

UE2 Biophysique
Professeur Peretti
Cours du 29 sept 2016 (13h30-15h30)
Ronéotypeur : LEMAITRE Clémence
Ronéolecteur : GUELAFF Renée

Cours n°1 de biophysique :
OPTIQUE ET VISION (première partie)

*Dates prévisionnelles des examens du 1^{er} semestre : 3 au 6 janvier 2016 (question rédactionnelle 70%
et qcm 30%)*

PLAN DU COURS

Généralités sur l'optique et la vision

- I- La lumière visible
 - 1) Les ondes électromagnétiques et la lumière
 - 2) La propagation de la lumière

- II- L'interaction lumière- photorécepteurs rétiniens
 - 1) La réaction photochimique initiale dans le cas des bâtonnets
 - 2) La réaction photochimique dans le cas des cônes
 - 3) L'élaboration de la sensation visuelle

- III- Les images optiques
 - 1) Les dioptries et les systèmes optiques
 - 2) Images optiques et stigmatisme

- IV- Le dioptre sphérique
 - 1) La relation fondamentale de conjugaison des dioptries
 - 2) Puissance (convergence) C d'un dioptre
 - 3) Définition de la proximité d'un point
 - 4) Foyers et distances focales du dioptre sphérique

Généralités sur l'optique et la vision :

Les ondes lumineuses représentent des **stimuli physiques** à l'origine de la vision. Ces ondes sont captées par notre récepteur : l'œil et plus précisément par les cellules de **la rétine** : les cônes et les bâtonnets.

Les **cônes** sont à l'origine de la distinction des couleurs, ils interviennent en vision diurne (pleine lumière). Les **bâtonnets** sont responsables de notre vision nocturne (ex : pièce très peu éclairée) et permettent de percevoir de faibles quantités de lumière.

Ce sont des cellules réceptrices qui transmettent un influx nerveux par le biais d'une **réaction photochimique**. En effet, les cônes et les bâtonnets possèdent des pigments photosensibles qui réagissent chimiquement avec les photons. L'influx nerveux est transporté à travers **le nerf optique**.

On nomme **dioptrie oculaire** l'ensemble des images qui se forment sur la rétine.

Certains yeux présentent des défauts de vision, c'est ce que l'on nomme **les amétropies**. Ces amétropies peuvent pour la plupart être corrigées par des lentilles (verre de contact ou lunette) ou chirurgicalement.

I. La lumière visible

1) Les ondes électromagnétiques et la lumière

La lumière fait partie des **ondes électromagnétiques**. Ces dernières sont définies par deux champs : le champ électrique noté \vec{E} et un champ magnétique noté \vec{B} qui se propagent dans l'espace. Ces ondes se propagent dans le vide et ont donc une vitesse dans le vide qu'on appelle célérité. La **célérité** se nomme c , elle est égale à 3.10^8 m/s. (*ordre de grandeur est à savoir*) Une onde est donc caractérisée par sa vitesse mais également par d'autres paramètres : la **fréquence** de l'onde que l'on note N , f ou ν et la **longueur d'onde** notée λ .

Ces trois grandeurs sont reliées entre elles par la relation :

$$\lambda = \frac{c}{N} \quad \text{dans le vide}$$

La lumière visible :

L'œil est capable de détecter certaines longueurs d'onde, elles sont comprises entre $3,8.10^{-7}$ m et $7,8.10^{-7}$ m (380 nm à 780 nm).

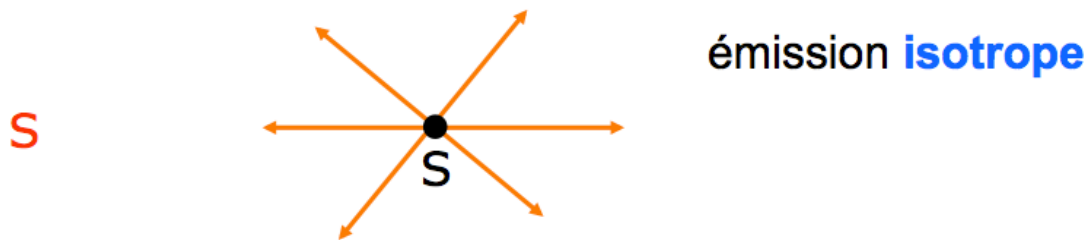
couleurs

violet	380 à 455 nm	limites variables
bleu	455 à 492 nm	
vert	492 à 577 nm	
jaune	577 à 597 nm	
orange	597 à 622 nm	
rouge	622 à 780 nm	

Ces limites restent variables car les yeux sont plus ou moins sensibles, avec des perceptions individuelles. Parler de « lumière visible » est en fait un abus de langage : ce n'est pas la lumière qui est visible mais les objets eux même qui reçoivent la lumière et qui la rediffuse en fonction des longueurs d'onde qu'ils absorbent (ex: on voit la lumière du laser grâce à la poussière qui se trouve dans l'air).

2) Propagation de la lumière

Un milieu de propagation est dit **homogène** lorsqu'il possède les mêmes propriétés dans chaque coin de l'espace et que la lumière issue de S (source ponctuelle) se propage suivant des portions de droites orientées appelées **rayons lumineux**.



On a une **émission isotrope** car les rayons sont identiques dans les directions de l'espace.

Vitesse de la lumière

La vitesse de la lumière dans le vide est appelée célérité. Mais la lumière peut se propager dans toutes autres sortes de milieux : solide, liquide et gazeux. La vitesse va alors dépendre de la nature du milieu et on la notera v .

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

Avec n , l'indice absolu de réfraction (sans unité)

Dans un milieu matériel, n est supérieur à 1 (d'après la formule, v est alors nécessairement inférieure à c).

exemples :

air	$n = 1,00029$ ($n \sim 1$)
eau	$n \sim 4/3 = 1,33$
verre	$n \sim 3/2 = 1,5$

La lumière va donc plus lentement dans l'eau que dans l'air et beaucoup plus lentement encore dans un diamant qui a un indice de réfraction égal à $5/2$.

II. Interaction entre la lumière et les photorécepteurs rétiniens

Il existe une **réaction photochimique** entre les photons et les substances chromophores contenues dans le segment externe des cônes et des bâtonnets : lors de cette réaction, il va y avoir une transformation qu'on appelle **transduction de l'énergie électromagnétique** des photons en **énergie électrique** (potentiel de membrane).

Cette énergie crée un potentiel de membrane puis s'en suit une série de réactions donnant naissance à un potentiel d'action.

1) Réaction photochimique initiale dans le cas des bâtonnets

Dans les bâtonnets, se trouve une substance chromophore qu'on appelle **rhodopsine** ou pourpre rétinienne car elle confère sa coloration pourpre orangé à la rétine périphérique. (*Les bâtonnets se trouvent surtout sur la rétine périphérique*).

Du fait de sa structure, on qualifie la rhodopsine d'**hétéroprotéine** ou **chromoprotéine**. La partie protéique s'appelle l'opsine, elle comprend 364 acides aminés répartis en 7 hélices. Elle est liée à un aldéhyde qu'on appelle le rétinol et qui se situe au centre de l'ensemble constitué par les 7 hélices. L'alcool primaire correspondant à l'aldéhyde est le rétinol, aussi appelé vitamine A.

Les réactions photochimiques dépendent de la quantité de lumière reçue :

- Si la quantité de lumière est faible, la rhodopsine se décompose en opsine + rétinol (qu'on appelle aussi le « jaune visuel » à cause de sa couleur). Cette réaction est rapidement **réversible** à l'obscurité : l'image disparaît quand la quantité de lumière a disparue, avec une absence de persistance gênante de l'image.



- Si l'illumination est plus importante, la première réaction continue : « le jaune visuel » se transforme en opsine + rétinol (« blanc visuel »). La réaction **n'est pas totalement réversible**. La reformation du pourpre rétinien à partir du « blanc visuel » s'effectue par une réaction assez lente ; c'est ce qu'on appelle un cycle long.



PS : *Attention à ne pas confondre rétinAl et rétinOl.*

Remarques :

- Les termes jaune et blanc visuel rendent compte de la décoloration de la rétine sous l'effet de la lumière.
- En ce qui concerne l'adaptation à l'obscurité après illumination, en présence d'une rétine complètement adaptée à l'obscurité, si la rétine est exposée à un bref éclair, la récupération sera rapide car il y aura régénération du pourpre rétinien à partir du rétinol. En revanche, si l'on a une exposition prolongée de la rétine à la lumière, alors la récupération sera lente car la régénération du pourpre rétinien se fera à partir du rétinol (cycle long).
- L'**héméralopie** est une pathologie qui représente une cécité nocturne. Cela provient généralement d'un manque de vitamine A. On peut le plus souvent obtenir une guérison rapide et complète par recharge en vitamine A. Dans certains cas la guérison peut être longue et incomplète car il y a dégénérescence des cellules sensorielles.

2) La réaction photochimique dans le cas des cônes

Il existe trois types de pigments chromophores différents et donc trois types de cônes.

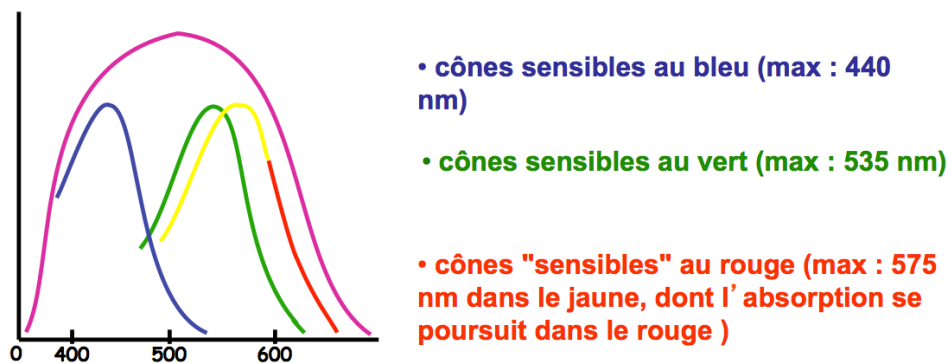
- le cône sensible au bleu (cône S pour « Small », petites longueurs d'onde) ayant pour pigment le **cyanolable**
- le cône sensible au vert (cône M pour « Middle ») ayant pour pigment le **chlorolable**
- le cône sensible au rouge (cône L comme « Long ») ayant pour pigment l'**érythrolable**

Ces substances diffèrent de la rhodopsine et diffèrent également entre elles par la structure de la partie protéique : les opsines sont différentes (60% des acides aminés diffèrent de ceux de la rhodopsine alors qu'entre ces trois substances la différence est minime : 15 acides aminés sur 354)

Malgré ces quelques différences, la réaction photochimique avec la lumière est équivalente à celle de la rhodopsine.

Bien retenir : Il existe donc trois types de cônes qui permettent la vision chromatique grâce à la synthèse trichrome.

SPECTRE D'ABSORPTION DES 3 TYPES DE PIGMENTS



Le spectre d'absorption du rouge est également capable de détecter le jaune. La somme de ces trois courbes permet de voir l'ensemble des couleurs, on parle de **courbe d'efficacité lumineuse photopique**.

Remarque :

La proximité du maximum d'absorption des cônes rouges et verts (ils ne sont pas très écartés : 40 nm d'écart), est un des facteurs intervenant dans la perception du relief par l'oeil. Le rouge et le vert ne réfractent pas exactement de la même façon. Ainsi, c'est cette légère différence qui induit une discrète différence de netteté des images rouges et vertes. L'analyse par les formations cérébrales de ces différences minimales permet d'élaborer une image en relief.

3) L'élaboration de la sensation visuelle

Il existe tout un mécanisme de codage et de transmission des potentiels d'action jusqu'aux structures cérébrales d'intégration et d'élaboration de la sensation visuelle. Ce sont les aires 17, 18 et 19 de Brodmann sur le cortex occipital.

Remarque :

La sensibilité de l'œil à la lumière est variable.

En vision diurne (**photopique**), la sensibilité maximale de l'œil est 555nm: en cas de fortes valeurs de luminance, l'œil est plus sensible au vert.

En vision nocturne (**scotopique**), la sensibilité maximale de l'œil est de 510nm : la sensibilité est plus grande au bleu-vert (*mais cette lumière n'est malgré tout pas perçue*).

Cette différence se nomme l'**effet Purkinje**, elle se voit sur les courbes d'efficacité lumineuse.

III. Les images optiques

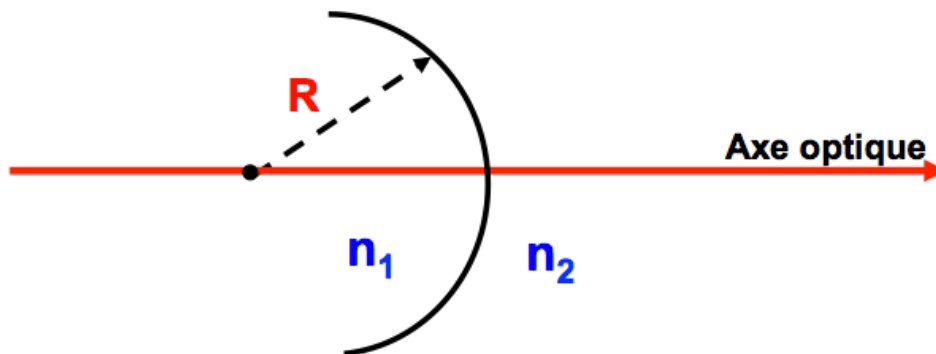
1) Les dioptries et systèmes optiques

- Le principe du retour inverse de la lumière :

Pour aller d'un point B à un point A dans un milieu d'indice variable, la lumière suit le trajet inverse de celui qu'elle décrivait pour aller de A à B : la lumière se réfracte pour reprendre le chemin inverse.

Définition : Un dioptré est une interface de séparation entre deux milieux (on parle de surface dioptrique).

Exemple plus particulier : le dioptré sphérique.



La surface de séparation est de forme sphérique et sépare deux milieux d'indices différents (n_1 et n_2).

Le rayon de dioptré (R) s'appelle rayon de courbure.

L'axe de symétrie s'appelle aussi axe optique.

Un dioptré plan fait également partie des dioptries sphériques mais cela signifie que son rayon est infini.

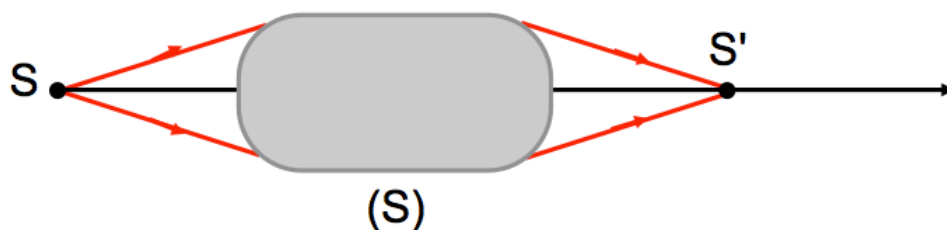
Un **système optique**, noté Σ , est une succession de dioptries. Dans ce cours, nous nous intéresserons à des systèmes optiques centrés: juxtaposition de dioptries (ou de lentilles, de miroirs) qui ont tous le même axe optique.

2) Images optiques et stigmatisme

Soit S un objet ponctuel (lumineux ou éclairé) et un système optique centré (Σ). Ce système optique va produire une image de S qu'on appelle S' observée grâce à un récepteur qui peut être l'œil (cônes et bâtonnets plus précisément), une plaque photographique, une camera numérique etc..

Définition du stigmatisme rigoureux :

Le système optique est rigoureusement stigmatique pour le couple S et S' si tout rayon issu de S ponctuel et traversant le système optique passe par S', alors S' est aussi ponctuel. Il faut que S et S' soient ponctuels pour pouvoir dire que ces points sont conjugués.



→ Tous les rayons lumineux convergent en S' donc la condition du stigmatisme rigoureux est vérifiée. Dans la vie courante, en général, cette condition n'est pas vérifiée : S' est en fait une petite tache lumineuse pas tout à fait ponctuelle. Le récepteur est composé de cellules sensibles qui ont une certaine expansion spatiale, il n'est pas si précis que ça (l'œil avec les cônes et bâtonnets, la plaque photographique avec les grains, la caméra numérique avec les pixels)

On parle alors d'un **stigmatisme approché**.

Le système optique réalise le stigmatisme approché pour le couple (S,S') si tout rayon issu de S ponctuel et traversant le système optique arrive sur une seule cellule sensible du récepteur. Le récepteur qui est imparfait ne détecte pas que S' n'est alors pas vraiment ponctuel.

Nous nous contentons du stigmatisme approché mais avec un certains nombres de conditions qui doivent être vérifiées.

Pour une réalisation du stigmatisme approché, il faut faire une **approximation de Gauss** qui comporte 3 conditions :

- 1) L'objet doit être situé dans un plan perpendiculaire à l'axe optique
- 2) Tous les points objets doivent pouvoir être considérés sur l'axe optique ou voisin de l'axe optique (l'objet ne doit donc pas être très grand)
- 3) Les rayons lumineux issus de l'objet doivent être faiblement inclinés sur l'axe optique.

3) Objets et images, réels et virtuels

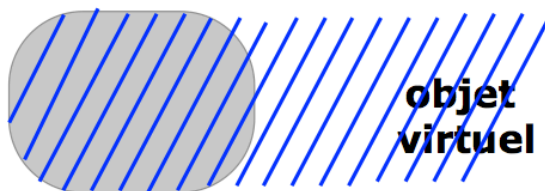
Dans le cas d'un **système optique réfringent** (constitué de dioptries et lentilles mais pas de miroir, il dévie mais ne réfléchit pas) :

- L'objet est considéré comme réel s'il est situé avant la phase d'entrée du système optique et comme virtuel dans toute la zone hachurée. (« avant » et « après » le système optique s'établit par rapport au sens de propagation de la lumière)
- L'image est dite virtuelle si elle se trouve avant la phase de sortie du système optique et réelle si elle se trouve après.

sens de propagation
de la lumière



objet réel



objet
virtuel

image
virtuelle

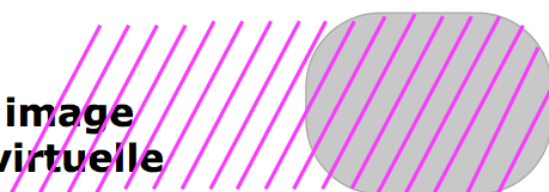
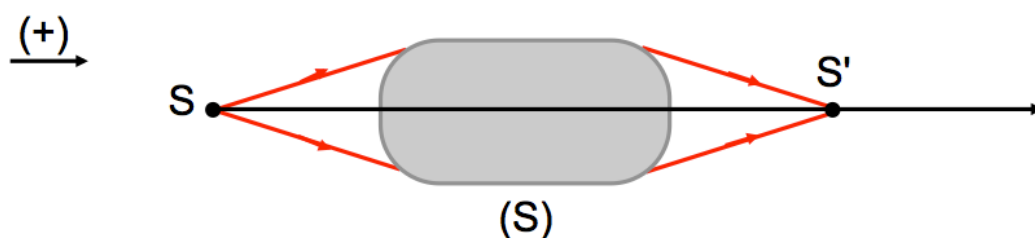


image réelle

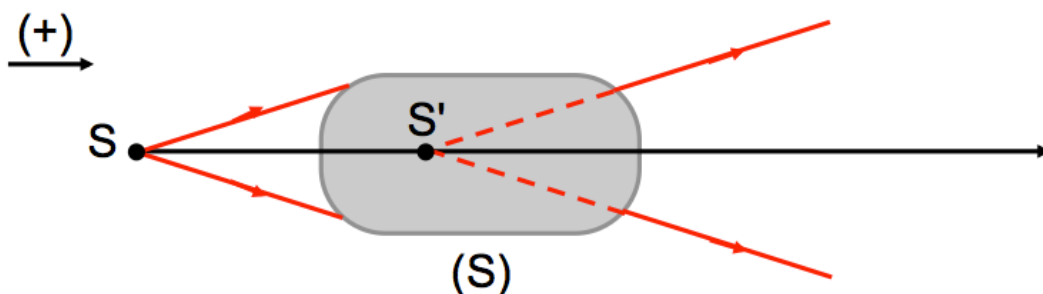
Il est important de toujours noter sur un schéma le sens de propagation de la lumière.

□ Cas 1 : S est un objet réel et S' est une image réelle



→ Les rayons lumineux émergents convergent en un point S, on recueille une tache lumineuse : une concentration d'énergie lumineuse en S'. L'image est bien réelle car on est capable de recueillir l'énergie lumineuse sur un écran en ce point là.

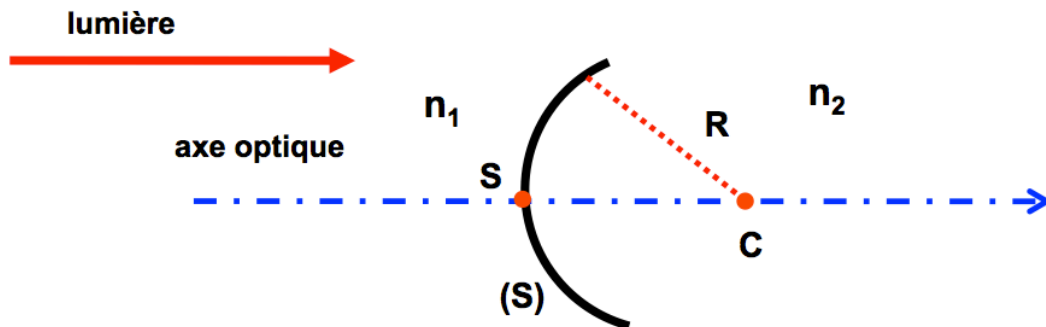
□ Cas 2 : S est un objet réel et S' est une image virtuelle



→ On prolonge les rayons (virtuels, ceux en pointillés) jusqu'au point S' image de S : S' est bien un point virtuel. Les rayons lumineux émergents divergent, ils semblent provenir du point S', mais on ne pourra pas recueillir cette énergie lumineuse avec un écran car S' est une image virtuelle.

IV. Le dioptre sphérique

Le dioptre sphérique est plus simple à étudier et surtout il ressemble à l'œil.



C : Centre de courbure du dioptre

S : Sommet du dioptre (origine de l'axe des abscisses)

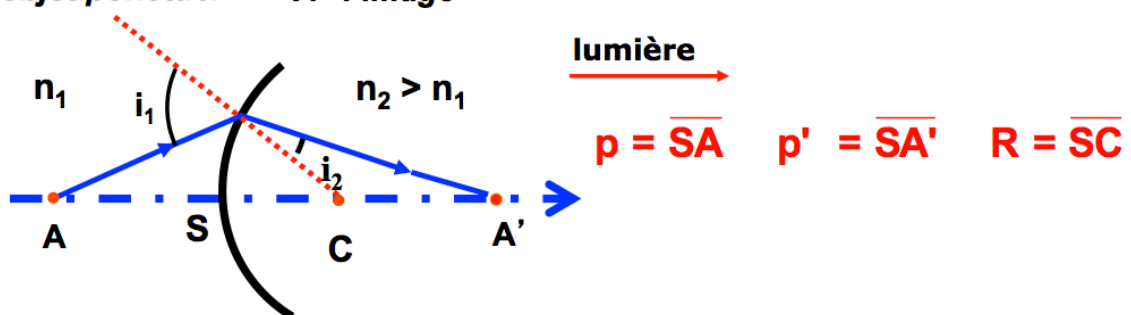
R : Rayon de courbure du dioptre

L'axe optique représente l'axe des abscisses avec pour origine le point S. Par convention de signe, le sens positif de l'axe des abscisses correspond au sens de propagation de la lumière. Une abscisse négative signifie donc que le point est situé en avant du point S.

On suppose que les conditions de Gauss sont réalisées et on considère que le système optique est approché.

1) La relation fondamentale de conjugaison des dioptres

A : objet ponctuel A' : image



Le rayon lumineux qui part de A est dévié car il rencontre une surface dioptrique. Cette intersection se nomme le point d'incidence. On fait passer en ce point la normale (ligne rouge en pointillé), elle est perpendiculaire à la surface du cercle, et donc par définition elle passe nécessairement par le centre du dioptre. Enfin, le rayon lumineux coupe l'axe optique en A'.

Dans la formule, p correspond à l'abscisse de A, p' à l'abscisse de A' et R au rayon de courbure. Ce sont des valeurs algébriques (d'où le trait sur SA, SA', SC): elles peuvent être positives ou négatives. Ici on a p négatif, p' positif et R positif.

On peut écrire la **relation de conjugaison** suivante :

$$\frac{n_2}{p'} - \frac{n_1}{p} = \frac{n_2 - n_1}{R}$$

2) Puissance C d'un dioptre

La **puissance** d'un dioptre ou **convergence** d'un dioptre que l'on note C se définit par la relation suivante :

$$C = \frac{n_2 - n_1}{R}$$

Si C est positif on a alors de dioptre convergent.

Si C est négatif, le dioptre est divergent.

La puissance s'exprime en m^{-1} (l'indice de refraction n'a pas d'unité et R est en mètre).

L'unité SI est le m^{-1} qu'on a pris l'habitude d'appeler dioptrie, notée souvent dt ou δ .

On peut également écrire la relation de conjugaison des dioptres de la manière suivante :

$$n_2 P' - n_1 P = C$$

3) La proximité d'un point

La proximité d'un point est l'inverse de son abscisse, elle peut être négative ou positive et s'exprime également en dioptrie.

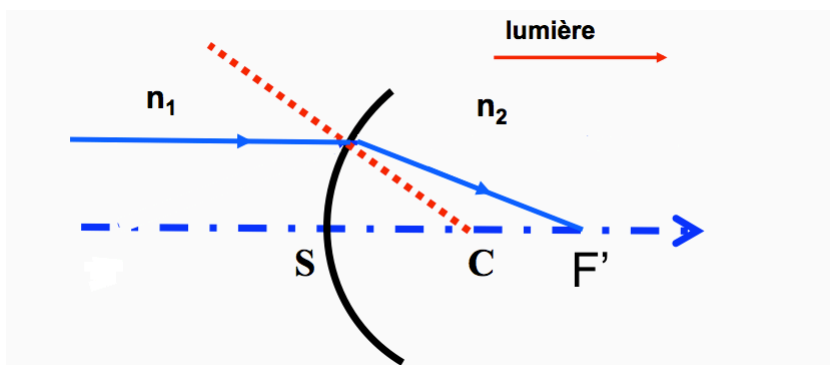
$$P = \frac{1}{p}$$

Faire bien attention aux notations : P majuscule (proximité) et p minuscule (abscisse).

4) Foyers et distances focales du dioptre sphérique

Foyer principal image F'

On considère des rayons lumineux incidents parallèles à l'axe optique. Les rayons émergents passent par l'axe optique en un point F' : foyer principal image. F' est l'image d'un point A situé à moins l'infini sur l'axe optique.



Ps : Dans ce cas $n_2 > n_1$ car le rayon se rapproche de la normale.

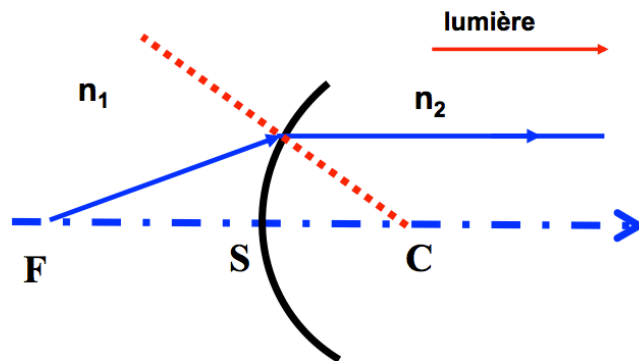
On peut établir une relation entre la distance focale image f' et la puissance C du dioptre :

$$f' = \frac{n_2}{C}$$

Attention à la distinction entre foyer principal image F' et distance focale f' .

Foyer principal objet F du dioptre sphérique

Les rayons incidents qui passent par un point F sur l'axe principal émergent du dioptre sphérique parallèlement à l'axe optique.



Si l'objet A se trouve au point F , alors son image A' sera à l'infini.

On note la position de F , f qui est la distance focale objet. $\overline{SF} = f$

Remarque : F et F' sont toujours de part et d'autre du dioptre.

Application :

A partir de la relation de conjugaison générale, déterminer la relation entre la distance focale objet f et la puissance C d'un dioptre sphérique.

L'objet est placé en F et son image est à l'infini. On a donc $p=f$ et $p'=\text{infini}$.

$$\frac{n_2}{p'} - \frac{n_1}{p} = C \quad \rightarrow \quad 0 - \frac{n_1}{f} = C$$

p' étant égal à l'infini, la fraction s'annule. On a donc :

$$f = \overline{SF} = - \frac{n_1}{C}$$

Remarque:

On a vu que :

$$f = - \frac{n_1}{C}$$

$$C = \frac{n_2 - n_1}{R} \quad \text{avec } R = \overline{SC}$$

D'après les formules précédentes :

- Lorsque le dioptré est convergent avec $C > 0$, alors $f < 0$ (le point focal objet F réel est donc situé en avant du dioptré)
- Lorsque le dioptré est divergent avec $C < 0$, alors $f > 0$ (le point focal objet F virtuel est donc en arrière du dioptré).

