

Compétences

Voici les compétences que vous devez acquérir à l'issue de ce cours :

- Calculer le débit binaire d'une transmission numérique ;
- Calculer l'affaiblissement d'un signal lors d'une transmission ;
- Connaître le principe de la lecture d'un disque optique (CD, DVD ou Blu-Ray) en l'expliquant par les interférences ;
- Relier la capacité de stockage d'un disque optique au phénomène de diffraction.

## 1 Transmettre des données

### 1.1 La transmission : Libre ou guidée ?

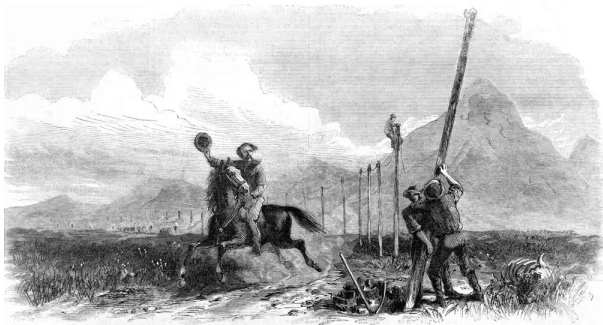
La propagation d'un signal est *libre* quand le signal peut se propager librement suivant toutes les directions.

Elle est *guidée* quand le signal est contraint de se déplacer dans un espace limité.

### 1.2 Transmission guidée par câble

Remarque

Les premiers systèmes de communication moderne comme le télégraphe ou le téléphone utilisaient initialement la propagation par câble.



Un **câble** est constitué d'au moins *deux fil électrique* réunis dans une même enveloppe. La grandeur physique qui transporte l'information est une grandeur électrique (tension ou intensité).

Il existe deux types de câbles utilisés pour la transmission : les câbles torsadés (figure 1) et les câbles coaxiaux (figure 2).

- les câbles *torsadés* sont utilisés pour des liaisons Ethernet, téléphoniques... Ils sont souvent blindés pour éviter le bruit.

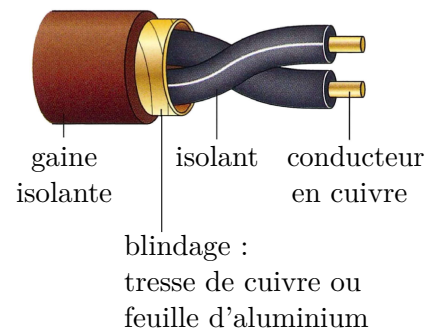


FIG. 1 – Le câble torsadé.

- les câbles *coaxiaux* sont encore parfois utilisés, notamment pour relier une antenne satellite ou hertzienne à un téléviseur. Leur constitution fait qu'ils ne rayonnent pas et sont peu sensibles au bruit.

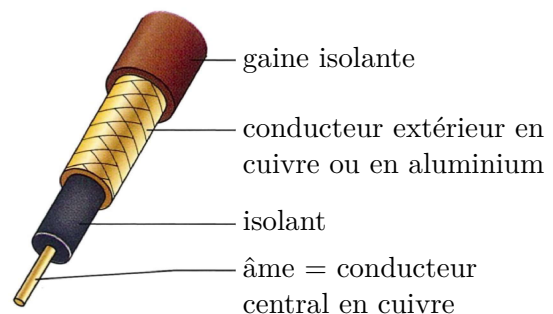
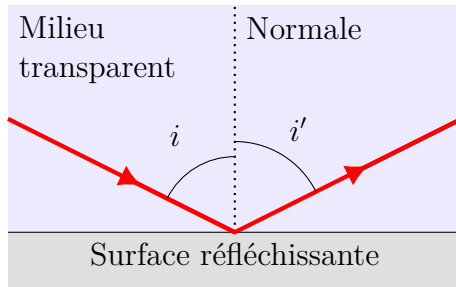


FIG. 2 – Le câble coaxial.

### 1.3 Transmission guidée par fibre optique

- Le phénomène de *réflexion* se produit lorsque la lumière est renvoyée par une surface réfléchissante et reste dans le même milieu.



#### Lois de Snell-Descartes pour la réflexion

**Première loi** : les rayons incidents et réfléchis sont situés dans le plan d'incidence.

**Seconde loi** : les angles d'incidence  $i$  et de réflexion  $i'$  sont égaux :  $i = i'$ .

- Le phénomène de *réfraction* se produit lorsque la lumière traverse la surface séparant deux milieux transparents différents (un dioptre). Elle subit en général un changement de direction.

#### Lois de Snell-Descartes pour la réfraction

**Première loi** : le rayon incident et le rayon réfracté sont contenus dans le plan d'incidence.

**Seconde loi** : les angles incident  $i_1$  et réfracté  $i_2$  vérifient la relation :

$$n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2$$

où  $n_1$  et  $n_2$  sont les indices de réfraction des milieux 1 et 2.

L'indice de réfraction d'un milieu transparent est noté  $n$ , tel que :

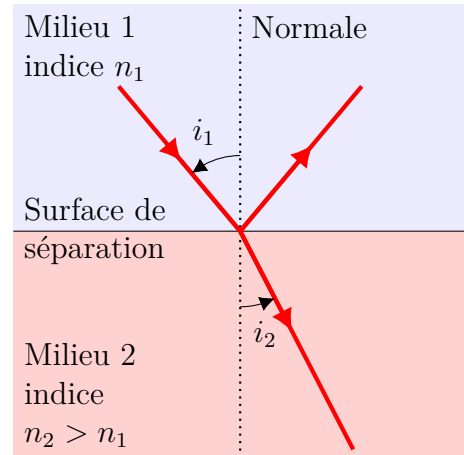
$$n = \frac{c}{v}$$

avec  $c$  la célérité de la lumière dans le vide et  $v$  dans le milieu.

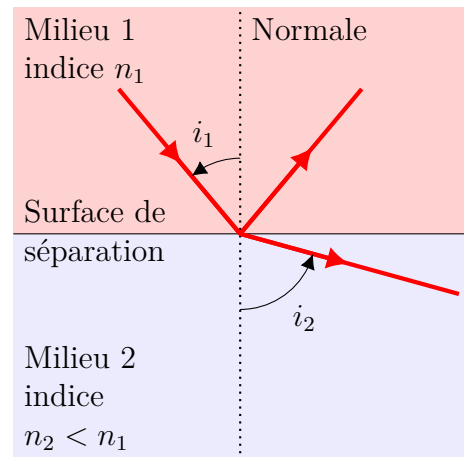
#### Remarque

La réfraction s'accompagne toujours d'une réflexion partielle.

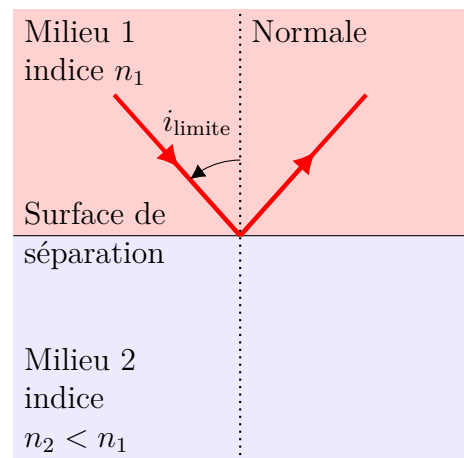
Lorsque la lumière passe dans un milieu plus réfringent (d'indice plus élevé  $n_2 > n_1$ ), le rayon se rapproche de la normale ( $i_2 < i_1$ ) :



Lorsque la lumière passe dans un milieu moins réfringent (d'indice plus faible  $n_2 < n_1$ ), le rayon s'éloigne de la normale ( $i_2 > i_1$ ) :



Dans ce dernier cas, à partir d'un certain angle d'incidence  $i_1$  supérieur à un angle limite, il y a **réflexion totale**, c'est-à-dire aucun rayon réfracté :



#### Exemple

Trouvez l'angle de réflexion totale pour un verre d'indice  $n = 1,5$ .

Une  **fibre optique**  se compose de matériaux transparents : un cœur, et une gaine d'indice optique plus faible. La lumière peut ainsi être piégée par  *réflexions totale*  successives à l'intérieur du cœur de la fibre.

On distingue trois types de fibres optiques :

- La fibre à  **saut d'indice**  : l'indice de réfraction varie brutalement entre le cœur et la gaine :

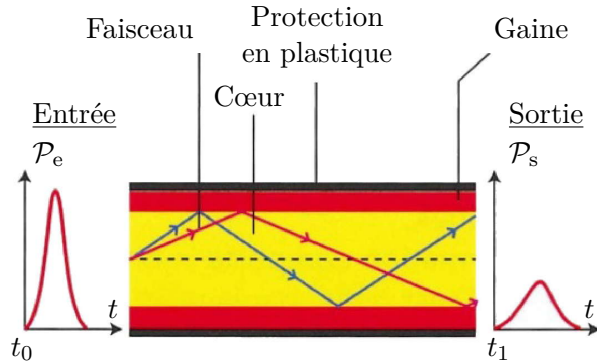


FIG. 3 – Fibre à saut d'indice

- La fibre à  **gradient d'indice**  : l'indice de réfraction varie continuellement entre le cœur et la gaine :

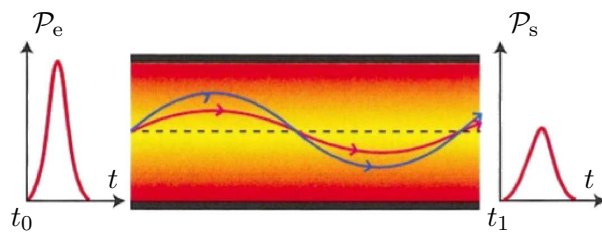


FIG. 4 – Fibre à gradient d'indice

- La fibre monomodale (= les autres sont « multimodales », voir plus loin) : le diamètre du cœur est de l'ordre de la longueur d'onde des radiations guidées :



FIG. 5 – Fibre monomodale

**Remarque**

Sur les figures 3, 4 et 5 précédentes, on a tracé la puissance en fonction du temps des signaux en entrée et en sortie, ce qui illustre les utilisations de chaque type de fibre.

Dans une fibre optique, le nombre de chemins que peut suivre la lumière est  *limité* . Ils correspondent au cas où les ondes lumineuses, dans la fibre, interfèrent de façon  *constructive* . Ces chemins sont appelés  **modes de propagation**  de la fibre.

L'  *atténuation*  de la fibre optique étant  **faible** , la transmission des signaux peut se faire sur  *de très longues distances* . De plus, dès lors que la fibre comporte une gaine opaque, elle est totalement insensible au bruit électromagnétique ambiant !

### 1.4 Transmission libre par ondes hertziennes

La transmission hertzienne est une transmission libre, entre une antenne émettant une onde électromagnétique et une antenne réceptrice (téléphonie cellulaire, radio, télévision, réseau WiFi...).

Les ondes hertziennes appartiennent ainsi à la famille des ondes électromagnétiques, dans un domaine de longueurs d'onde entre 1 mm et 30 km (c'est large!) — c'est-à-dire des fréquences entre 10 Hz et 300 GHz !

Une  **information**  peut ainsi être transmise dans l'air (ou même dans le vide!), en utilisant une  *onde électromagnétique*  de fréquence élevée comme support.

**Remarque**

Pourquoi de fréquence élevée? Parce que l'atténuation est alors beaucoup plus faible qu'à basse fréquence.

On va donc créer une onde de  **haute fréquence** , sur laquelle on va  *superposer*  le signal à transmettre, typiquement le signal  *analogique*  issu d'un microphone ou le signal  *numérique*  issu d'un convertisseur analogique numérique (CAN). Cette  *superposition*  est appelée  *modulation* .

**Définition**

Un signal analogique sinusoïdal peut être représenté par la formule :

$$U(t) = U_m \cos(2\pi ft + \varphi)$$

- $U(t)$  est la valeur du signal, fonction du temps  $t$ , typiquement la tension en volt appliquée sur l'antenne émettrice ou reçue sur l'antenne réceptrice ;
- $U_m$  est l'amplitude du signal ;
- $f$  est la fréquence du signal ;

—  $\varphi$  est la phase à l'origine du signal, c'est-à-dire le décalage horizontal de l'axe des temps, qui dépend de l'origine des temps  $t = 0$ .

On pourra s'étonner que tout d'un coup on ne discute que du cas d'un **signal sinusoïdal** ; en fait il s'agit d'un cas particulier très général, car tout signal, quelle que soit sa forme, peut être décomposé en une somme de signaux sinusoïdaux (décomposition en série de Fourier, qui permet de trouver l'amplitude et la fréquence de chaque composante du signal).

**a.** Soit l'émission radiophonique « Radio Campus », dont la fréquence de la porteuse est  $f = 93,3$  MHz, en modulation de fréquence (FM). Calculez la largeur de spectre  $\Delta f$  occupée par la radio, pour transmettre les sons (si possible, les plus incongrus possible), et donnez les limites basse et haute de la bande de fréquence occupée. Soyez large !

*Solution* :  $\Delta f = 20$  kHz pour le signal électrique capté par le microphone ; limites haute  $f + \Delta f = 93,32$  MHz et base  $f - \Delta f = 93,28$  MHz.

**b.** L'émission la plus proche en fréquence sur Clermont-Ferrand est « Radio Classique », de porteuse  $f = 92,6$  MHz. Les deux émissions risquent-elles de se mélanger, en considérant que l'émission FM est en *double bande* ?

*Solution* : Aucun risque. Placer deux stations si dissemblables à si peu d'écart en fréquence est néanmoins cocasse.

On distingue alors trois types de **modulation** :

— la modulation d' *amplitude* (AM pour Amplitude Modulation) : on ajoute le signal à transmettre sur l'amplitude  $U_m$  du signal haute fréquence, cette amplitude n'est alors plus constante, mais fonction du temps ;

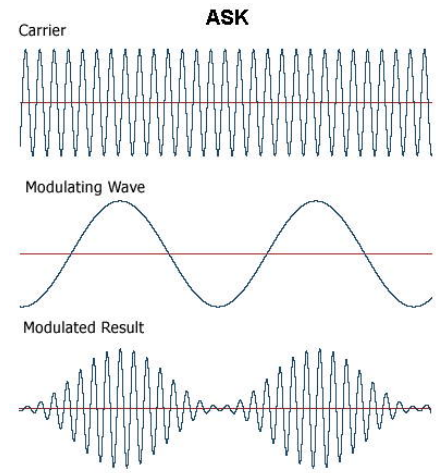


FIG. 6 – Modulation d'amplitude.

— la modulation de *fréquence* (FM pour Frequency Modulation) : on ajoute le signal à transmettre sur la fréquence  $f$  du signal haute fréquence, fréquence qui n'est alors plus constante, mais fonction du temps ;

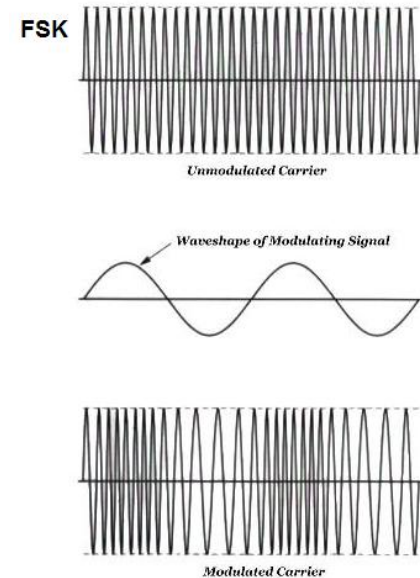


FIG. 7 – Modulation de fréquence.

— la modulation de *phase* : on ajoute le signal à transmettre sur la phase à l'origine  $\varphi$  du signal haute fréquence, phase qui n'est alors plus constante, mais fonction du temps.

Le signal de haute fréquence porte le nom de **porteuse**. Le signal à transmettre est le signal **modulant**. Avant l'émission par l'antenne émettrice, le signal est modulé ; après réception par l'antenne réceptrice, le signal est démodulé.

## 2 Qualité d'une transmission

### 2.1 Le débit binaire

Lors de la transmission d'un signal numérisé, il existe trois paramètres pertinents :

1. le nombre  $n$  de *bit* utilisés ;
2. la fréquence d' *échantillonnage*  $f_e$  ;
3. le nombre  $N$  de *signaux* numérisés à transmettre.

#### Définition

Le débit binaire  $D$  est le nombre de bit transféré . Il s'exprime en  $\text{bit} \cdot \text{s}^{-1}$  ou bps et est la relation :

$$D = N \cdot n \cdot f_e$$

$N$  nombre de signaux ;

$n$  nombre de bit

$f_e$  fréquence d'échantillonnage (en Hz).

Plus le débit binaire est important, plus le signal numérique transmis contient d' *informations* .

#### Définition

Si l'on transmet  $n$  bit  $\Delta t$ , le débit  $D$  s'exprime

$$D = \frac{n}{\Delta t}$$

Les deux formules de calcul du débit binaire  $D$  sont équivalentes, on utilisera l'une ou l'autre, selon les données (exemples ci-dessous).

- c.** Quel est le débit binaire d'un CD audio sur 2 voies (son stéréo) échantillonné sur 16 bits une fréquence de 44 100 Hz ?

$$D = N n f_e$$

$$D = 2 \times 44\,100 \times 16 = 1,41 \text{ Mbit} \cdot \text{s}^{-1}.$$

- d.** Un fichier de 200 Mo est téléchargé sur internet à  $12,0 \text{ Mbit} \cdot \text{s}^{-1}$ . Quelle est la durée du téléchargement ?

Un octet est formé de huit bits, donc la taille du fichier est 200 Mo soit  $200 \times 8 = 1\,600 \text{ Mbit}$ .

Il faut donc :  $\frac{1\,600}{12,0} = 133 \text{ s}$  pour télécharger le fichier.

### 2.2 Compression des données

Dans le cas de signaux vidéo, ou lorsque le mode de diffusion ne permet pas de gérer de tels débits (pour des raisons de taille ou de vitesse de traitement), on a recours à la *compression* du signal numérique, afin qu'il contienne moins de bits.

### 2.3 Les perturbations

La transmission de signaux peut s'accompagner de différentes **perturbations**, comme :

- la *distorsion* du signal (modifications de la fréquence pendant la transmission) ;

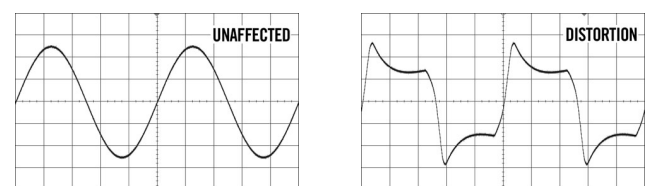


FIG. 8 – Distorsion d'un signal.

- l'apparition de *bruit* (signaux aléatoires qui se superposent au signal transmis) ;

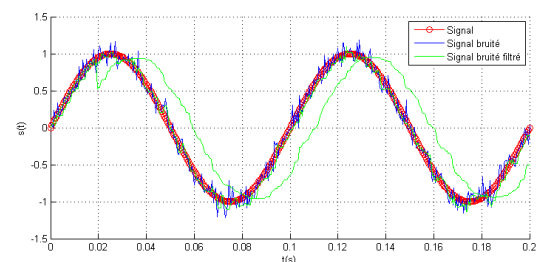


FIG. 9 – Bruit blanc sur un signal sinusoïdal.

- l' *atténuation* du signal.



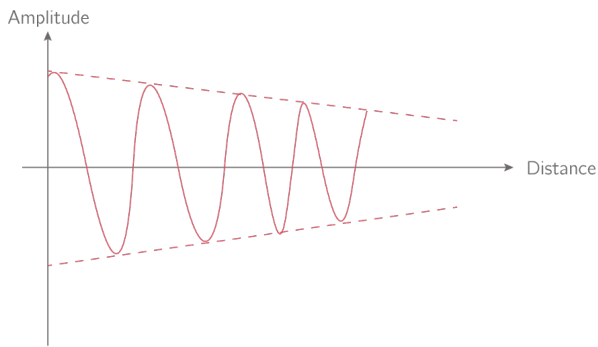


FIG. 10 – Atténuation du signal.

## 2.4 L'atténuation

L'atténuation d'un signal est l'affaiblissement de l'amplitude du signal au cours de la transmission.

On note  $P_e$  la puissance du signal à l'entrée et  $P_s$  sa puissance à la sortie du guide.

En pratique, on utilise une échelle logarithmique pour le mesurer et on l'exprime en décibel (dB) :

### Définition

L'atténuation ou *affaiblissement*  $A$  est lié au rapport  $P_e/P_s$ .

$$A = 10 \log \frac{P_e}{P_s}$$

## 2.5 Le coefficient d'atténuation linéique

L'atténuation s'explique par la perte d' *énergie* du signal au cours de sa propagation. Elle dépend donc de la distance  $L$  parcourue par celui-ci.

### Définition

Le *coefficient d'atténuation linéique*  $\alpha$ , en  $\text{dB} \cdot \text{m}^{-1}$ , est défini par :

$$\alpha = \frac{A}{L}$$

### Exemples

- Le câble coaxial utilisé dans l'installation des antennes satellites a un coefficient d'atténuation  $\alpha = 0,2 \text{ dB} \cdot \text{m}^{-1}$ .



FIG. 11 – Câble coaxial typique.

- Les fibres optiques multimodes standard, utilisées dans le déploiement d'internet haut débit, offrent une atténuation de  $3,5 \text{ dB} \cdot \text{km}^{-1}$ .



FIG. 12 – Baie de raccordement des fibres optiques. Chaque élément correspond à un abonné.

- e. Comparez les deux modes de propagation guidée précédents.

Pour lutter contre l'atténuation des signaux, on place régulièrement le long du canal de transmission des dispositifs *ré* qui vont régénérer le signal.

- f. Un canal de transmission a un coefficient d'atténuation de  $7,9 \text{ dB} \cdot \text{km}^{-1}$ . La puissance mesurée à l'entrée est  $P_e = 100 \text{ mW}$ . Le récepteur impose que la puissance de sortie ne soit pas inférieure à  $P_s = 3,5 \mu\text{W}$ . Calculer l'atténuation maximale  $A$  de ce canal, ainsi que sa longueur  $L$  maximale.

Atténuation ou affaiblissement  $A$  :

$$A = 10 \log \frac{P_e}{P_s} = 10 \log \frac{100 \times 10^{-3}}{3,5 \times 10^{-6}} = 45 \text{ dB}$$

Longueur maximale de la ligne  $L$  :

$$\alpha = \frac{A}{L} \Leftrightarrow L = \frac{A}{\alpha} = \frac{45}{7,9} = 5,7 \text{ km}$$

## 3 Stockage de l'information

### 3.1 Stockage optique

On appelle *stockage* la technologie consistant à écrire et à lire des informations en utilisant des phénomènes optiques. Les disques optiques, comme le CD, le DVD ou le disque Blu-ray, sont les supports du stockage optique.

Les informations (musique, vidéos, etc.) qu'ils contiennent sont codées en langage *binnaire*, c'est-à-dire par une succession de bits, et inscrites sur une piste disposée en spirale. Les bits sont matérialisés de façon à créer un contraste optique : creux et plats pour les disques préenregistrés, zones opaques et transparentes pour les disques enregistrables.

### 3.2 Lecture optique

Pour lire l'information inscrite sur le disque optique, on exploite deux propriétés de la lumière : la *réflexion* et les *interférences*.

Un faisceau laser incident est concentré sur le disque et parcourt une piste. Il est réfléchi par la surface métallique recouvrant la piste.

- Lorsque le faisceau laser parcourt un creux ou un plat, le faisceau incident est **réfléchi** et l'intensité de la lumière réfléchie est *constante*.
- Lorsque le faisceau passe d'un creux à un plat (et inversement), le faisceau réfléchi par le creux et celui réfléchi par le plat sont en opposition de phase et **interfèrent de manière** *de*.

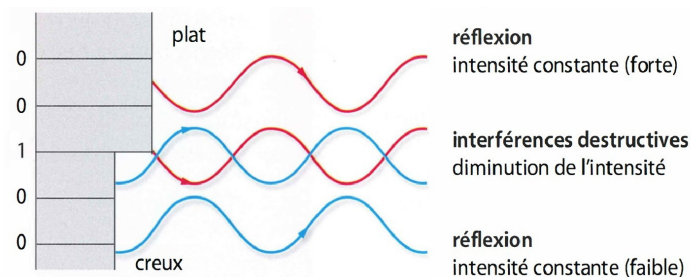


FIG. 13 – Interférences destructives au changement d'épaisseur.


#### Remarque

Pour que les interférences soient destructives, il faut que les alvéoles aient une profondeur précisément égale au quart de la longueur d'onde du faisceau utilisé pour la lecture !

La réflexion de la lumière sur un creux ou un plat code le bit *zéro*, tandis que la variation d'intensité de la lumière due aux interférences destructives correspond au bit *un*.

### 3.3 Capacité de stockage

Pour accroître la capacité de stockage d'un disque, il faut que les pistes soient plus *fine*. Cependant, la concentration du faisceau laser par une lentille convergente est limitée par le phénomène de *diffraction* : le faisceau laser ne se concentre pas en un point, mais en une tache de diffraction. L'emploi de lasers de longueur d'onde de plus en plus courte a permis d'accroître la capacité de stockage.

 Exercices n° 19, 20 et 29 pages 538 à 540.