calcule par la formule :

$$U_s = U_e \frac{C_{BT / Masse}}{C_{HT / Masse} + C_{BT / Masse}}$$

