

Chapitre 1 : FONDEMENTS DE L'OPTIQUE GÉOMÉTRIQUE

1. Cheminement des idées en optique

1.1. Objet de l'optique

L'optique s'intéresse principalement à l'ensemble des phénomènes perçus par l'œil. La cause de ces phénomènes est la LUMIÈRE. Celle-ci est émise par la matière dans certaines conditions et se manifeste par son action sur divers récepteurs par exemple :

l'œil,
la plaque photographique

1.2 Bref historique

La lumière a été étudiée très tôt dans l'histoire des sciences, tant du point de vue de sa propagation que du point de vue de sa nature.

Au XVII^e SIECLE furent établies les lois de la réfraction (passage de la lumière à travers deux milieux transparents différents: air/eau, eau/verre ...).

- 1621 Découverte des lois par SNELL (qui ne les publie pas).
- 1637 DESCARTES retrouve indépendamment les mêmes lois et les publie.
- 1657 FERMAT retrouve ces lois à partir du principe selon lequel la lumière met un temps minimal pour aller d'un point à un autre. Comme celles de la mécanique, les lois de l'optique géométrique se présentent alors sous forme variationnelle.

C'est un peu plus tard qu'apparurent les premières hypothèses relatives à l'aspect ONDULATOIRE de la lumière.

- 1665 HOOKE émet l'idée que la lumière est une vibration de haute fréquence qui se propage (voir annexe 1 pour la représentation d'une onde). Cette idée est développée par HUYGENS mais contrariée par NEWTON qui défend une théorie CORPUSCULAIRE. Dans son ouvrage "La théorie de l'émission", NEWTON suppose que "la lumière est constituée par des grains de nature non précisée lancés à très grande vitesse par l'objet lumineux et qui frappent le fond de l'oeil".

Au début du XIX^e SIECLE, YOUNG reprend la théorie ondulatoire pour étudier les phénomènes d'interférences.

- 1818 FRESNEL réalise la synthèse des idées de HUYGENS et de YOUNG pour expliquer la diffraction, c'est-à-dire la présence de lumière dans les zones d'ombre géométrique. Selon FRESNEL "la lumière est propagée par le mouvement vibratoire de l'éther^{*}. Sous l'action de certains ébranlements, l'éther devient le siège de vibrations transversales se propageant de proche en proche".
- 1880 MAXWELL après avoir construit la théorie électromagnétique conclut que la lumière est une onde électromagnétique caractérisée par une vibration dont la fréquence ν 14 Hertz et qui se propage dans le vide à une vitesse $c = 2.99792458 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$. Il précise que l'onde est transversale, c'est-à-dire que les grandeurs physiques qui la caractérisent: le champ électrique \vec{E} et le champ magnétique \vec{B} , sont perpendiculaires à la direction de propagation.

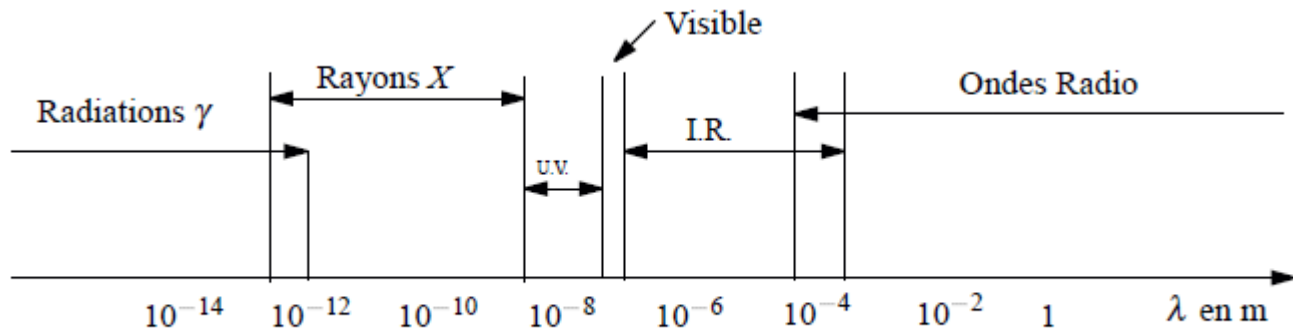
Enfin au XX^e SIECLE :

- 1905 EINSTEIN fait subir une révolution à l'Optique en ré-introduisant l'aspect corpusculaire. Pour expliquer l'effet photo émissif il fait intervenir le photon. Dans cette logique est établie la

théorie quantique de l'émission: les atomes excités par suite de collisions se désexcitent en émettant des photons.

- 1924 Louis de BROGLIE postule la dualité onde corpuscule et relie les aspects ONDULATOIRE et CORPUSCULAIRE en posant que l'énergie E du photon vaut: $h\nu$ - h est la constante de PLANCK. De sorte que pour la lumière visible l'énergie d'un photon vaut quelques électronvolts puisque $1\text{eV} = 1.60217733 \times 10^{-19}\text{J}$.

La lumière naturelle (par ex. la lumière solaire) est une superposition d'ondes électromagnétiques de longueurs d'ondes λ différentes qui forment un spectre partagé en différents domaines de longueurs d'ondes :



Spectre des ondes électromagnétiques.

La lumière a une double nature : ondulatoire : la lumière est une onde ; corpusculaire la lumière est constituée de grains appelés photons

En principe, pour n'importe quelle longueur d'onde ces deux aspects coexistent toujours.

1.3 Grandeurs caractéristiques de l'onde lumineuse :

Une onde lumineuse est caractérisée par une onde sinusoïdale de

La période T est égale à $T = \frac{1}{\nu}$

ν est la vitesse de propagation dans le milieu considéré. Dans le vide cette vitesse est $c \approx 3.10^8 \text{ m.s}^{-1}$

On définit la longueur d'onde λ_0 dans le vide comme la distance parcourue dans ce cas par la lumière pendant une période : $\lambda_0 = c.T$.

Indice d'un milieu

Un milieu est homogène s'il a les mêmes propriétés en tout point.

Un milieu est isotrope si les propriétés observées en un point ne dépendent pas de la direction d'observation.

Par définition : l'indice n d'un milieu est égal au rapport de la vitesse c de la lumière dans le vide à la vitesse v de la lumière dans ce milieu.

Pour l'air, $n = 1,000293 \approx 1$

Dans un milieu d'indice n , la longueur d'onde $\lambda = \frac{\lambda_0}{n}$.

Dans l'étude de la lumière rencontrant les objets d'échelle macroscopique, la petitesse des longueurs d'onde ($\lambda \sim 10^{-7}\text{cm}$) du visible vis à vis des grandeurs des objets qu'elle rencontre ($L \sim 1\text{cm}$ et plus) a permis d'élaborer une théorie géométrique de la propagation des ondes lumineuses : *L'optique géométrique*.

2 Principes de l'optique géométrique.

On oublie l'aspect ondulatoire et corpusculaire de la lumière et on montre qu'un très grand nombre de phénomènes lumineux observés peut se déduire des principes suivants :

Principe.1. Il existe des *rayons lumineux* qui restent indépendants les uns des autres (pas d'interaction entre eux).

Principe.2. Dans un milieu *homogène, transparent et isotrope*, les rayons lumineux sont des *lignes droites*.

Principe.3. à la surface de séparation de deux milieux, les rayons lumineux obéissent aux lois de **Snell-Descartes**.

3 Vérifications expérimentales et commentaires :

3.1 Principe.1 :

Définition. On appelle *rayon lumineux*, toute courbe suivant laquelle se propage la lumière.

Remarque : Il faut se garder de dire que la description géométrique de la lumière sous forme de rayons lumineux révèle la nature corpusculaire de celle-ci. *Les rayons de lumière* ne sont pas les trajectoires des photons. En fait un photon n'est pas localisable et ne possède pas de trajectoire au sens de la mécanique classique du point matériel !

3.2 Principe.2.

Lorsque le milieu est *transparent, homogène, isotrope*, les rayons lumineux sont des *droites*.

Nous savons qu'il est impossible d'isoler un seul rayon lumineux à cause des phénomènes de diffraction. On a donc en pratique, des ensembles de rayons lumineux constitués en *faisceaux* lumineux se propageant à travers des ouvertures de tailles variées : les *diaphragmes*. On négligera toujours la diffraction.

Les différents types de faisceaux lumineux sont représentés sur la figure.1 :

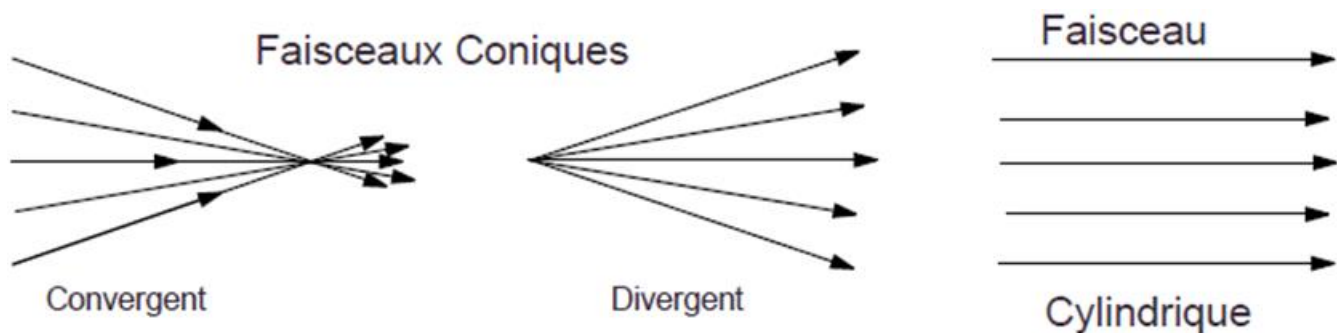


Figure 1 : Différents faisceaux lumineux

3.3 Lois de l'optique géométrique

3.3.1 Propagation rectiligne de la lumière

DANS UN MILIEU HOMOGENE ET ISOTROPE LA LUMIERE SE PROPAGE EN LIGNE DROITE

3.3.2 Principe de retour inverse

LE TRAJET SUIVI PAR LA LUMIERE EST INDEPENDANT DU SENS DE PROPAGATION.

3.3.3 Lois de Descartes

Etablies en Angleterre par SNELL en 1621 et retrouvées indépendamment en 1637, en France, par DESCARTES d'une manière expérimentale on sait aujourd'hui qu'elles résultent de la nature ondulatoire de la lumière.

- a- Dioptre : Si on considère la surface de deux milieux homogènes isotropes, d'indices respectifs n_1 et n_2 ce dispositif constitue un dioptre.
- b- Quand on envoie à partir d'une source située dans le premier milieu (1) un faisceau de lumière incidente, l'expérience permet de distinguer de la lumière réfléchi (celle qui revient dans le milieu (1)) et (ou) de la lumière réfractée (celle qui passe dans le milieu (2)).

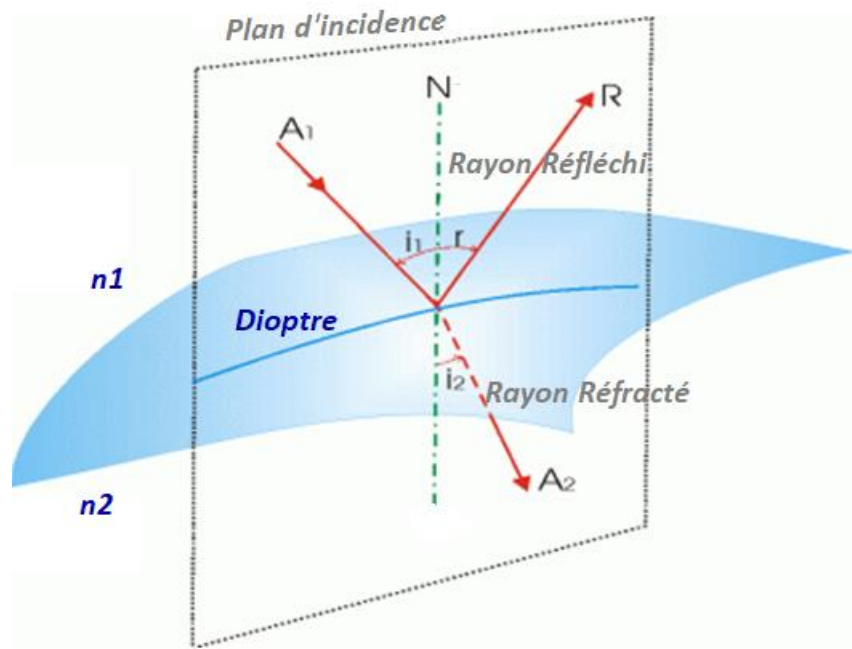


Figure 2 : Réflexion et Réfraction au niveau d'un Dioptre

Lois de SNELL-DESCARTES

1ère Loi : Le rayon réfléchi et le rayon réfracté sont dans le plan d'incidence.

2e Loi : Les angles d'incidence et de réflexion sont égaux et de sens contraire :

$$r = -i_1 \quad (1.1)$$

3e Loi : Pour chaque lumière monochromatique, les sinus des angles d'incidence et de réfraction sont liés par la relation :

$$n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2 \quad (1.2)$$

Rq : Retour inverse de la lumière

Les lois de Descartes ne font pas intervenir le sens de propagation de la lumière.

Un rayon lumineux se propageant dans le milieu n_2 avec un angle d'incidence i_2 est réfracté dans le milieu d'indice n_1 avec un angle de réfraction i_1 tel que :

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

C'est le principe de retour inverse de la lumière.

5 Construction du rayon réfléchi et du rayon réfracté :

a. Pour le rayon réfléchi, il suffit de construire le rayon symétrique du rayon incident par rapport à la normale au point d'incidence

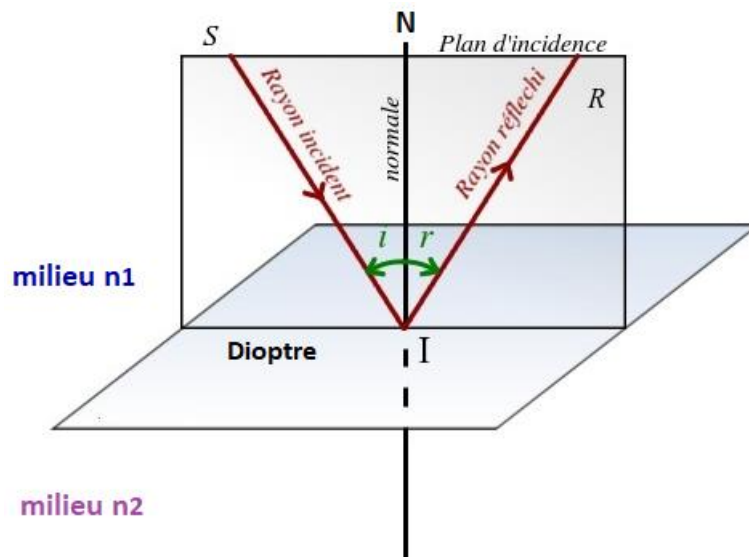


Figure 2 : Construction du rayon réfléchi

b. Pour le rayon réfracté d'un milieu d'indice n_1 vers un milieu d'indice n_2 nous devons envisager deux cas.

b.1. $n_2 > n_1$.

Soit $0 \leq i_1 \leq \frac{\pi}{2}$

Du point I , traçons le plan P tangent à S . Deux cercles de rayons respectifs n_1 et n_2 sont tracés dans le plan contenant la normale IN à P et le rayon incident AI . On a alors (fig.3)

$$IH = ID \sin i_1 = ID' \sin i_2$$

Or $ID = n_1$ et $ID' = n_2$ rayons des 2 cercles et on en déduit :

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

c'est à dire la relation de Snell-Descartes.

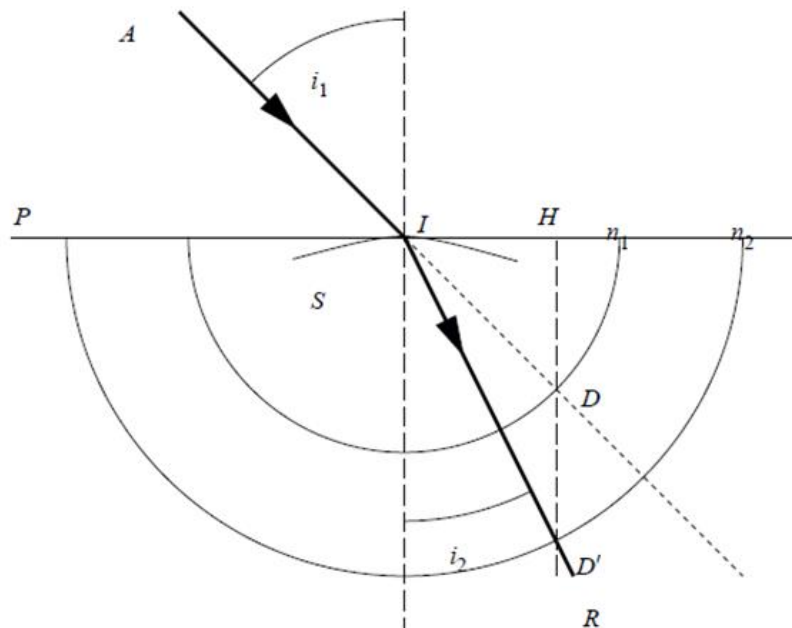


Figure 3 : construction du rayon réfracté pour $n_2 \gg n_1$

b.2. $n_2 < n_1$.

Soit $0 \leq i_1 \leq \frac{\pi}{2}$

On reproduit de la même manière les cercles e rayons n_2 et n_1 cette fois-ci. On a alors (fig.4)

$$IH = ID \sin i_1 = ID' \sin i_2$$

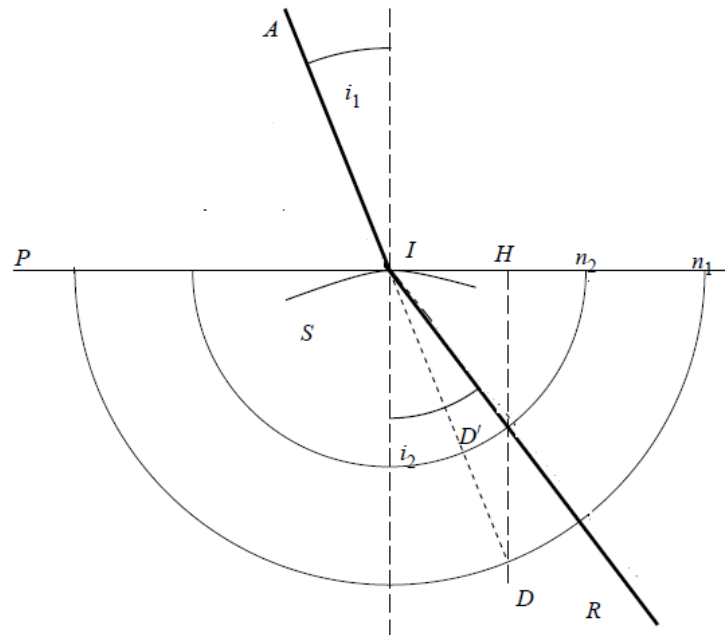


Figure 4 : construction du rayon réfracté pour $n_2 < n_1$

on en déduit :

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

c'est à dire la relation de Snell-Descartes.

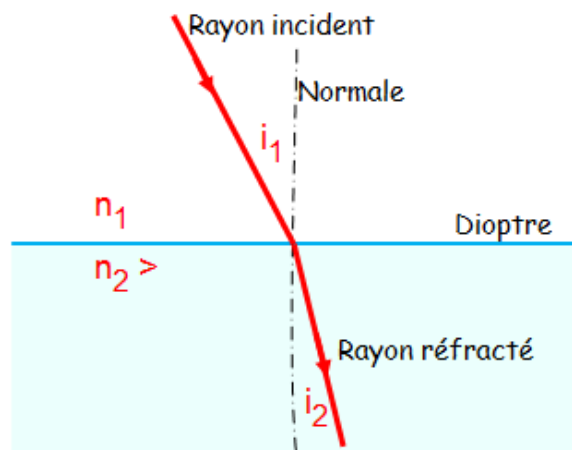
Conclusion :

On peut résumer les 2 cas par les schémas suivants :

- $n_2 > n_1$: le rayon réfracté s'approche de la normale

Réfraction – Rayon rabattu

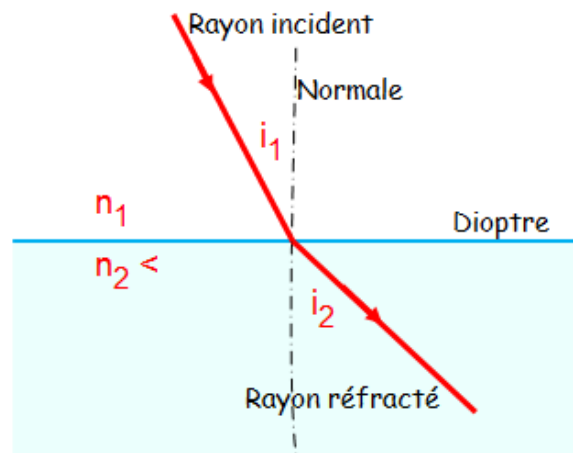
- L'indice du second milieu est **plus** réfringent que celui du milieu d'origine. C'est le cas d'un rayon qui passe de l'air dans l'eau.
- Notez bien que les angles i_1 et i_2 sont comptés à partir de la normale.



- $n_2 < n_1$: le rayon réfracté s'éloigne de la normale

Réfraction – Rayon relevé

- L'indice du second milieu est **moins** réfringent que celui du milieu d'origine. C'est le cas du poisson qui regarde en l'air.



Il en résulte 2 cas limites de la réfraction et de la réflexion :

- Angle limite d'incidence : lorsque $n_1 > n_2$ le rayon incident a un angle limite i_{lim}
C'est la réflexion totale

ANGLE LIMITE : $n_1 > n_2$

- Si la lumière passe dans un milieu moins réfringent, le rayon lumineux n'est pas rabattu, mais au contraire, remonte. Il peut remonter jusqu'à repartir à l'horizontale (angle du rayon réfracté de 90°). Un peu plus et, le rayon ne passe plus (il serait au-dessus de l'horizontale). Il est simplement réfléchi. Le dioptre se comporte comme un miroir.

C'est ce qui se passe avec le diamant. Ce phénomène explique son éclat. Mettez-le dans l'eau et ses feux disparaissent.

- Valeur de l'angle limite: $i_2 = 90^\circ$

$$\sin i_{\text{lim}} = n_2 / n_1$$

- Valeur de l'angle limite pour dioptre d'un milieu vers l'air

Glace	Eau	Verre	Quartz	Diamant
$49^\circ 36' 41''$	$48^\circ 36' 41''$	$41^\circ 48' 37''$	$40^\circ 10' 40''$	$23^\circ 52' 56''$

- Angle limite de refraction : lorsque $n_2 > n_1$ le rayon réfracté a un angle limite

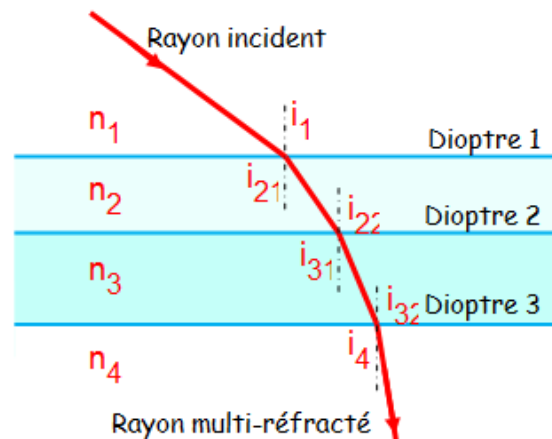
Pour $n_2 > n_1$ L'angle d'incidence évolue plus vite que l'angle de réfraction, lorsque le rayon incident est rasant $i_1 = 90^\circ$ on obtient un angle de refraction max :

$$\sin i_{2\text{max}} = \frac{n_1}{n_2}$$

- Cas des fibres optiques :

DIOPTRES multiples ou en couches

- Un rayon lumineux traverse plusieurs dioptries. Il y subit plusieurs réfractions successives. Sous quel angle ressort-il?
- Ce peut-être plusieurs lames de verres différents ou plusieurs couches d'eau à des températures et pressions différentes ou plusieurs couches atmosphériques, etc.



Hypothèse:
Les indices sont croissants

- Cas des mirages

Mirage

- La figure ci-contre illustre le phénomène des mirages observables dans les déserts mais aussi à proximité de la mer. En hiver, sur la Côte d'Azur et au petit matin, il n'est pas rare d'observer la Corse suspendue dans le ciel.
- À noter que la Corse n'est pas visible depuis Nice ou Cagnes-sur-mer. Elle est derrière l'horizon. La Corse est à une distance de 200 km de la Côte d'Azur.

