

# Bus de terrain

Technologie des réseaux de communication  
2. Caractéristiques de médias de transmission

## Thèmes abordés

- Caractéristiques des câbles électriques
- Fibre optique.
- Transmission hertzienne.

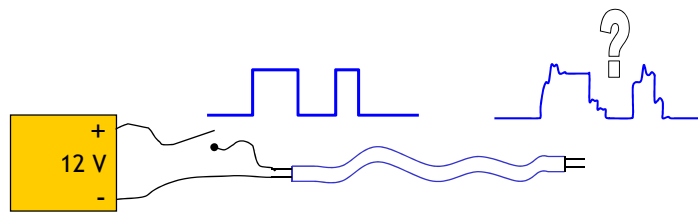
## heig-vd

### Support physique électrique

Le fil de cuivre simple - principe de transmission

- Rappel

- On envoie une tension de 0 ou 12 V dans un câble à 2 conducteurs.
- On s'attend à retrouver un signal 0 ou +12 V à la sortie.



## heig-vd

### Support physique électrique

Impédance caractéristique

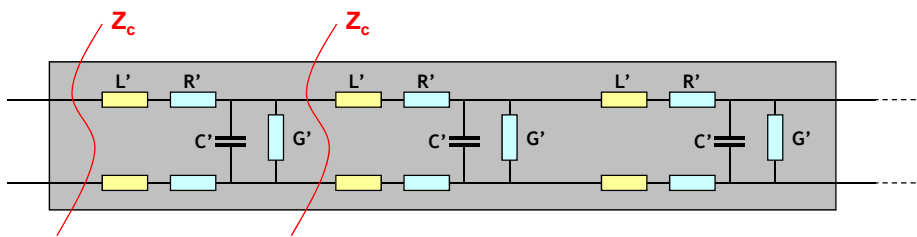
- l'impédance caractéristique d'un câble  $Z_c$ 
  - Correspond à l'impédance qu'aurait la ligne non fermée si elle possédait une longueur infinie
  - Impédance vue à l'entrée d'un câble de longueur infinie.
  - L'impédance entre les conducteurs est loin d'être infinie !
  - Cette propriété s'applique aussi aux câbles de longueur finie.
- Origine de cette impédance
  - Composante inductive du câble : inductance du conducteur.
  - Composante capacitive du câble : capacité entre les conducteurs.

# heig-vd

## Support physique électrique

Impédance caractéristique

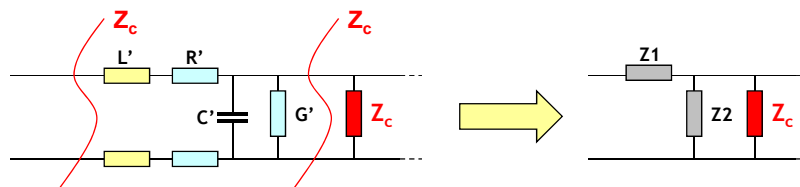
- Caractéristiques physiques du câble
  - $R'$  = résistance spécifique [ $\Omega/m$ ]
  - $L'$  = inductance spécifique [ $H/m$ ]
  - $G'$  = conductance spécifique [ $1/\Omega m$ ] ou [ $S/m$ ]
  - $C'$  = capacité spécifique [ $F/m$ ]



# heig-vd

## Support physique électrique

Impédance caractéristique - principe de calcul



$$Z_1 + Z_2 // Z_c = Z_1 + \frac{Z_2 \cdot Z_c}{Z_2 + Z_c} = \frac{Z_1 \cdot (Z_2 + Z_c) + Z_2 \cdot Z_c}{Z_2 + Z_c} = Z_c$$

$$Z_1 \cdot (Z_2 + Z_c) + Z_2 \cdot Z_c = Z_c \cdot (Z_2 + Z_c)$$

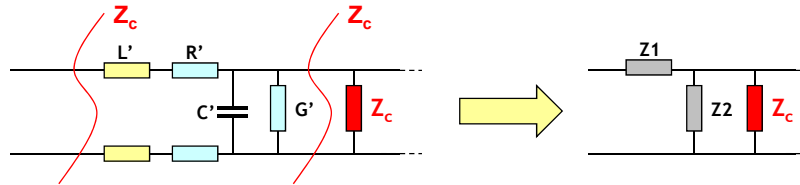
$$Z_c^2 - Z_1 \cdot Z_c - Z_1 \cdot Z_2 = 0$$

$$Z_c = \frac{Z_1 \pm \sqrt{Z_1^2 + 4 \cdot Z_1 \cdot Z_2}}{2}$$

## heig-vd

### Support physique électrique

Impédance caractéristique - calcul sur un élément de longueur dx



$$Z_1 = (R' + j\omega L') \cdot dx$$

$$Z_2 = \frac{1}{(G' + j\omega C') \cdot dx}$$

$$Z_c = \frac{(R' + j\omega L') \cdot dx \pm \sqrt{(R' + j\omega L') \cdot dx^2 + 4 \cdot \frac{(R' + j\omega L') \cdot dx}{(G' + j\omega C') \cdot dx}}}{2}$$

$$\lim_{dx \rightarrow 0} (Z_c) = \pm \sqrt{\frac{R' + j\omega L'}{G' + j\omega C'}}$$

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

## heig-vd

### Support physique électrique

Impédance caractéristique - conséquence

- En continu
  - Le comportement est purement résistif

$$Z_c = \sqrt{\frac{R'}{G'}}$$

- Lorsque la fréquence du signal augmente
  - Les composantes inductives et capacitives deviennent prépondérantes

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

- Remarque
  - $Z_c$  est aussi l'impédance qu'on mesurera aux bornes d'une ligne finie mais terminée par une impédance de terminaison de valeur identique à l'impédance caractéristique  $Z_c$  du câble.

## heig-vd

### Support physique électrique

Impédance caractéristique - atténuation du signal

- Si l'on connecte une impédance égale à  $Z_c$  à l'extrémité d'une ligne de longueur  $l$ , et que l'on en calcule la fonction de transfert, on obtient :

$$\frac{U_{out}}{U_{in}} = e^{-\gamma' \cdot l} = e^{-(\alpha' + j\beta') \cdot l} = e^{-\alpha' \cdot l} \cdot e^{-j\beta' \cdot l}$$

- la ligne provoque une atténuation donnée par

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

relation qui se calcule à partir de la théorie des lignes

## heig-vd

### Support physique électrique

Impédance caractéristique - atténuation

- le 1<sup>er</sup> terme traduit une atténuation
  - $\alpha'$  est le coefficient d'affaiblissement linéique
  - l'atténuation s'exprime en [dB].

$$20 \log_{10} \left| \frac{U_{out}}{U_{in}} \right| = 20 \log_{10} e^{-\alpha' l} = -k \cdot l$$

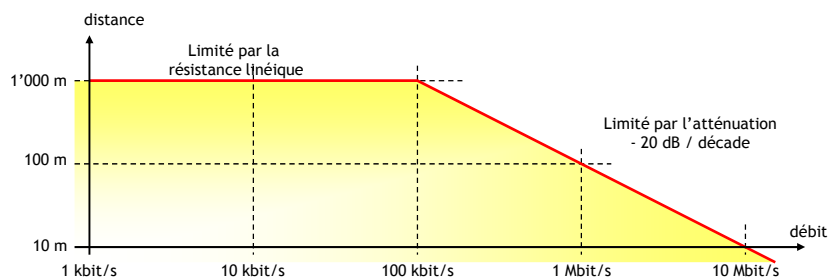
- $k$  : amortissement en dB / m
- -20 dB -> le signal est divisé par 10
- -40 dB -> le signal est divisé par 100
- ...
- le 2<sup>ème</sup> terme traduit un déphasage
  - $\beta'$  est le déphasage linéique [rad/m]

## heig-vd

### Support physique électrique

#### Impédance caractéristique - atténuation - exemple

- Ligne d'impédance caractéristique  $Z_c = 100 \Omega$
- Comportement en basses fréquences
  - ligne fermée sur son impédance caractéristique
  - si  $R' = 0,1 \Omega/m$ , l'atténuation à 1'000 m vaut -6 dB
- Comportement en hautes fréquences
  - si  $\gamma' = 0,5 \text{ dB} / 100 \text{ m}$  à 100 kbit/s,
  - l'atténuation à 1'000 m vaut 6 dB et décroît de -20 dB / décade



Bus de terrain - Caractéristiques des médias de transmission

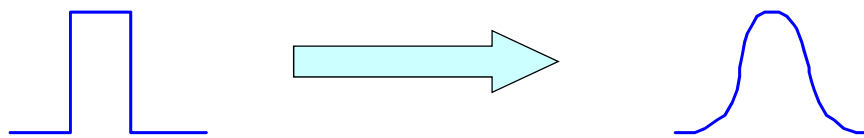
10

## heig-vd

### Support physique électrique

#### Impédance caractéristique - atténuation du signal

- Le signal subit une décroissance exponentielle au cours de son trajet.
- L'atténuation dépend de la fréquence.
  - Les différentes harmoniques d'un signal composé sont déformées de façon différente.
    - Les hautes fréquences sont plus atténuées.
    - Les hautes fréquences sont plus déphasées.
  - La forme du signal transmis est déformée.



Bus de terrain - Caractéristiques des médias de transmission

11

## heig-vd

### Support physique électrique

#### Réflexions

- Si on interrompt la ligne
  - Changement brutal d'impédance.
  - Phénomène de réflexion.



- L'amplitude du signal réfléchi est quantifiée par un coefficient
  - $Z_L$  : impédance de la charge (Load).
  - $Z_C$  : impédance du câble.

$$\Gamma = \frac{Z_L - Z_C}{Z_L + Z_C}$$

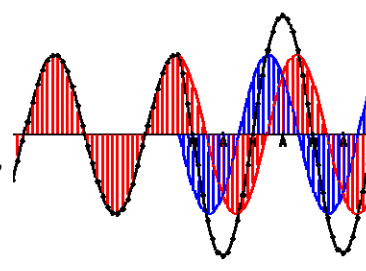
- 3 cas possibles
  - Si  $Z_L > Z_C$ , il y a une réflexion positive du signal.
  - Si  $Z_L = Z_C$ , il n'y a pas de réflexion.
  - Si  $Z_L < Z_C$ , il y a une réflexion négative du signal.

## heig-vd

### Support physique électrique

#### Ondes stationnaires

- Lorsqu'il y a réflexion du signal à l'extrémité d'un câble
  - Le signal réfléchi a la même période que le signal émis.
  - Il se superpose au signal émis.
- En chaque point du câble
  - La tension est la somme du signal émis et réfléchi
- Phénomène d'ondes stationnaires
  - En certains points, l'amplitude du signal est supérieure à l'amplitude initiale.
  - En d'autres points, l'amplitude est plus faible.
  - Si le coefficient de réflexion vaut 1, l'amplitude peut être nulle en certains points du câble !

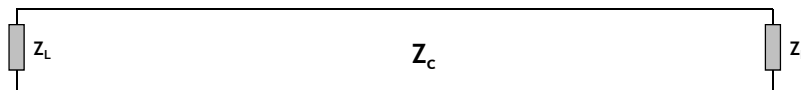


## heig-vd

### Support physique électrique

#### Adaptation d'impédance

- Pour éviter les réflexions
  - Il faut placer une résistance à chaque extrémité du câble.
  - Cette résistance doit avoir pour valeur l'impédance caractéristique du câble.
  - Ainsi, le coefficient de réflexion est nul.



- Dans le cas contraire
  - Un signal réfléchi se superpose au signal envoyé.
  - Plus le câble est long, plus le signal réfléchi est retardé.
  - Rappel : vitesse du signal électrique dans un conducteur
    - $2 \times 10^8$  m / s

## heig-vd

### Support physique électrique

#### Diaphonie



- Un câble est constitué de conducteurs séparés par un isolant
  - C'est donc par construction un condensateur.
  - Rappel - capacité d'un condensateur plan :  $C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{S}{e}$
  - Typiquement 10 à 100 pF par mètre de câble.
- Phénomène physique
  - Impédance entre conducteurs
  - Quand la fréquence augmente, l'impédance diminue.
  - Quand la longueur du câble augmente
    - les surfaces en regard augmentent
    - la capacité augmente
    - l'impédance diminue
- Effet indésirable
  - En bout de câble, les signaux sont mélangés.

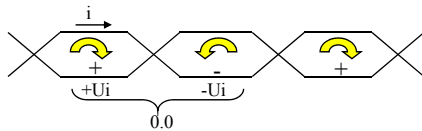
$$|Z| = \frac{1}{C \cdot \omega}$$

## heig-vd

### Support physique électrique

Comment réduire la sensibilité aux interférences - la paire torsadée

- Meilleure immunité aux bruits électromagnétiques
  - Comme le câble est torsadé, les champs électriques et magnétiques perturbateurs vont avoir une influence opposée sur chaque portion de câble.
  - Ces influences se compensent.
- Moins de rayonnement
  - Le rayonnement électrique et magnétique est inversé de proche en proche.
  - Les influences se compensent.



## heig-vd

### Support physique électrique

Comment réduire la sensibilité aux interférences - le blindage

- Enveloppe métallique mise à la masse
  - Principe de la cage de Faraday autour du câble.
  - Les champs électriques ne passent pas.
  - Exemple : feuille aluminisée enroulée autour des fils.
- Câble coaxial
  - Conducteur unique au centre du câble.
  - Tresse métallique entourant le câble sur toute sa longueur.
  - Les champs magnétiques ont une influence de même sens sur le blindage métallique et le conducteur central.
  - Le signal est transmis sur de grandes distances à l'abri des perturbations.



## Support physique électrique

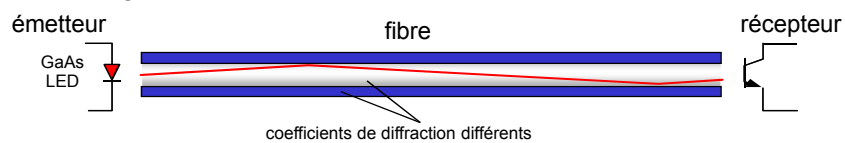
Connecteurs rencontrés avec les liaisons électriques



## Support physique optique

Principe de transmission

- Emission
  - Une diode électroluminescente (LED) ou un Laser est commandé par le signal à émettre.
- Transmission
  - La lumière modulée est transmise dans la fibre optique.
  - Du fait de l'indice de réfraction, la vitesse est  $2 \cdot 10^8$  m/s.
  - A l'autre extrémité de la fibre, la lumière atteint un photo-récepteur (photo diode, photo transistor).
  - Le signal est ainsi reconstitué



## heig-vd

### Support physique optique

#### Analyse

- Avantages

- Insensibilité totale aux perturbations électromagnétiques.
- Distances
  - Jusqu'à 100 km avec des fibres en verre.
  - 30 à 100 m avec des fibres plastique.
- Débit
  - Jusqu'à 40 GHz

- Inconvénients

- Ne permet de réaliser que des liaisons point à point.
- La connexion est plus délicate
  - La fibre doit être bien alignée avec l'émetteur et le récepteur.
- Moins bonne fiabilité des interfaces électro-optiques.

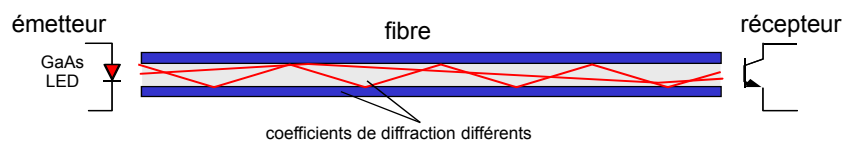
## heig-vd

### Support physique optique

#### Fibre multimode à saut d'indice

- Principe

- Le cœur est constitué d'un matériau homogène.
  - Exemple : plastique transparent.
- La gaine a un indice de réfraction nettement supérieur.
- Les rayons lumineux se réfléchissent sur la gaine.



## heig-vd

### Support physique optique

Fibre multimode à saut d'indice

- **Caractéristiques**

- diamètre du cœur : 50 ... 800  $\mu\text{m}$
- longueur d'onde : 560 ... 800 nm
- atténuation : 3 ... 10 dB/km
- portée : 0,5 ... 20 MHz·km
- utilisation type : bus de terrain

- **Avantages**

- Facile à produire, donc peu coûteux.

- **Inconvénients**

- les rayons lumineux qui effectuent beaucoup de réflexions arrivent en retard sur ceux qui se propagent dans l'axe
- Les signaux sont donc déformés à l'arrivée.

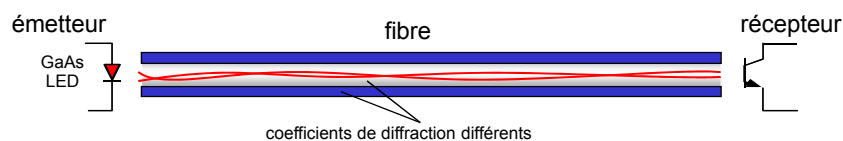
## heig-vd

### Support physique optique

Fibre multimode à gradient d'indice

- **Principe**

- Le cœur est constitué d'un matériau dont l'indice de réfraction décroît vers la gaine.
- Les rayons lumineux sont focalisés dans l'axe de la fibre.
- Les chemins optiques sont moins inégaux.



## heig-vd

### Support physique optique

Fibre multimode à gradient d'indice

- Caractéristiques

- diamètre du cœur : 50 ... 100  $\mu\text{m}$
- longueur d'onde : 800 ... 1'300 nm
- atténuation : 0,6 ... 3 dB/km
- portée : 1 GHz·km
- coûts : connecteurs plus délicats
- utilisation type : réseaux d'entreprise

- Avantages

- Encore assez économique.

- Inconvénients

- Connectique plus délicate.
- La fibre doit être bien alignée avec le récepteur.

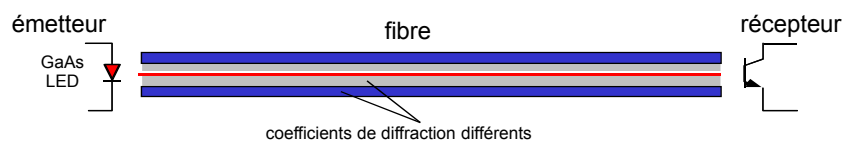
## heig-vd

### Support physique optique

Fibre monomode

- Principe

- Le cœur est constitué d'une superposition de couches très minces d'indice de réfraction croissant.
- Diamètre voisin de la longueur d'onde.
- Constitue un guide d'onde.
- Un seul trajet optique possible.



## heig-vd

### Support physique optique

Fibre multimode à gradient d'indice

- **Caractéristiques**

- diamètre du cœur : 2 ... 10  $\mu\text{m}$
- longueur d'onde : 800 ... 1'300 nm
- atténuation : 0,4 ... 2,3 dB/km
- portée : jusqu'à 100 GHz.km
- coûts : élevés
- utilisation type : télécommunications

- **Avantages**

- Très performante.

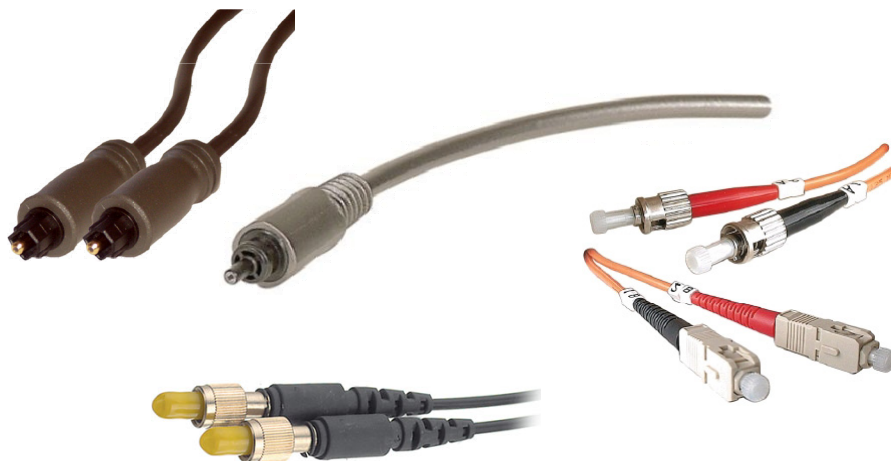
- **Inconvénients**

- Connectique très délicate.
- La fibre doit être bien alignée avec le récepteur.
- Coût de fabrication.

## heig-vd

### Support physique optique

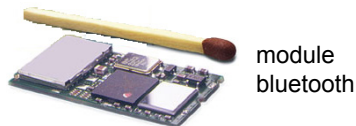
Connecteurs pour la fibre optique



### Les liaisons hertziennes

Bref aperçu

- Les radio transmissions se banalisent actuellement
  - Bluetooth
  - Wifi 802.11
- Utilisation très marginale en milieu industriel



### Qu'avons-nous appris ?

- Les caractéristiques des média physique
  - Conducteur électrique
  - Fibre optique
- Les précautions à prendre pour améliorer la transmission.
- Les problèmes de diaphonie avec plusieurs signaux.
- La difficulté à transmettre un signal propre.

## heig-vd

Vos questions

## heig-vd

