

Lire un spectre

et l'interpréter

Polysémie

Revenant dans les contes populaires

Chimère ou **phantasme** en psychanalyse

Vision dans les religions

Apparition ou **esprit** en littérature fantastique



Spectre dans les romans d'épouvante

Ombre en philosophie

Ensemble des radiations monochromatiques d'un rayonnement complexe

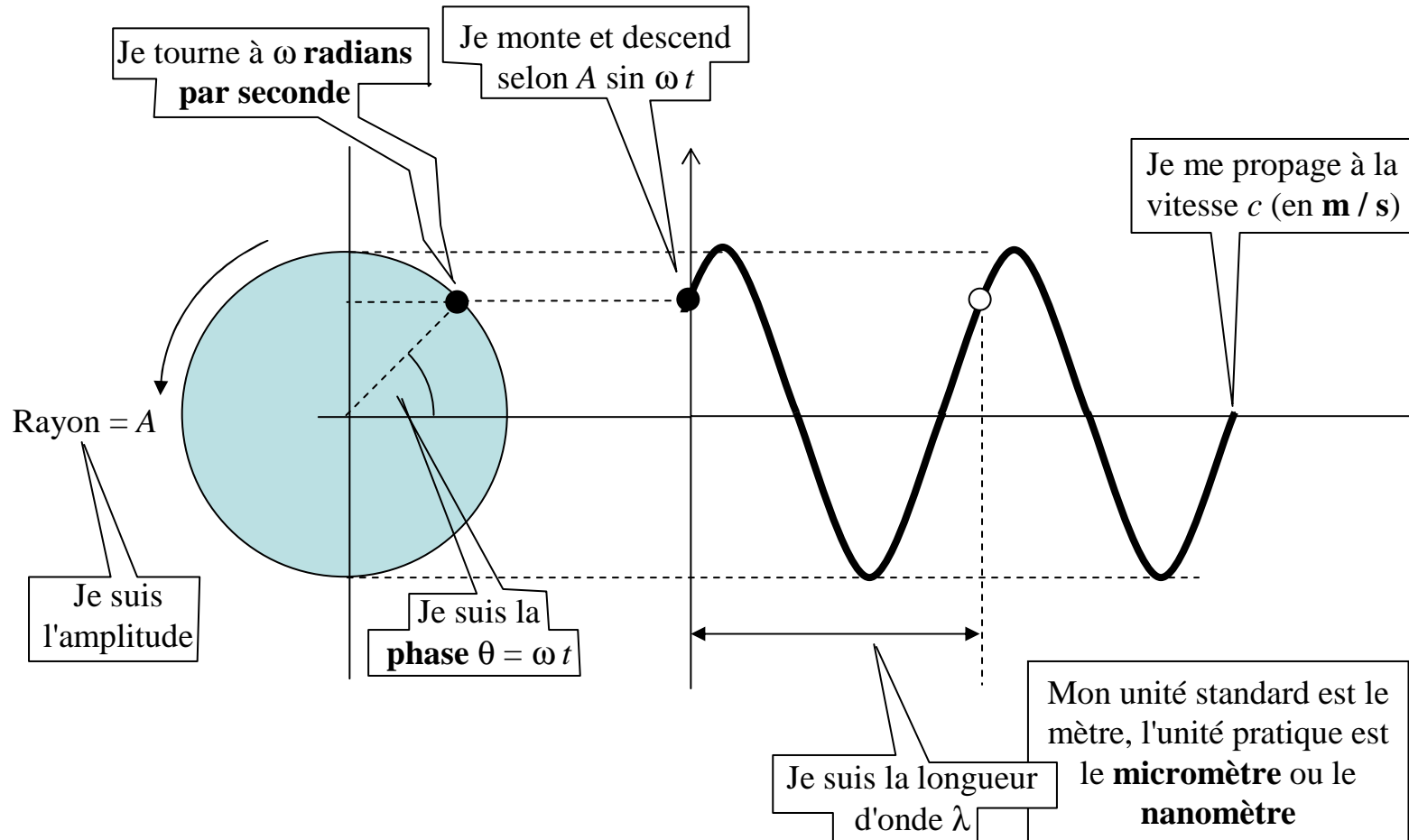
Ensemble des valeurs de l'énergie d'un corps quand celle-ci cesse de varier

Polysémie

Un spectre est une représentation graphique du type *histogramme* de la puissance ou de la luminosité émise ou absorbée en fonction de la fréquence, de la longueur ou du nombre d'onde d'un rayonnement.

Radiation monochromatique

Modèle mathématique



Un peu de mathématiques

Les proportions

Titre 1	Titre 2
a	b
c	d
Proportion	

$$\frac{a}{c} = \frac{b}{d} \quad a/b = c/d \quad \text{Les quotients sont égaux}$$

$$\frac{b}{d} = \frac{a}{c} \quad b/a = d/c \quad \text{On peut permuter les lignes ou les colonnes}$$

$$a d = c b \quad \text{Les produits croisés sont égaux}$$

$$a = \frac{c b}{d} \quad b = \frac{a d}{c} \quad c = \frac{a d}{b} \quad d = \frac{c b}{a}$$

$$\text{Inconnue} = \frac{\text{Produit sur l'autre diagonale}}{\text{quatrième valeur}}$$

Quatrième proportionnelle
ou "règle de trois"

$$\frac{a}{c} = \frac{b}{d} = \frac{a+b}{c+d} = \frac{a-b}{c-d} \quad \text{Règle de la somme ou de la différence en ligne}$$

Proportion des grandeurs ondulatoires

Temps	Distance	Oscillations	Angle
t	L	n	θ
1	c	ν	ω
	1		k
T	λ	1	2π
			1
Proportion			

Inutile d'apprendre de formule par cœur :
savoir dresser ce tableau suffit !

LIEN image 14

$t =$ durée	seconde (s)
$L =$ distance de propagation	mètre (m)
$\theta =$ phase	radians (rd)
$c =$ vitesse de propagation	(m s ⁻¹)
$\nu =$ fréquence	hertz (Hz)
$\omega =$ pulsation	(rd s ⁻¹)
$k =$ nombre d'onde	(m ⁻¹) (cm ⁻¹)
$T =$ période	(s)
$\lambda =$ longueur d'onde	(m) (nm ou nm)

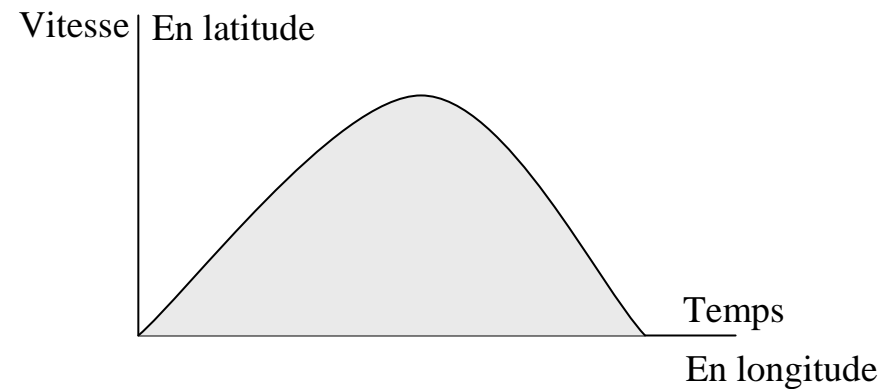
Unités standard

Unités usuelles

Exemples : $k = 2\pi / \lambda$ ou $L\nu = nc$ ou $\frac{1}{t} = \frac{\omega}{\theta}$

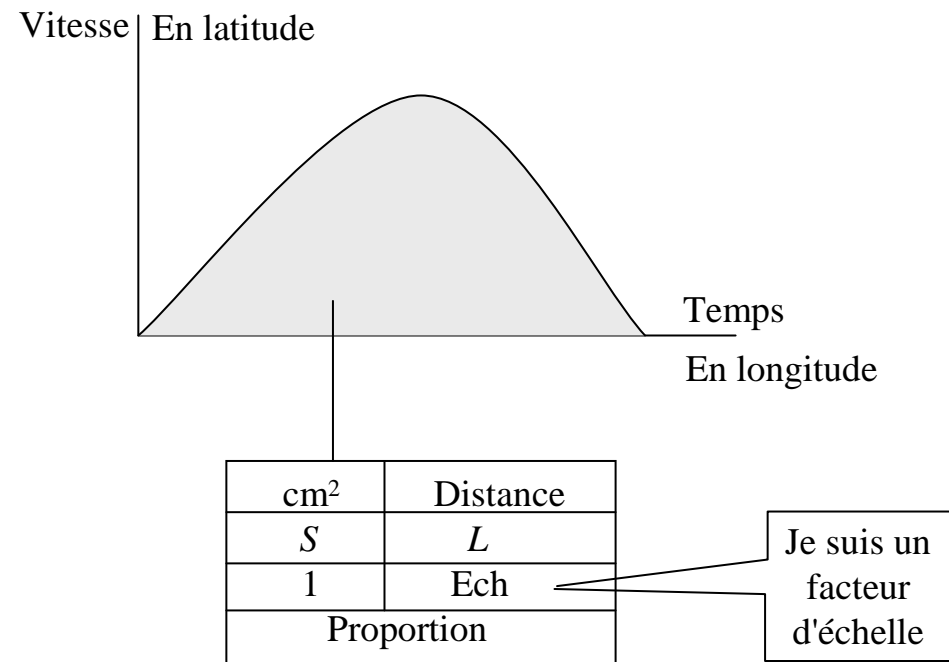
L'histogramme

- Il apparaît au moyen âge
- Il représente une distance parcourue
- Il s'appelle *latitudine*



L'histogramme

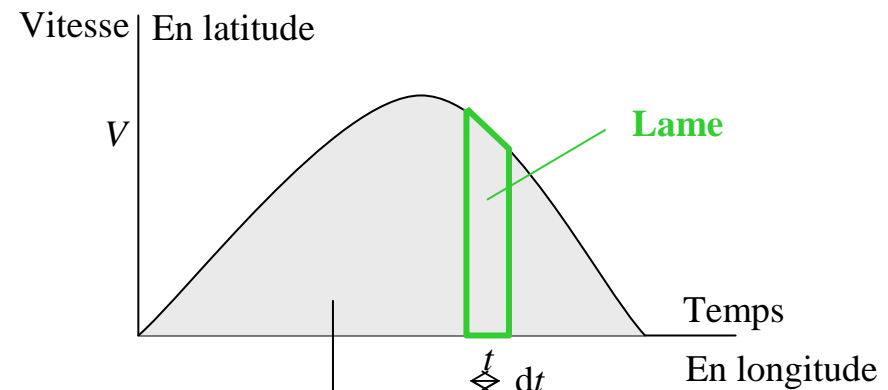
- Il apparaît au moyen âge
- Il représente une distance parcourue
- Il s'appelle *latitudine*



L'histogramme

L'aire de la lame représente dL

- Il apparaît au moyen âge
- Il représente une distance parcourue
- Il s'appelle *latitudine*



cm ²	Distance
S	L
1	Ech
Proportion	

Je suis un
facteur
d'échelle

L'histogramme

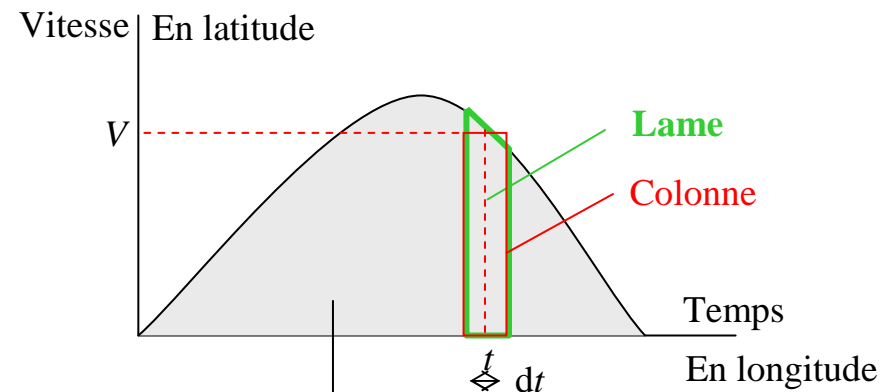
L'aire de la lame représente dL

Si la position de t est bien choisie

l'aire de la colonne est égale à celle de la lame

donc $dL = V dt$

- Il apparaît au moyen âge
- Il représente une distance parcourue
- Il s'appelle *latitudine*



cm ²	Distance
S	L
1	Ech
Proportion	

Je suis un
facteur
d'échelle

L'histogramme

L'aire de la lame représente dL

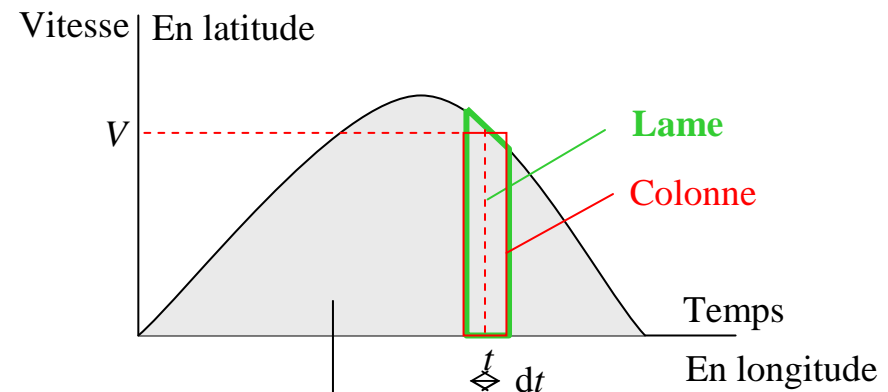
Si la position de t est bien choisie

l'aire de la colonne est égale à celle de la lame

donc $dL = V dt$

Je ne suis pas "d"
multiplié par t ou L , mais
un mot de **deux** lettres
désignant **une** grandeur

- Il apparaît au moyen âge
- Il représente une distance parcourue
- Il s'appelle *latitudine*



cm ²	Distance
S	L
1	Ech
Proportion	

Je suis un
facteur
d'échelle

L'histogramme

L'aire de la lame représente dL

Si la position de t est bien choisie

l'aire de la colonne est égale à celle de la lame

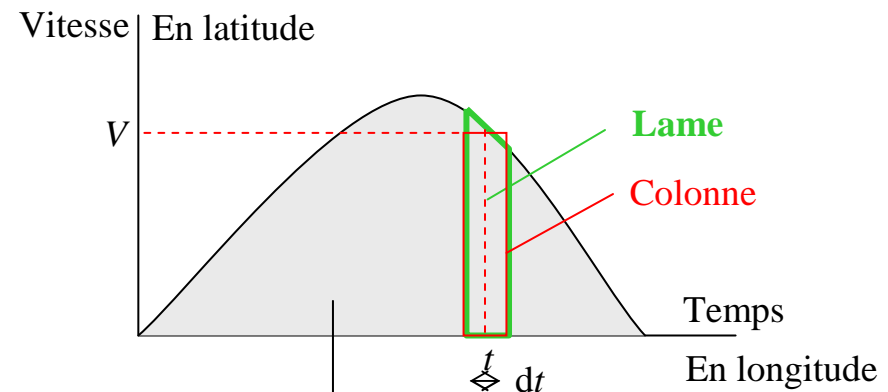
donc $dL = V dt$

Je ne suis pas "d"
multiplié par t ou L , mais
un mot de **deux** lettres
désignant **une** grandeur

Temps	Distance
1	V
dt	dL
Proportion	

Je suis la
vitesse

- Il apparaît au moyen âge
- Il représente une distance parcourue
- Il s'appelle *latitudine*



cm^2	Distance
S	L
1	Ech
Proportion	

Je suis un
facteur
d'échelle

L'histogramme

Cinématique

Ce tableau
exprime un
postulat

Temps	Vitesse
1	a
t	V
Proportion	

Je suis
l'accélération

L'histogramme

Cinématique

Ce tableau
exprime un
postulat

Temps	Vitesse
1	a
t	V
Proportion	

Je suis
l'accélération

Mon équation est
 $V = a t$

L'histogramme

Cinématique

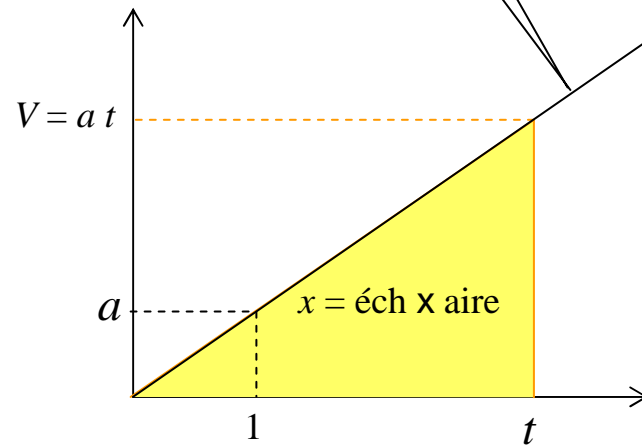
Ce tableau exprime un postulat

Temps	Vitesse
1	a
t	V
Proportion	

Je suis l'accélération

Mon équation est $V = a t$

Théorème de Thalès



L'histogramme

Cinématique

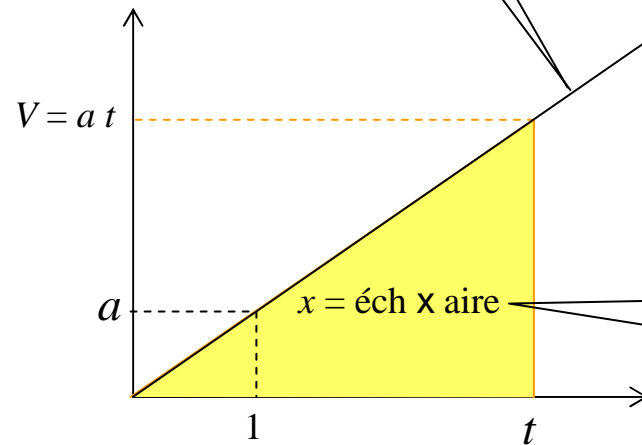
Ce tableau exprime un postulat

Temps	Vitesse
1	a
t	V
Proportion	

Je suis l'accélération

Mon équation est $V = a t$

Théorème de Thalès



Ma formule est $x = a t \times t / 2$

L'histogramme

Cinématique

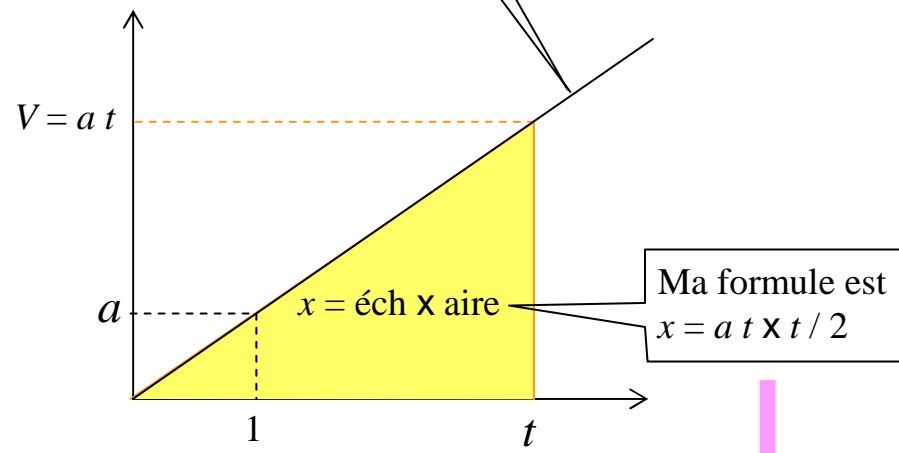
Ce tableau exprime un postulat

Temps	Vitesse
1	a
t	V
Proportion	

Je suis l'accélération

Mon équation est $V = a t$

Théorème de Thalès



Loi de Galilée $x = \frac{1}{2} a t^2$
(1564-1642)

L'histogramme

Cinématique

Ce tableau exprime un postulat

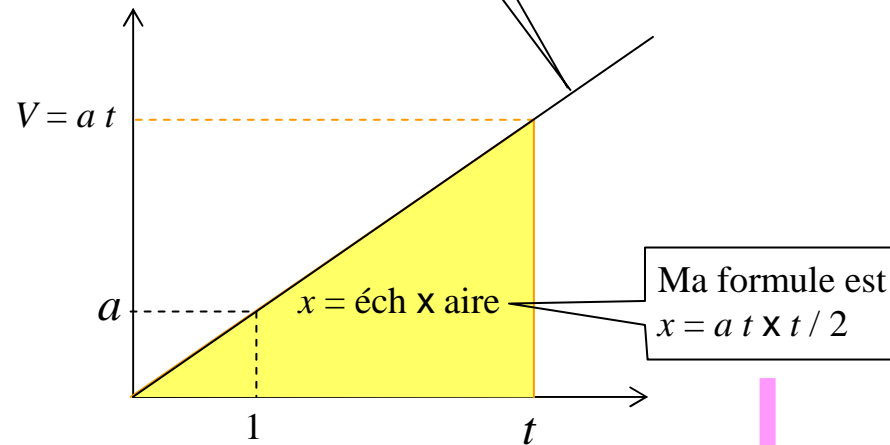
Temps	Vitesse
1	a
t	V

Proportion

Je suis l'accélération

Mon équation est $V = a t$

Théorème de Thalès



$$a = \frac{2x}{t^2}$$

Loi de Galilée $x = \frac{1}{2} a t^2$
(1564-1642)

L'histogramme

Cinématique

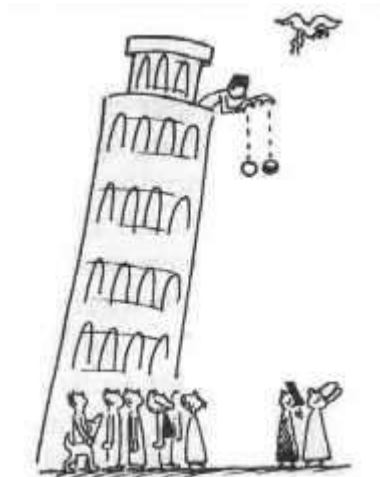
Ce tableau exprime un postulat

Temps	Vitesse
1	a
t	V
Proportion	

Je suis l'accélération

Mon équation est $V = a t$

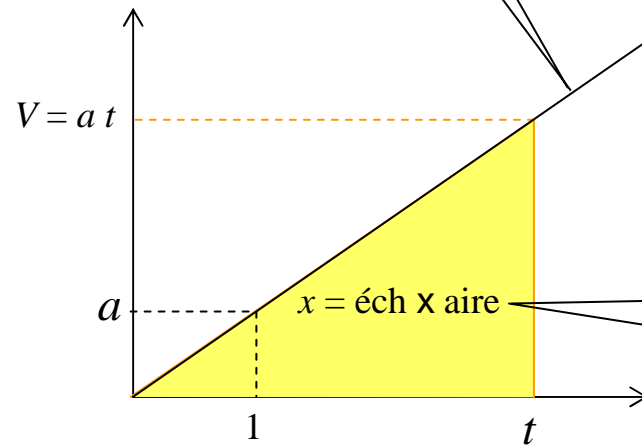
Théorème de Thalès



<https://www.futura-sciences.com/sciences/dossiers/physique-relativite-restreinte-naissance-espace-temps-509/page/3/>

Première mesure d'une accélération de l'histoire !

On choisit x , on mesure t



Ma formule est $x = a t \times t / 2$

$$a = \frac{2x}{t^2}$$

Loi de Galilée $x = \frac{1}{2} a t^2$
(1564-1642)

L'histogramme

Cinématique

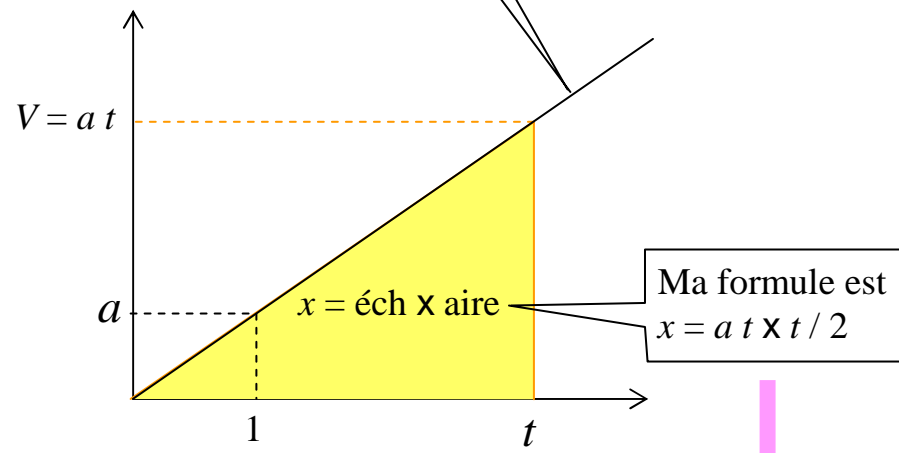
Ce tableau exprime un postulat

Temps	Vitesse
1	a
t	V
Proportion	

Je suis l'accélération

Mon équation est $V = a t$

Théorème de Thalès

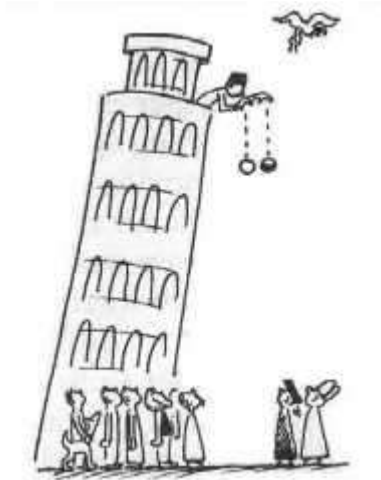


Première mesure d'une accélération de l'histoire !

On choisit x , on mesure t

$$a = \frac{2x}{t^2}$$

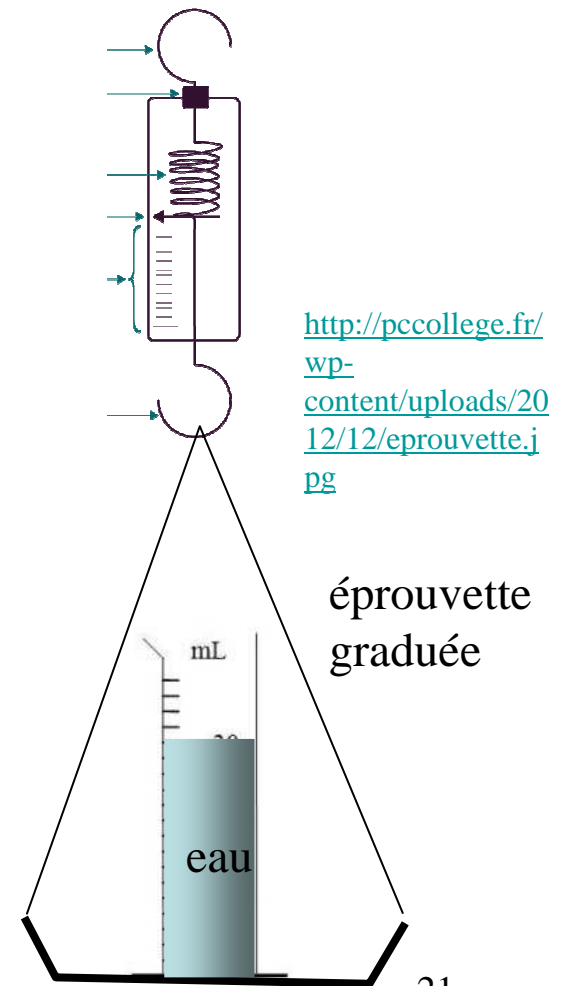
Loi de Galilée $x = \frac{1}{2} a t^2$
(1564-1642)



<https://www.futura-sciences.com/sciences/dossiers/physique-relativite-restreinte-naissance-espace-temps-509/page/3/>

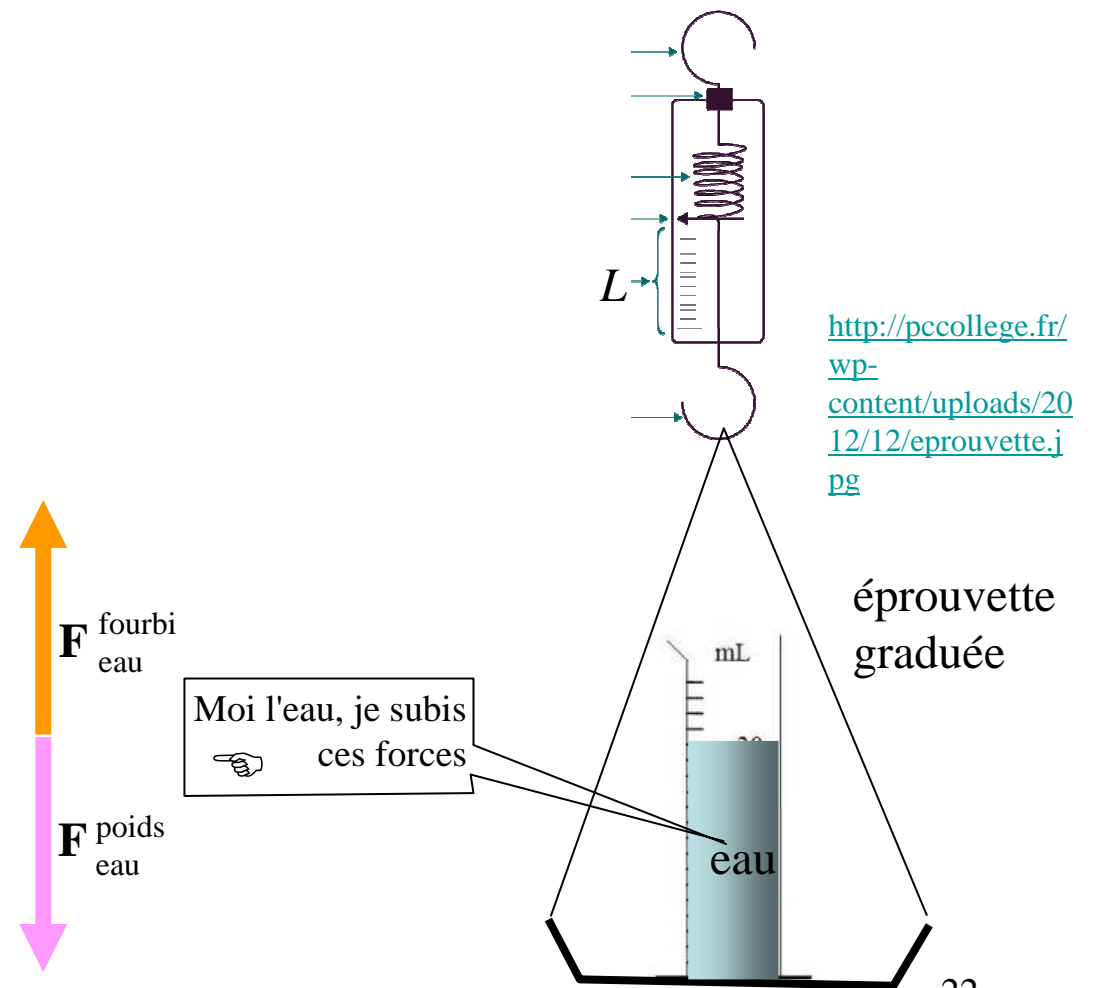
Force

<https://www.maxicours.com/se/cours/mesurer-la-valeur-d-une-force/>



Force

<https://www.maxicours.com/se/cours/mesurer-la-valeur-d-une-force/>

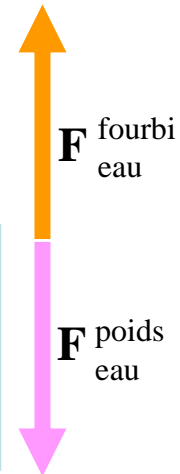


Force

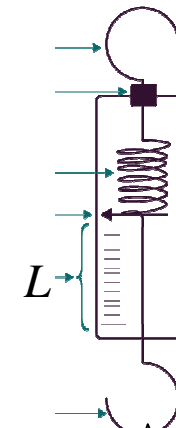
<https://www.maxicours.com/se/cours/mesurer-la-valeur-d-une-force/>

Étalonnage des balances

eau	
millilitre	kilogramme
1000	1
V	m
proportion	

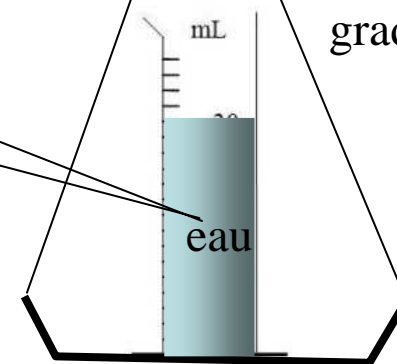


Moi l'eau, je subis ces forces



<http://pccollege.fr/wp-content/uploads/2012/12/eprouvette.jpg>

éprouvette graduée



Force

Postulat de Newton

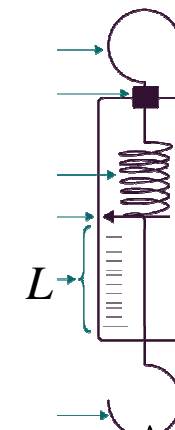
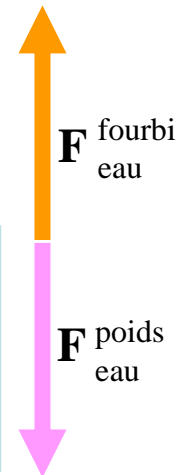
Force	Accélération
F	a
m	1
Proportion	

$$F = m a$$

<https://www.maxicours.com/se/cours/mesurer-la-valeur-d-une-force/>

Étalonnage des balances

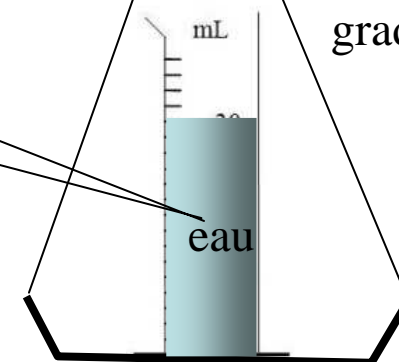
eau	
millilitre	kilogramme
1000	1
V	m
proportion	



<http://pccollege.fr/wp-content/uploads/2012/12/eprouvette.jpg>

éprouvette graduée

Moi l'eau, je subis ces forces



Force

Postulat de Newton

Force	Accélération
F	a
m	1
Proportion	

$$F = m a$$

Cas particulier
fondamental : le
poids des corps

Il accélère les
chutes libres

a est donné
($9,81 \text{ m/s}^2$)

Étalonnage des balances

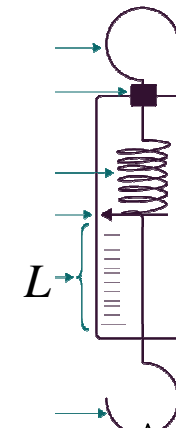
eau	
millilitre	kilogramme
1000	1
V	m
proportion	

F_{fourbi}
 F_{eau}

F_{poids}
 F_{eau}

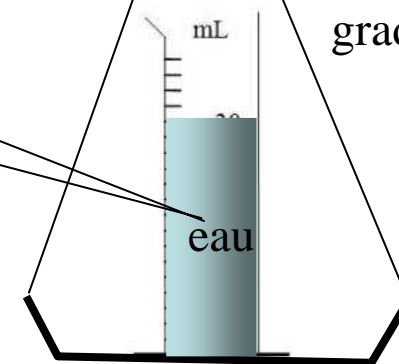
Moi l'eau, je subis
ces forces

<https://www.maxicours.com/se/cours/mesurer-la-valeur-d-une-force/>



<http://pccollege.fr/wp-content/uploads/2012/12/eprouvette.jpg>

éprouvette
graduée



Force

Postulat de Newton

Force	Accélération
F	a
m	1
Proportion	

$$F = m a$$

Cas particulier
fondamental : le
poids des corps

Il accélère les
chutes libres

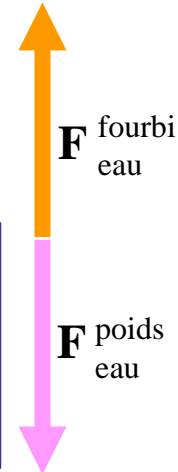
a est donné
(9,81 m/s²)

Étalonnage des dynamomètres

Force	Déformation
$F = m a$	L
K	1
Proportion	

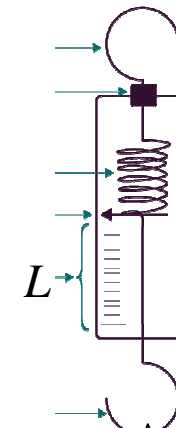
Étalonnage des balances

eau	
millilitre	kilogramme
1000	1
V	m
proportion	



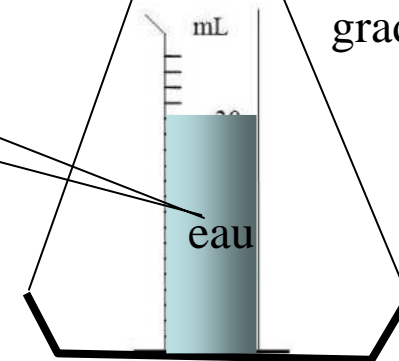
Moi l'eau, je subis
ces forces

<https://www.maxicours.com/se/cours/mesurer-la-valeur-d-une-force/>



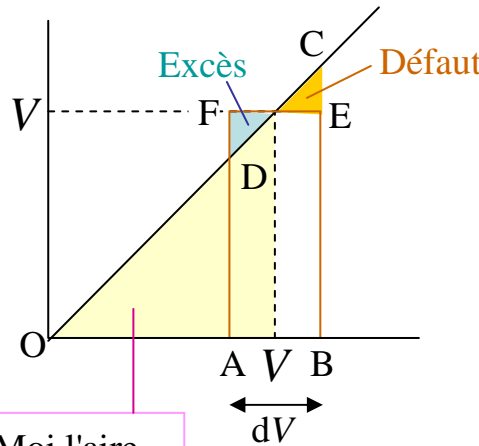
<http://pccollege.fr/wp-content/uploads/2012/12/eprouvette.jpg>

éprouvette
graduée



L'histogramme

Énergie cinétique



Moi, ABCD je suis une lame de Riemann

et nous avons la même aire !

et moi, ABEF je suis une colonne

donc nous sommes exactement la variation du carré de la vitesse

Moi l'aire, je suis le carré de la vitesse

$$d(V^2) = 2 V dV$$

$$d\left(\frac{1}{2} V^2\right) = V dV$$

$$d\left(\frac{1}{2} m V^2\right) = m V dV$$

Je m'appelle travail de la force

Petit calcul de Newton sans but précis

$$F dL = m a V dt = m a dt V = m dV V$$

Postulat de Newton

Définition de la vitesse

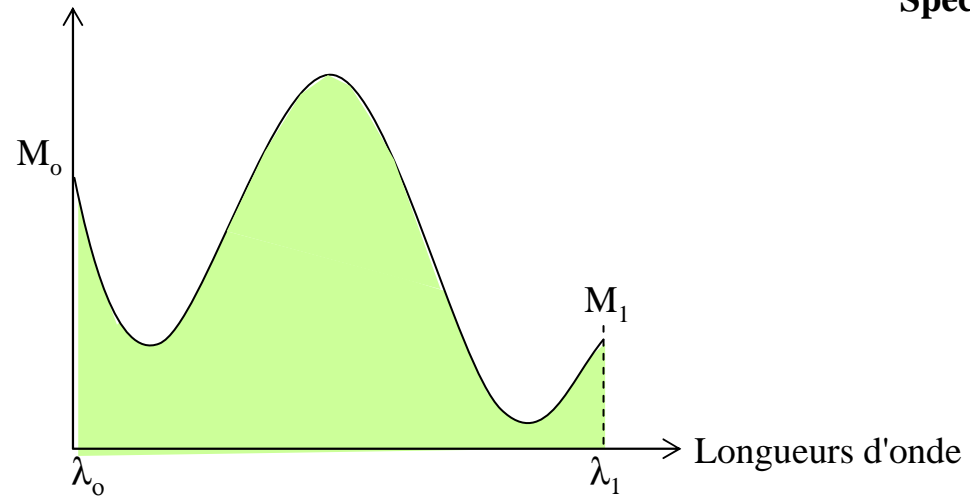
Variation de la vitesse

Je m'appelle énergie cinétique

Le travail de la force est égal à la variation de l'énergie cinétique

L'histogramme

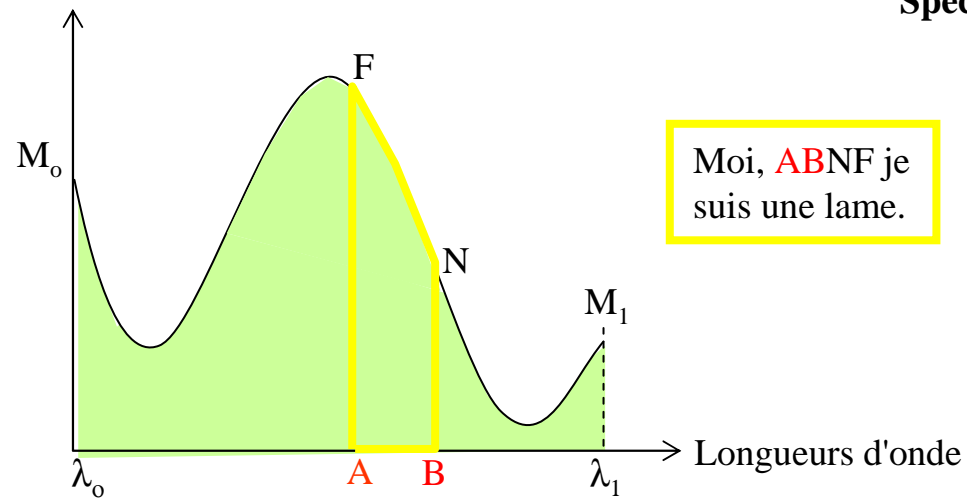
Spectre



Moi, la surface verte, je suis – à un facteur d'échelle près – la puissance émise entre les longueurs d'onde λ_0 et λ_1 .

L'histogramme

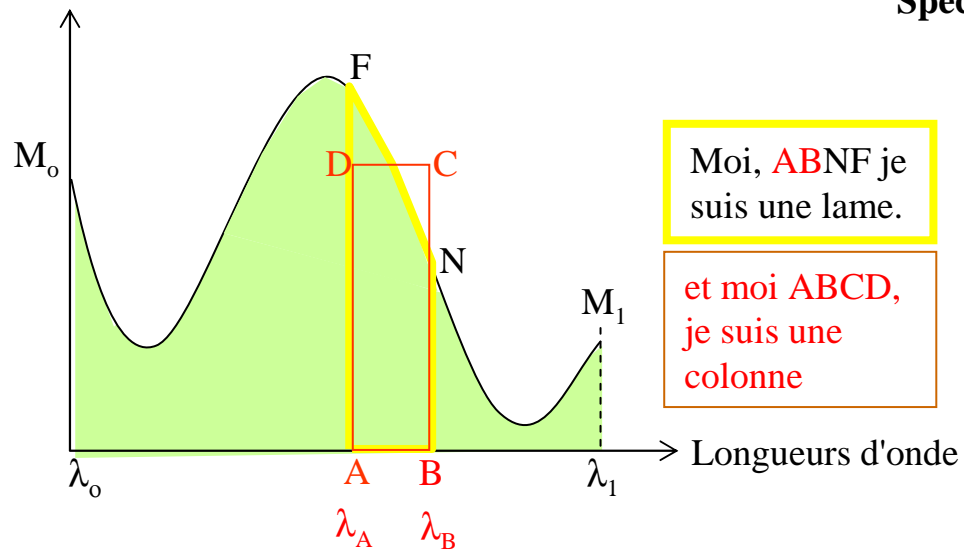
Spectre



Moi, la surface verte, je suis – à un facteur d'échelle près – la puissance émise entre les longueurs d'onde λ_o et λ_1 .

L'histogramme

Spectre



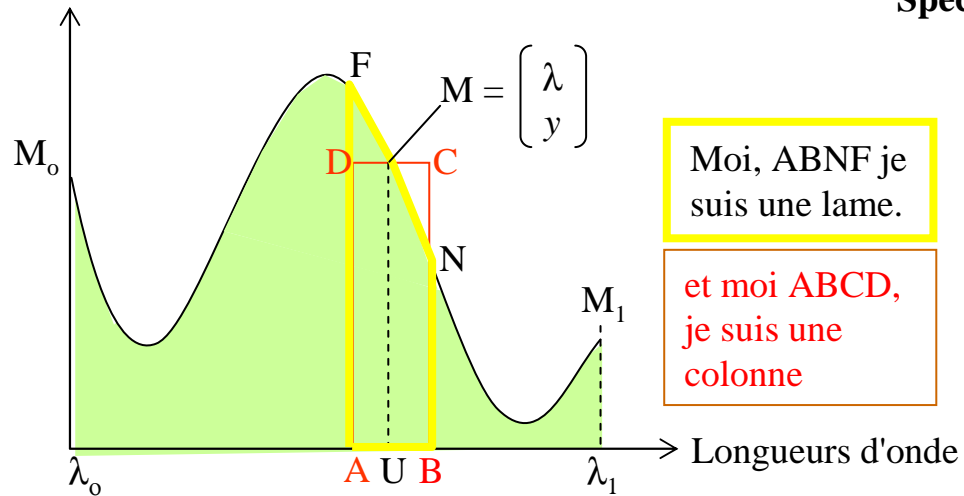
Moi, ABNF je suis une lame.

et moi ABCD, je suis une colonne

Moi, la surface verte, je suis – à un facteur d'échelle près – la puissance émise entre les longueurs d'onde λ_0 et λ_1 .

L'histogramme

Spectre



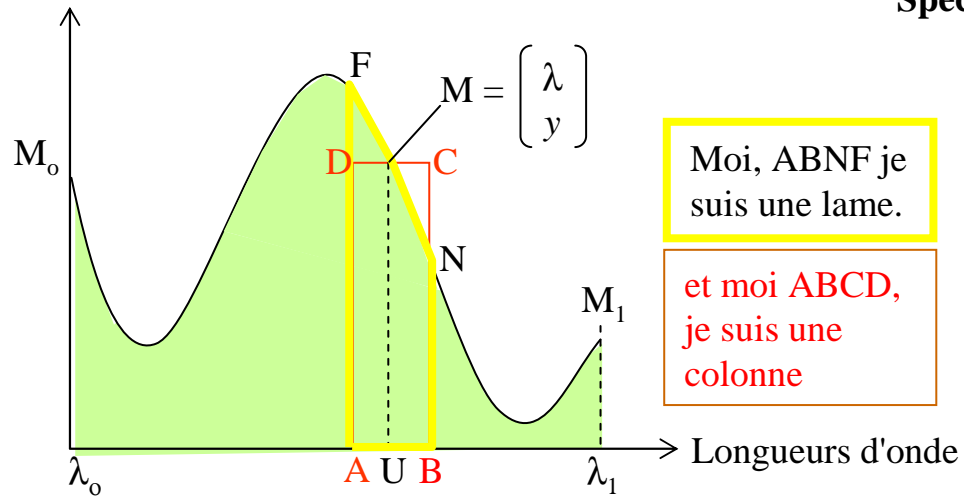
Parce que la position de U est particulière

nous, MFD et MCN avons la même aire

Moi, la surface verte, je suis – à un facteur d'échelle près – la puissance émise entre les longueurs d'onde λ_0 et λ_1 .

L'histogramme

Spectre



Moi, ABNF je suis une lame.

et moi ABCD, je suis une colonne

Parce que la position de U est particulière

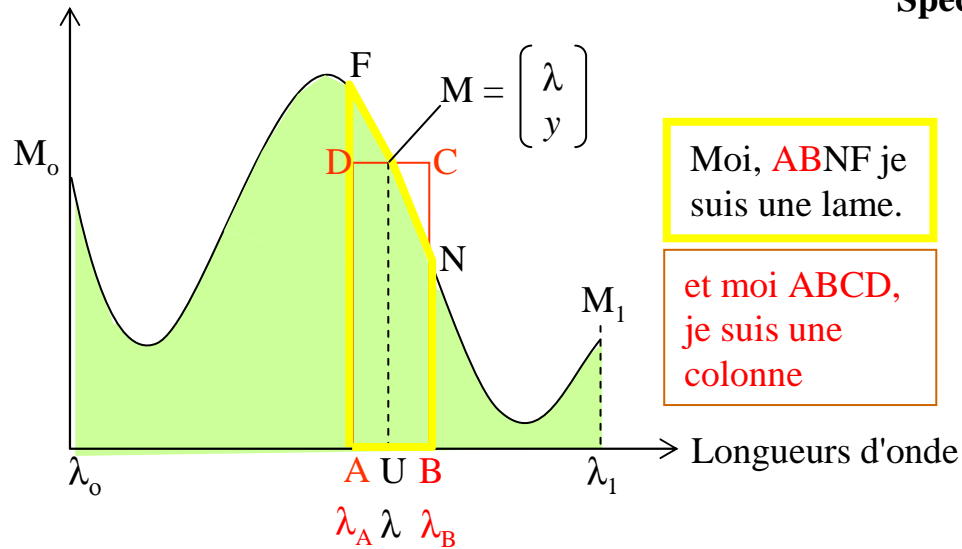
nous, MFD et MCN avons la même aire

donc nous, ABNF et ABCD avons la même aire.

Moi, la surface verte, je suis – à un facteur d'échelle près – la puissance émise entre les longueurs d'onde λ_0 et λ_1 .

L'histogramme

Spectre



Moi, **ABNF** je suis une lame.

et moi **ABCD**, je suis une colonne

Parce que la position de U est particulière

nous, MFD et MCN avons la même aire

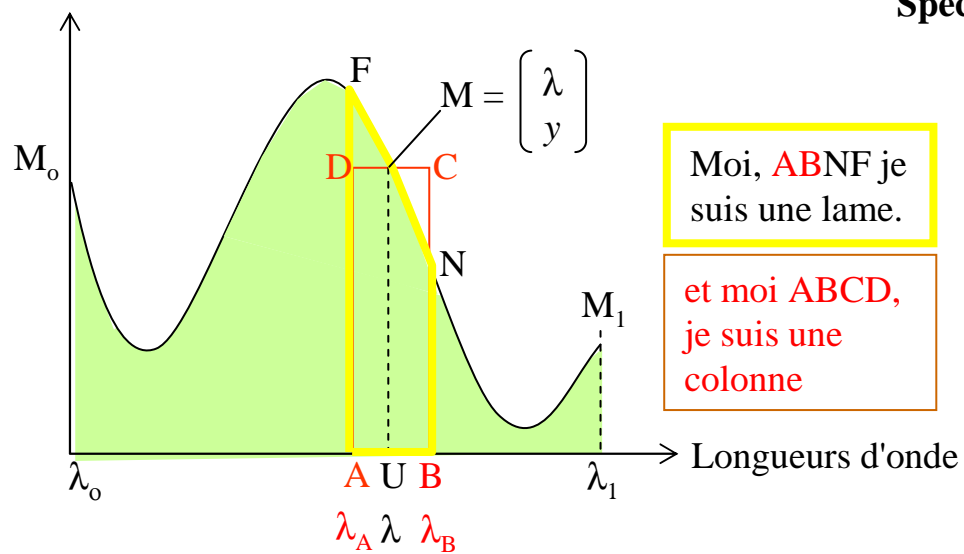
donc nous, **ABNF** et **ABCD** avons la même aire.

donc la puissance exacte émise entre les longueurs d'onde λ_A et λ_B est exactement $dP = UM \times AB$

Moi, la surface verte, je suis – à un facteur d'échelle près – la puissance émise entre les longueurs d'onde λ_0 et λ_1 .

L'histogramme

Spectre



Moi, **ABNF** je suis une lame.

et moi **ABCD**, je suis une colonne

→
Parce que la position de U est particulière

nous, **MFD** et **MCN** avons la même aire

donc nous, **ABNF** et **ABCD** avons la même aire.

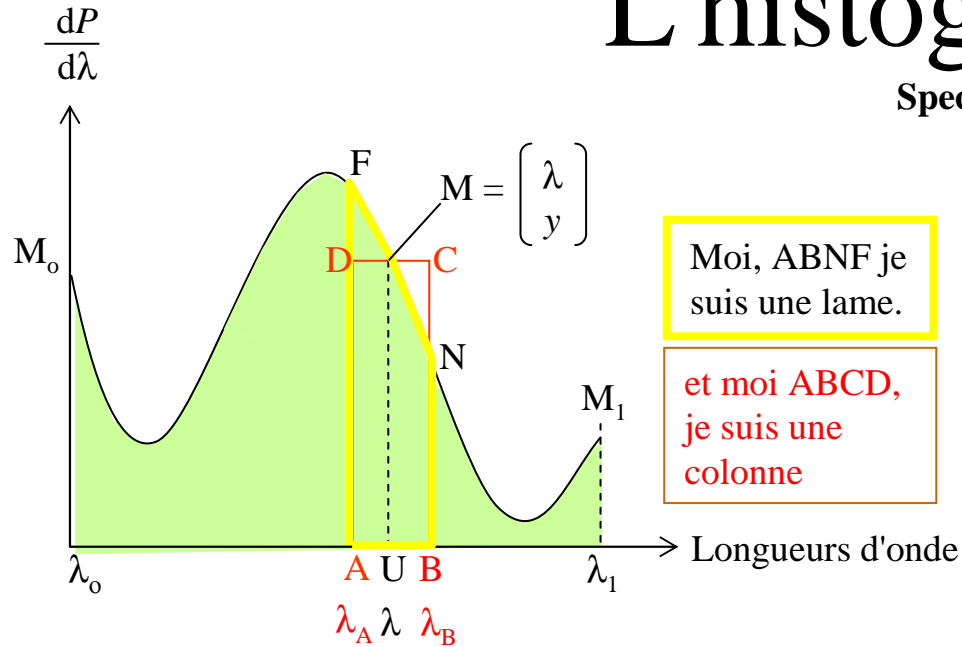
donc la puissance exacte émise entre les longueurs d'onde λ_A et λ_B est exactement $dP = UM \times AB$

On m'appelle $d\lambda$

Moi, la surface verte, je suis – à un facteur d'échelle près – la puissance émise entre les longueurs d'onde λ_0 et λ_1 .

L'histogramme

Spectre



Moi, ABNF je suis une lame.

et moi ABCD, je suis une colonne

Parce que la position de U est particulière

nous, MFD et MCN avons la même aire

donc nous, ABNF et ABCD avons la même aire.

donc la puissance exacte émise entre les longueurs d'onde λ_A et λ_B est exactement $dP = UM \times AB$

Moi, la surface verte, je suis – à un facteur d'échelle près – la puissance émise entre les longueurs d'onde λ_0 et λ_1 .

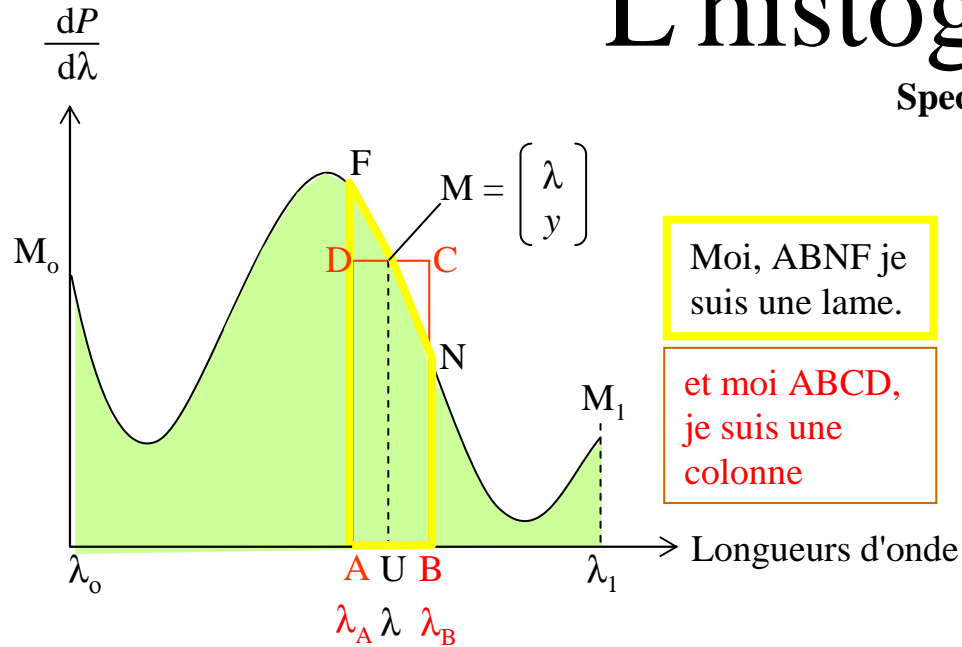
donc je suis le quotient $dP / d\lambda$

On m'appelle $d\lambda$

qui est reporté en ordonnées.

L'histogramme

Spectre



Moi, la surface verte, je suis – à un facteur d'échelle près – la puissance émise entre les longueurs d'onde λ_0 et λ_1 .

L'addition des aires de toutes les lames est exactement cette puissance

Moi, ABNF je suis une lame.

et moi ABCD, je suis une colonne

Parce que la position de U est particulière

nous, MFD et MCN avons la même aire

donc nous, ABNF et ABCD avons la même aire.

donc la puissance exacte émise entre les longueurs d'onde λ_A et λ_B est exactement $dP = UM \times AB$

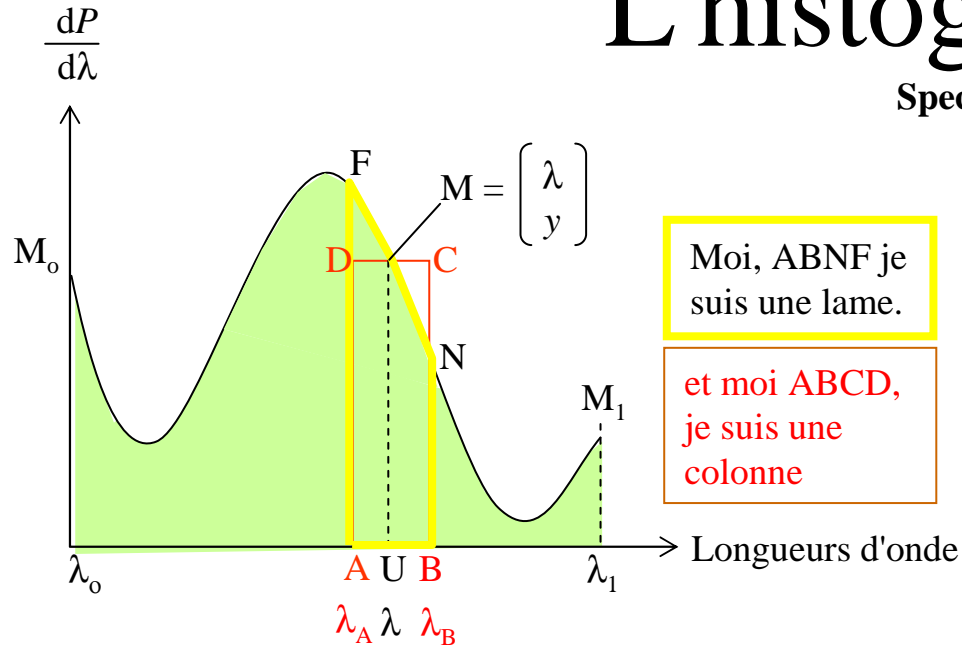
donc je suis le quotient $dP / d\lambda$

On m'appelle $d\lambda$

qui est reporté en ordonnées.

L'histogramme

Spectre



Moi, ABNF je suis une lame.

et moi ABCD, je suis une colonne

Parce que la position de U est particulière

nous, MFD et MCN avons la même aire

donc nous, ABNF et ABCD avons la même aire.

donc la puissance exacte émise entre les longueurs d'onde λ_A et λ_B est exactement $dP = UM \times AB$

donc je suis le quotient $dP / d\lambda$

On m'appelle $d\lambda$

qui est reporté en ordonnées.

Moi, la surface verte, je suis – à un facteur d'échelle près – la puissance émise entre les longueurs d'onde λ_0 et λ_1 .

L'addition des aires de toutes les lames est exactement cette puissance

c'est pourquoi elle est écrite

$$\int_{\lambda_0}^{\lambda_1} \frac{dP}{d\lambda} d\lambda$$

Initiale du mot "somme"

La lumière

Grandeurs et unités

Le **flux lumineux** est la puissance totale émise par une source.

Unité : le **watt W**.



La lumière

Grandeurs et unités

Le **flux lumineux** est la puissance totale émise par une source.

Unité : le **watt W**.

Φ


$$\frac{d\Phi}{d\Omega}$$

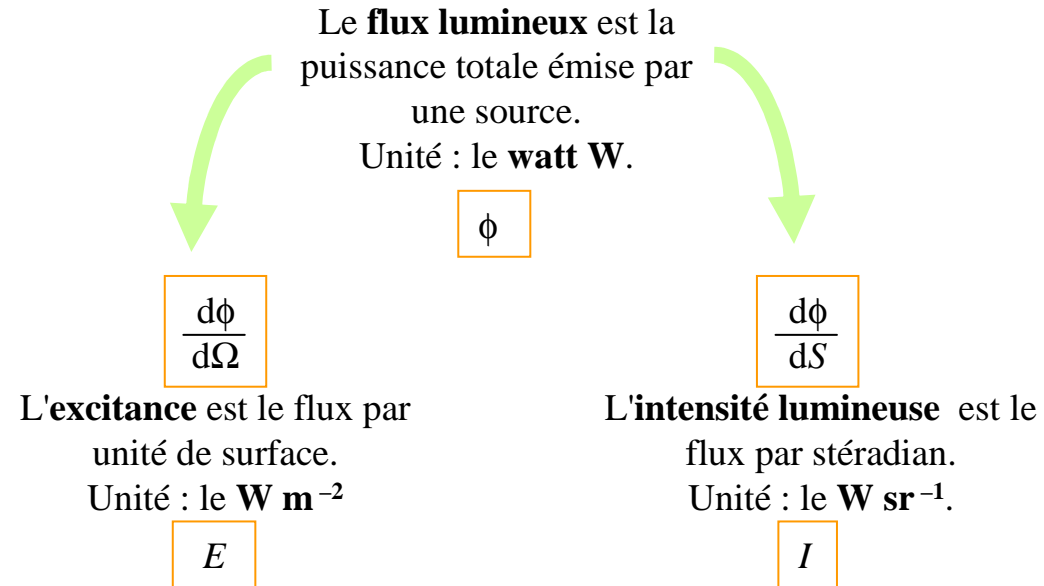
L'**excitance** est le flux par unité de surface.

Unité : le **W m⁻²**

E

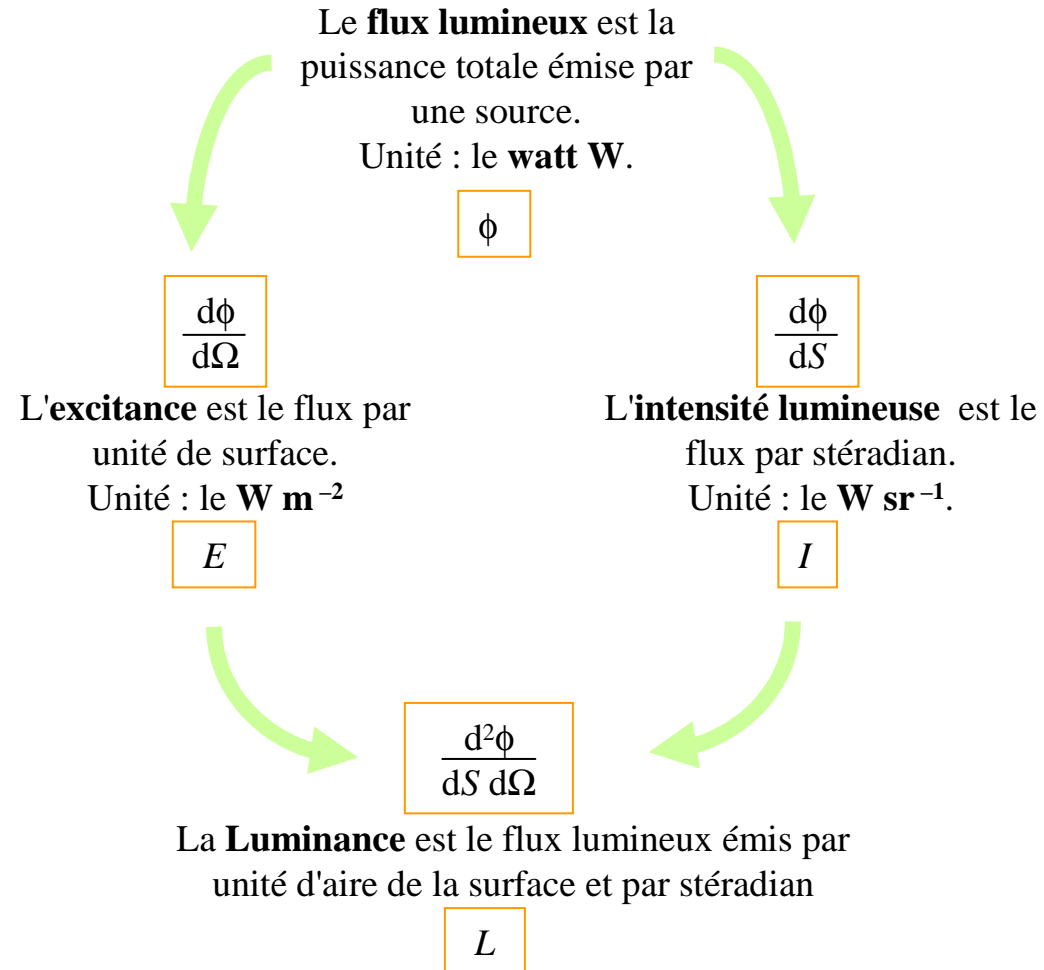
La lumière

Grandeurs et unités



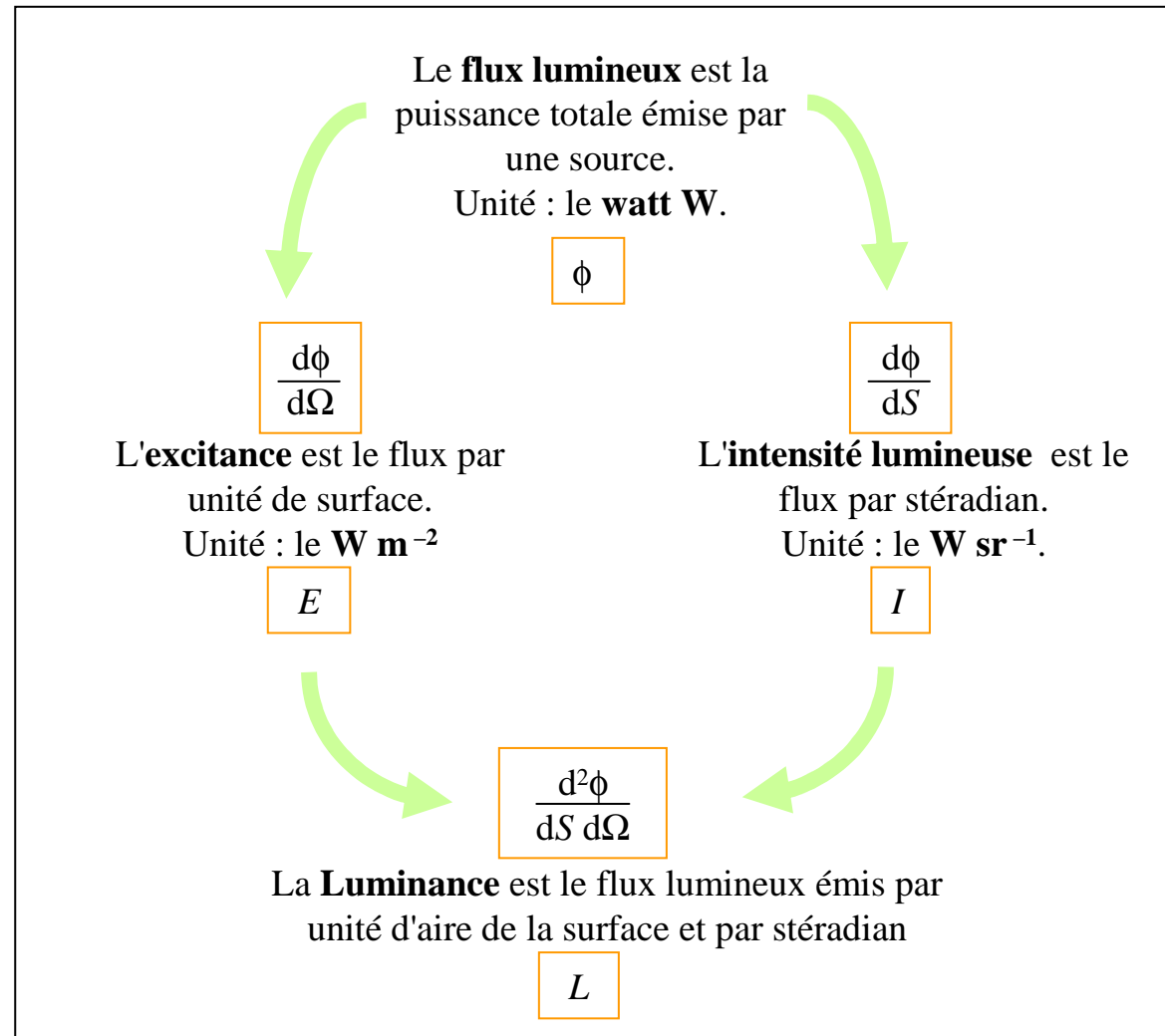
La lumière

Grandeurs et unités



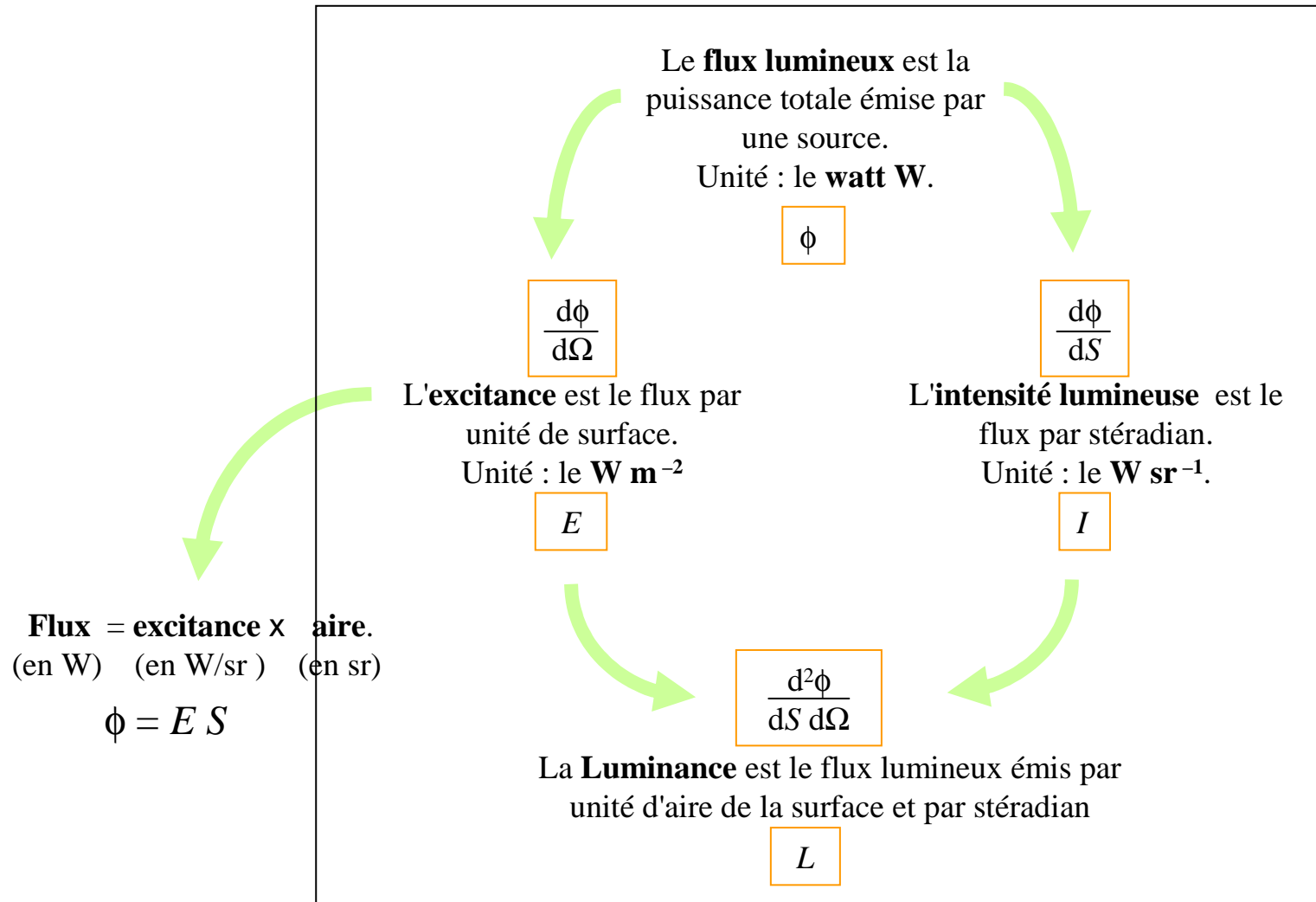
La lumière

Grandeurs et unités



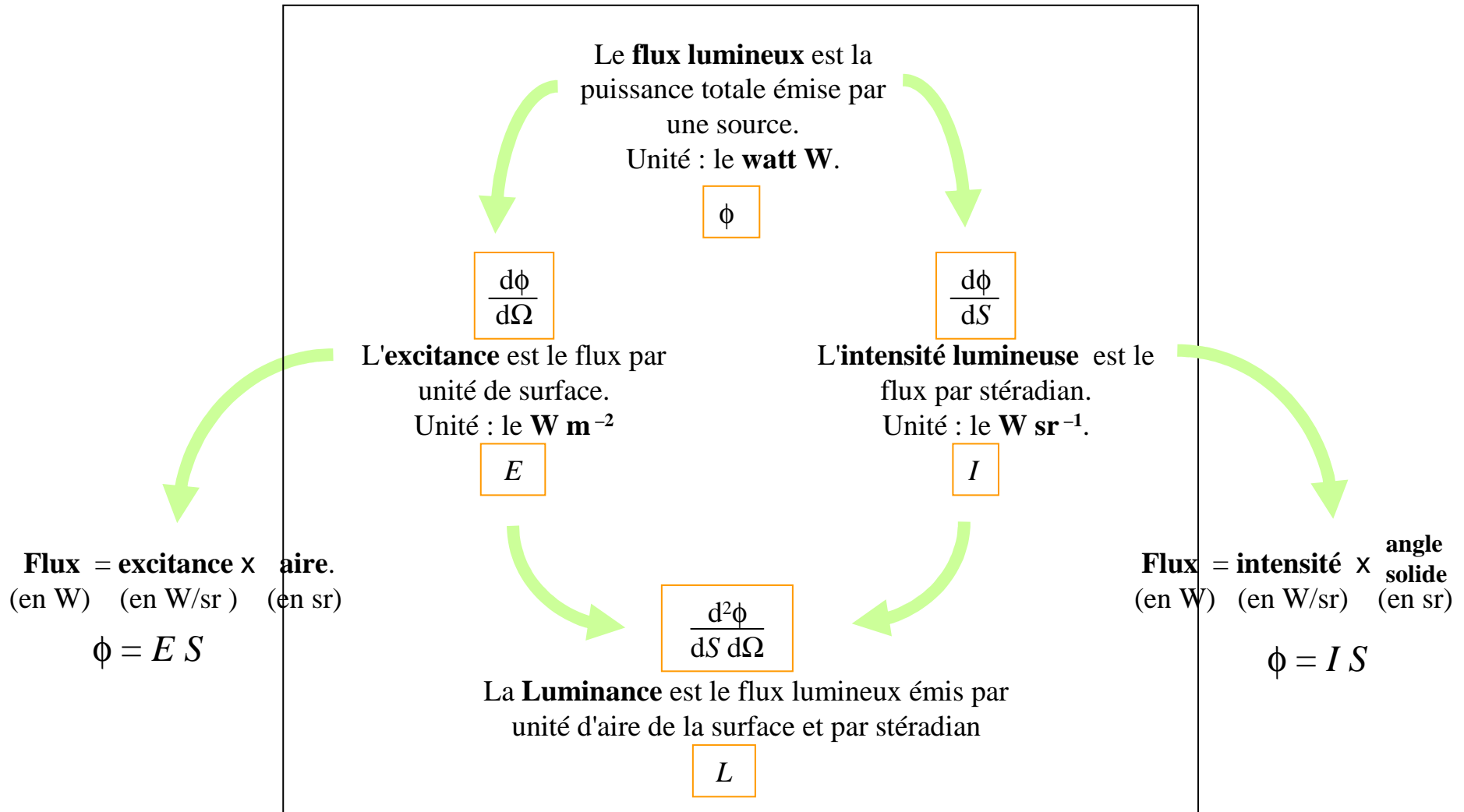
La lumière

Grandeurs et unités



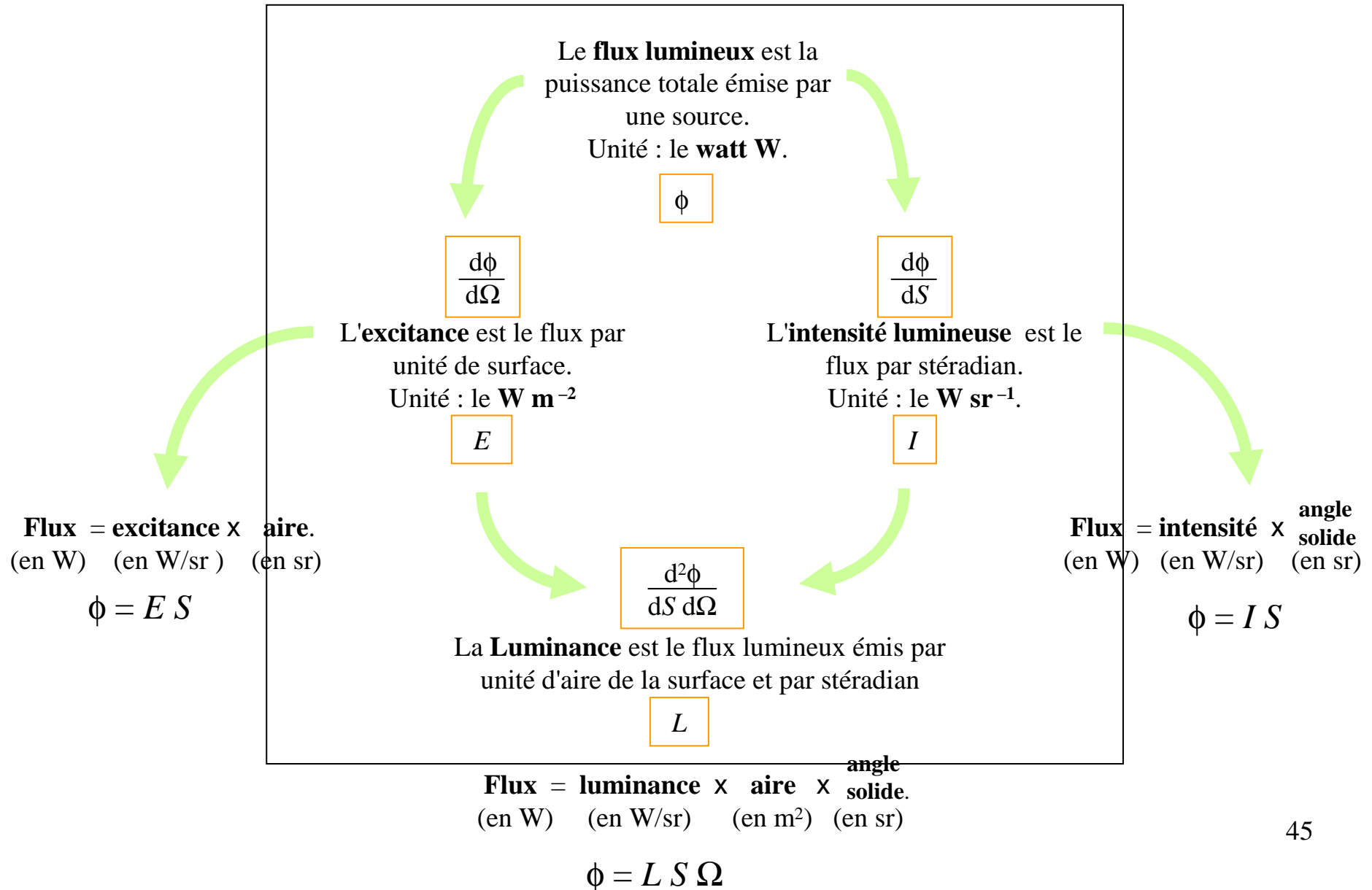
La lumière

Grandeurs et unités



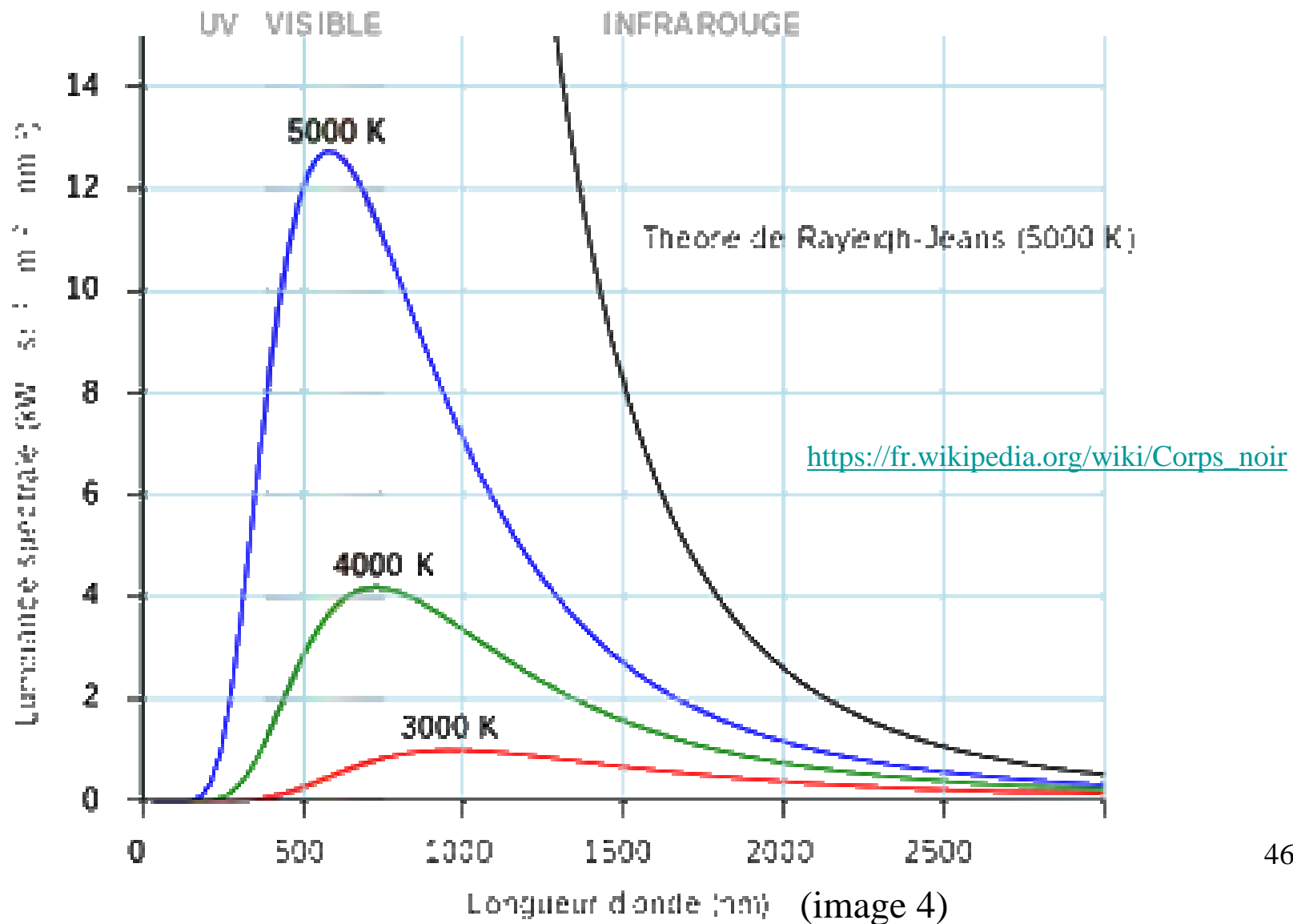
La lumière

Grandeurs et unités



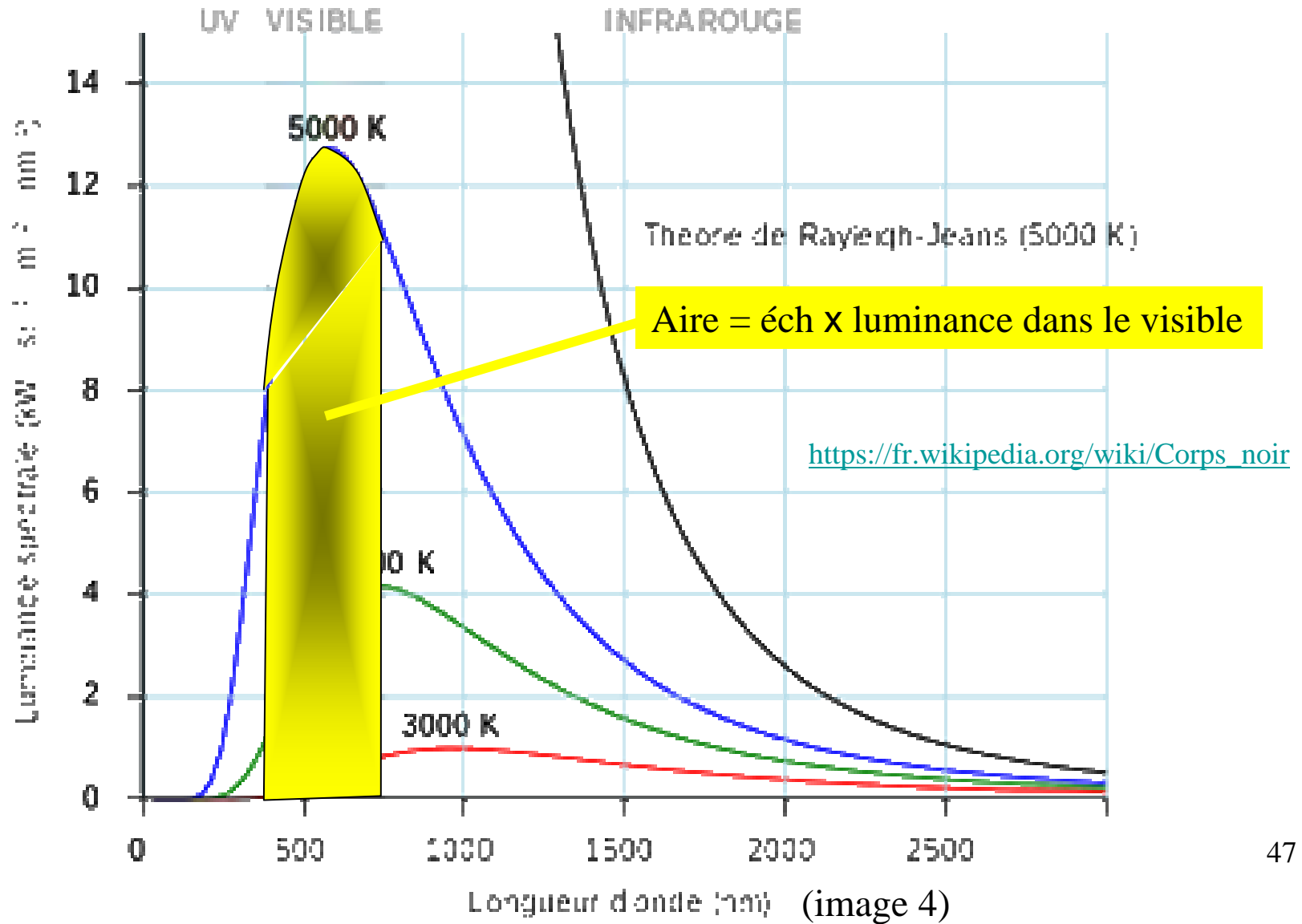
Lire un spectre

Corps noir



Lire un spectre

Corps noir



Lire un spectre

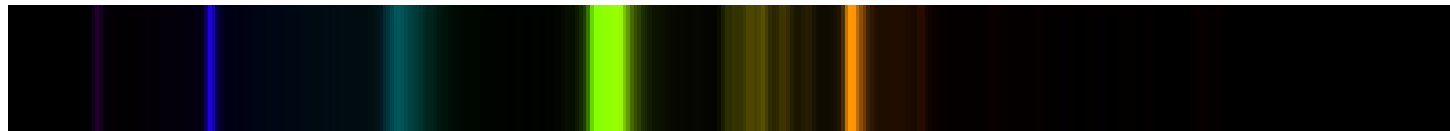
Corps noir

(un exercice)

Comment fairiez-vous pour estimer "à la louche" la part dans le visible du rayonnement du corps noir ?

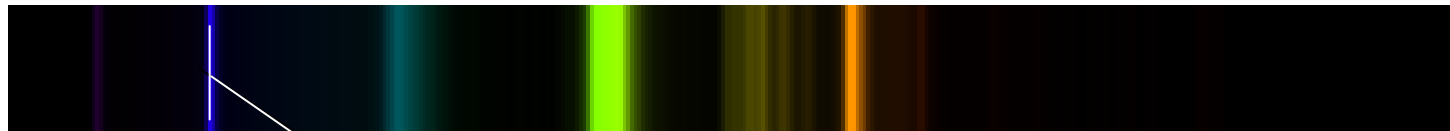
Lire un spectre

Corps noir
(un exercice)



Lire un spectre

Corps noir
(un exercice)



Objectif du capteur : il donne directement $dL / d\lambda$:
c'est une fente très fine.

Lire un spectre

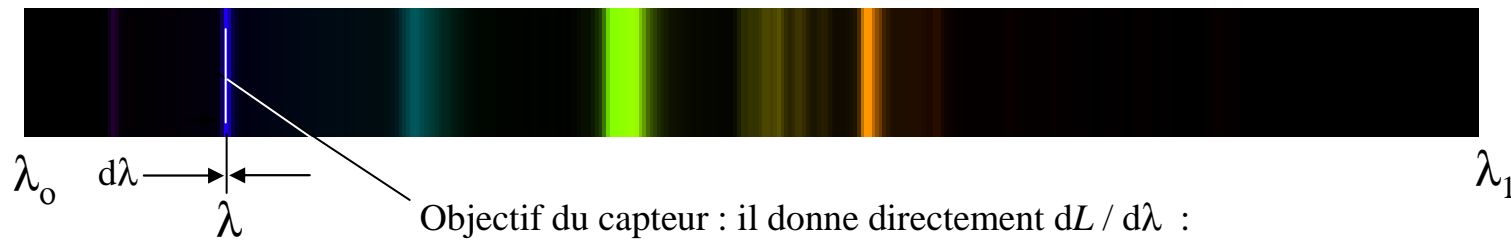
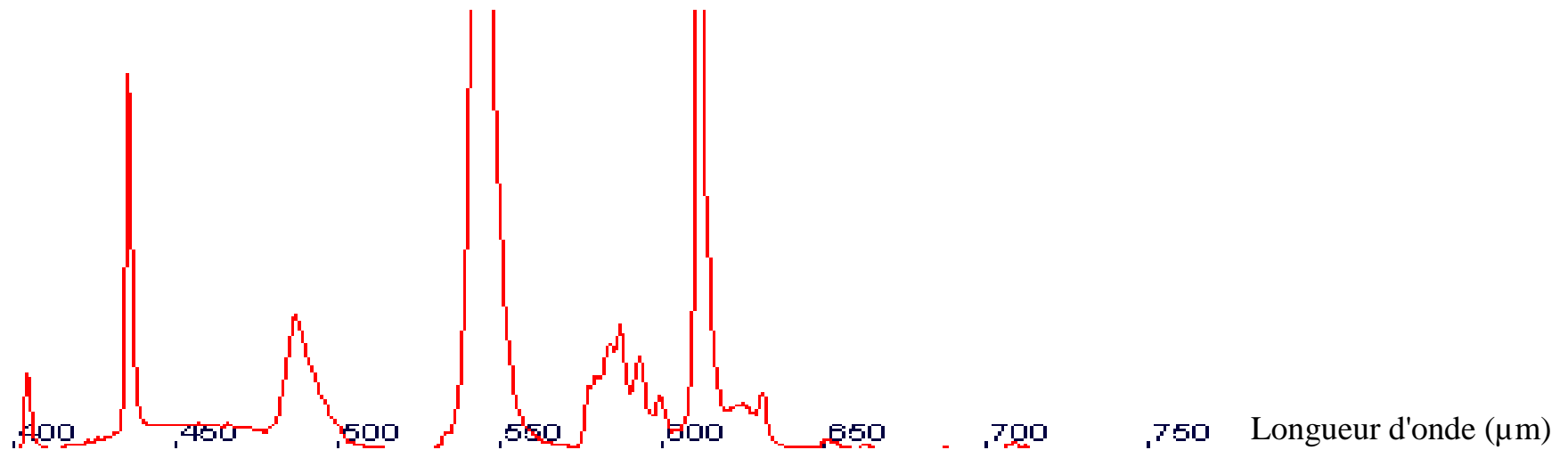
Corps noir
(un exercice)



Objectif du capteur : il donne directement $dL / d\lambda$:
c'est une fente très fine.

Lire un spectre

Corps noir
(un exercice)



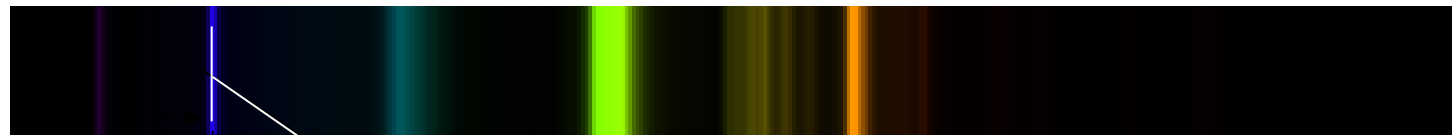
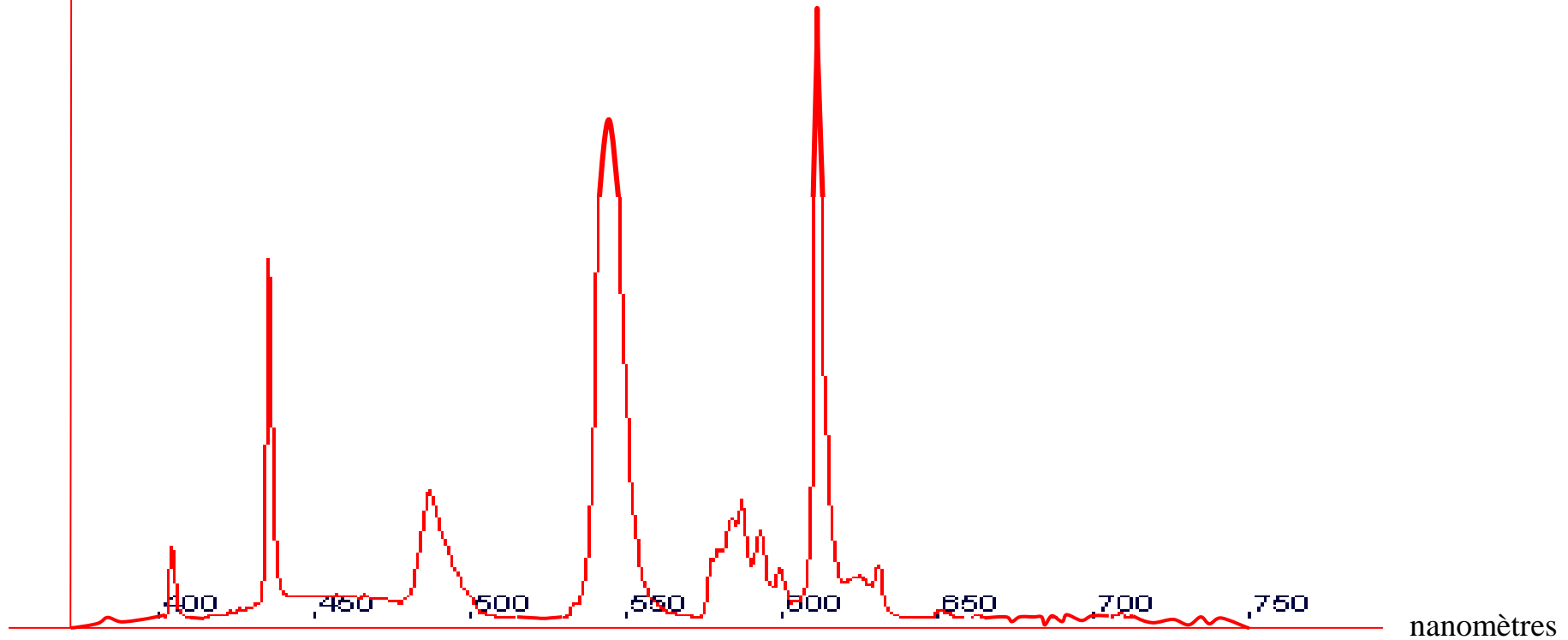
Objectif du capteur : il donne directement $dL / d\lambda$:
c'est une fente très fine.

Lire un spectre

Émission par un gaz

$$\frac{dL}{d\lambda} = L_\lambda$$

Luminance spectrale
 $\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1} \text{nm}^{-1}$



Objectif du capteur : il donne directement $dL / d\lambda$:
c'est une fente très fine.

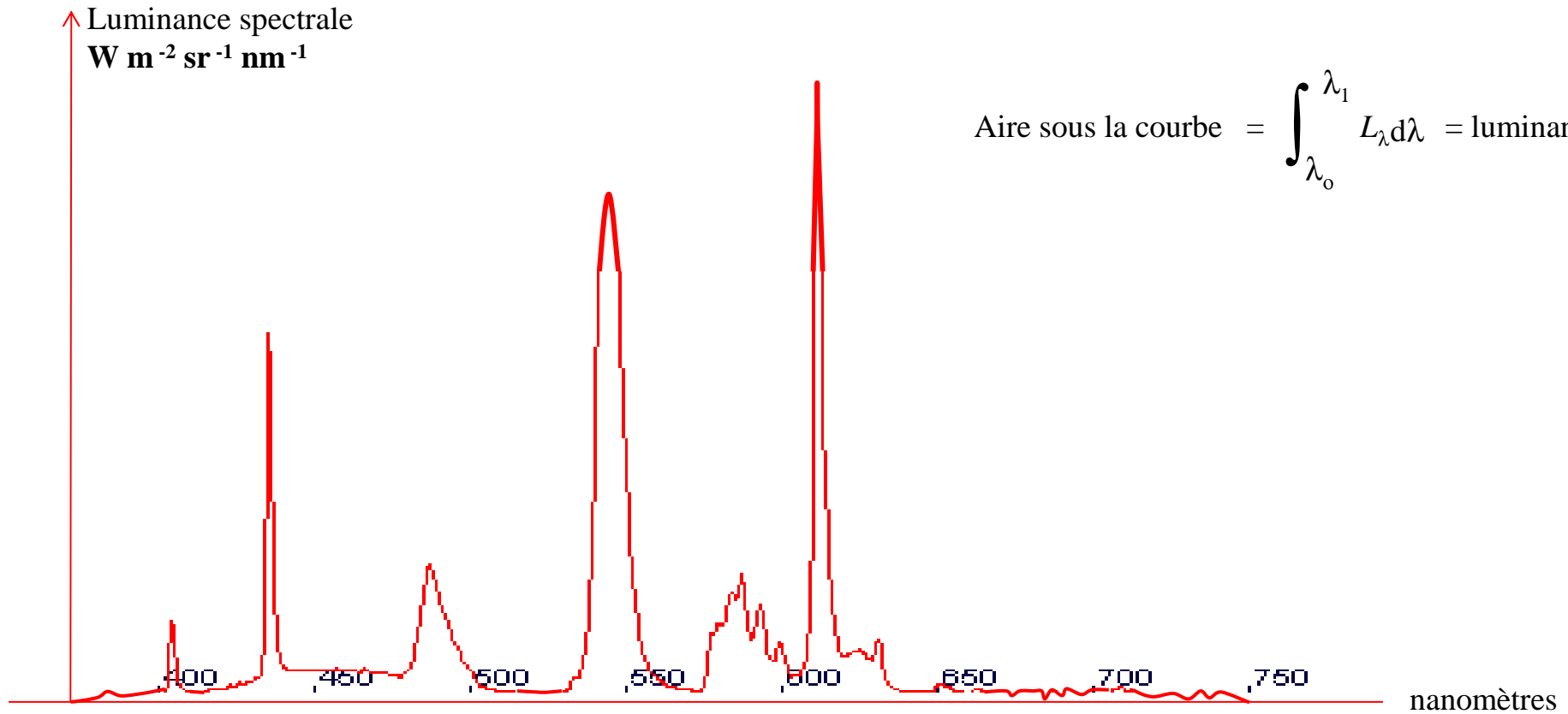
Lire un spectre

Émission par un gaz

$$\frac{dL}{d\lambda} = L_\lambda$$

Luminance spectrale
 $\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1} \text{nm}^{-1}$

$$\text{Aire sous la courbe} = \int_{\lambda_0}^{\lambda_1} L_\lambda d\lambda = \text{luminance } L$$

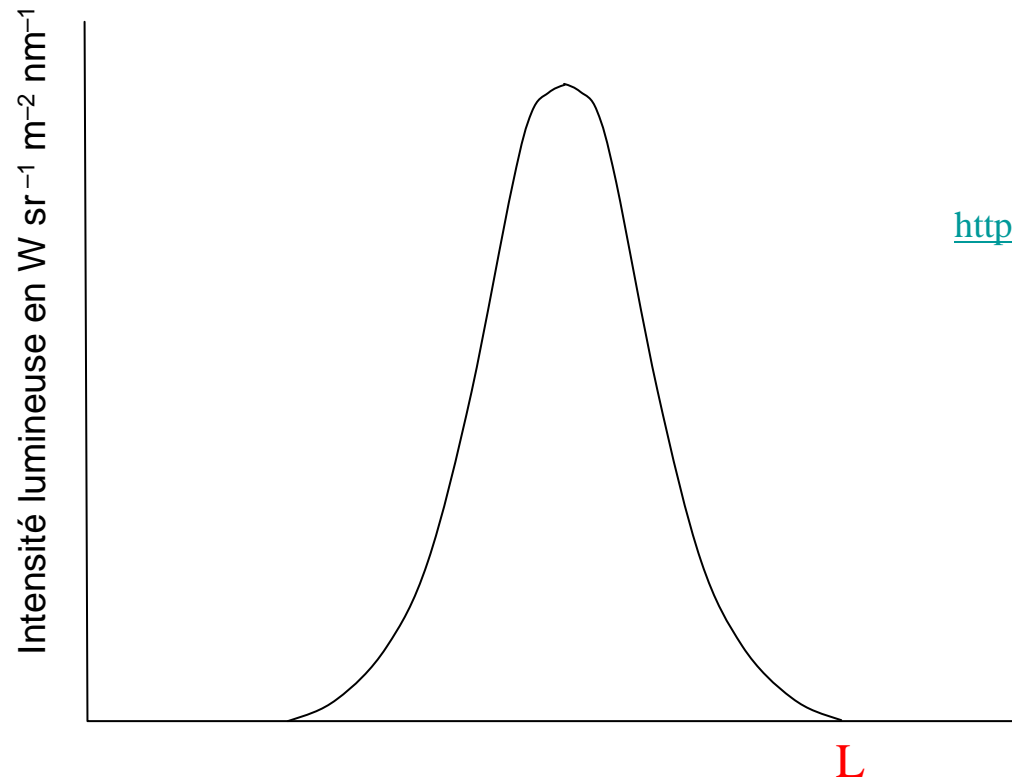


Objectif du capteur : il donne directement $dL / d\lambda$:
c'est une fente très fine.

Lire un spectre

Aire d'un pic

$$\text{aire IJP} + \text{aire KLQ} = \text{aire PMR} + \text{aire QSM}$$

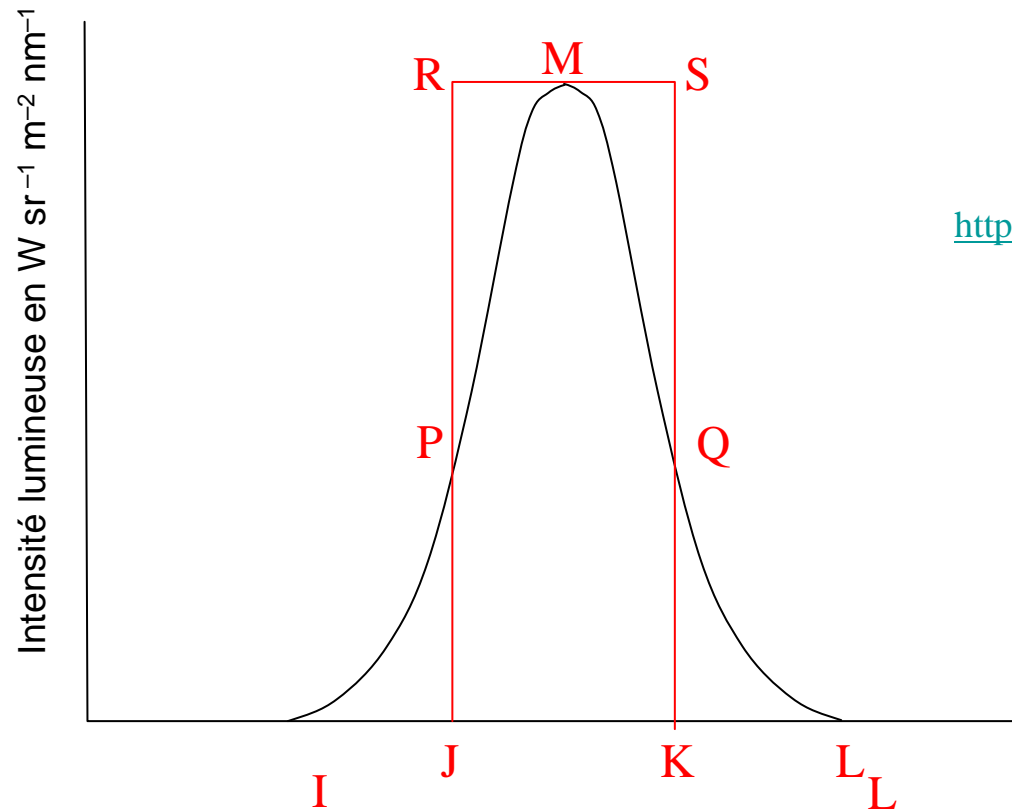


<https://promenade.imcce.fr/fr/pages3/327.html>

Lire un spectre

Aire d'un pic

$$\text{aire IJP} + \text{aire KLQ} = \text{aire PMR} + \text{aire QSM}$$

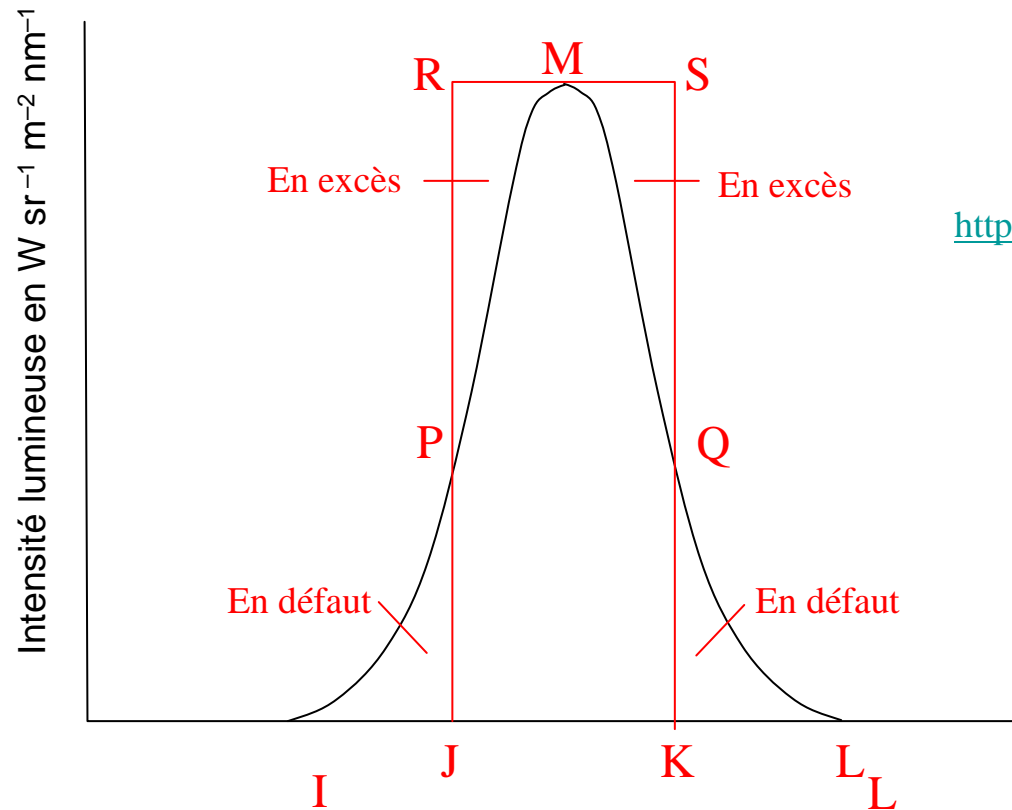


<https://promenade.imcce.fr/fr/pages3/327.html>

Lire un spectre

Aire d'un pic

$$\text{aire IJP} + \text{aire KLQ} = \text{aire PMR} + \text{aire QSM}$$

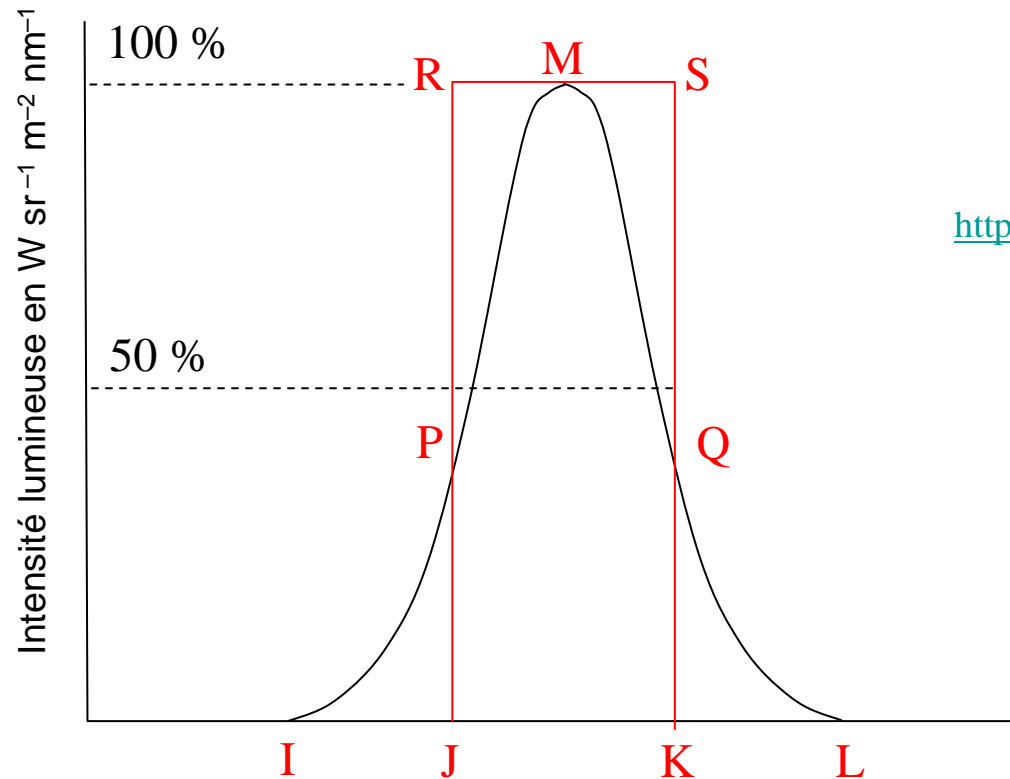


<https://promenade.imcce.fr/fr/pages3/327.html>

Lire un spectre

Aire d'un pic

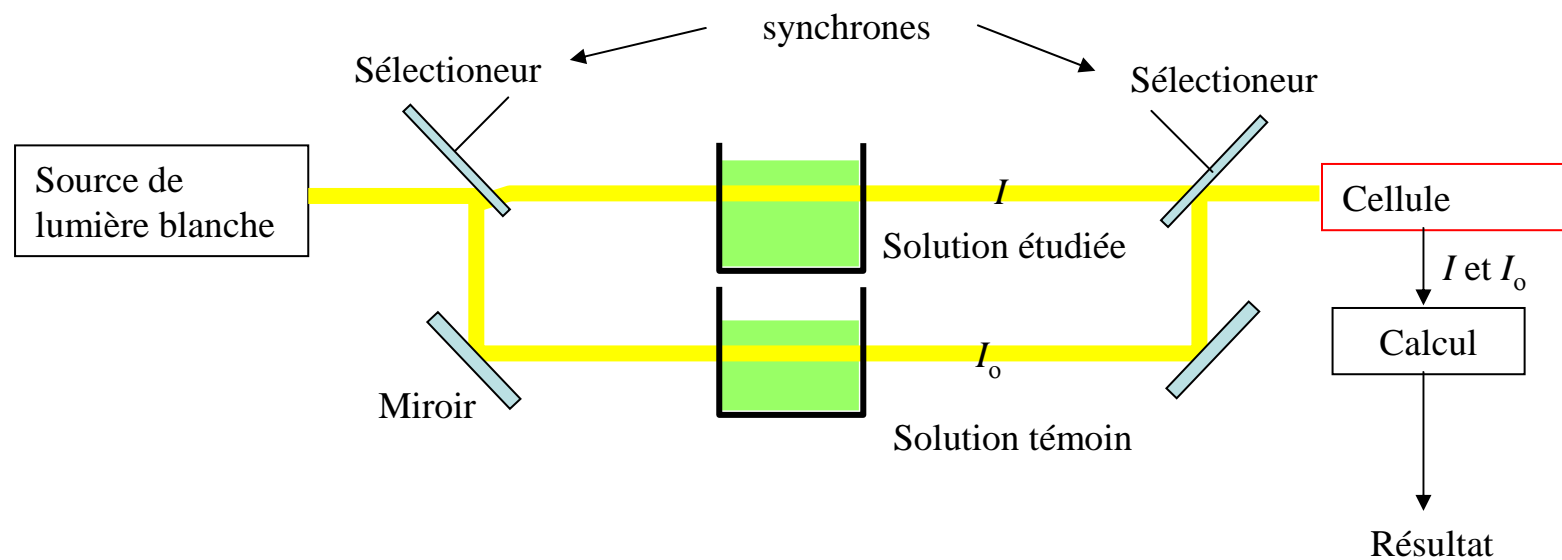
$$\text{aire IJP} + \text{aire KLQ} = \text{aire PMR} + \text{aire QSM}$$



<https://promenade.imcce.fr/fr/pages3/327.html>

Lire un spectre

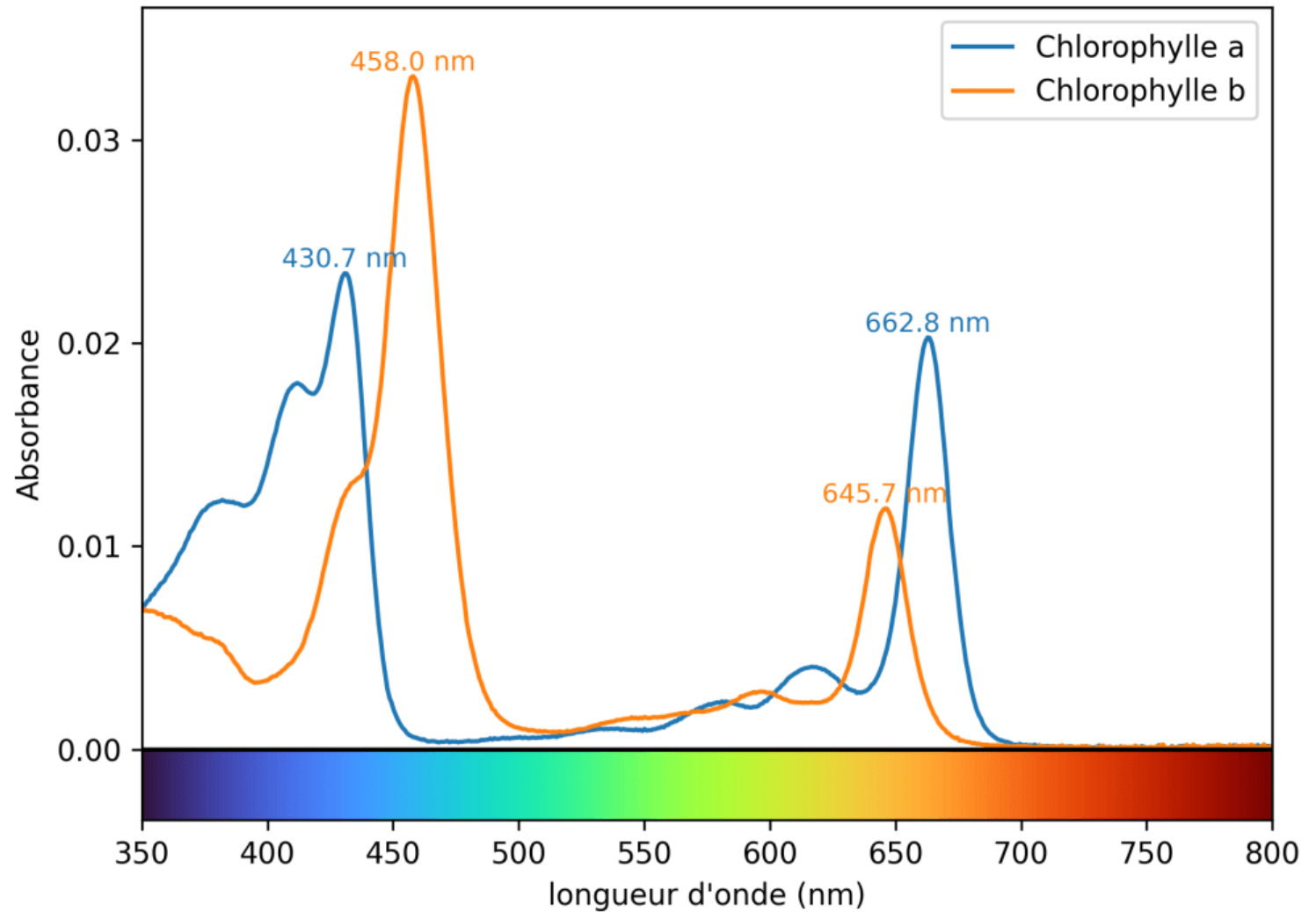
Liquides



Lire un spectre

Liquides

Spectre d'absorption de la chlorophylle

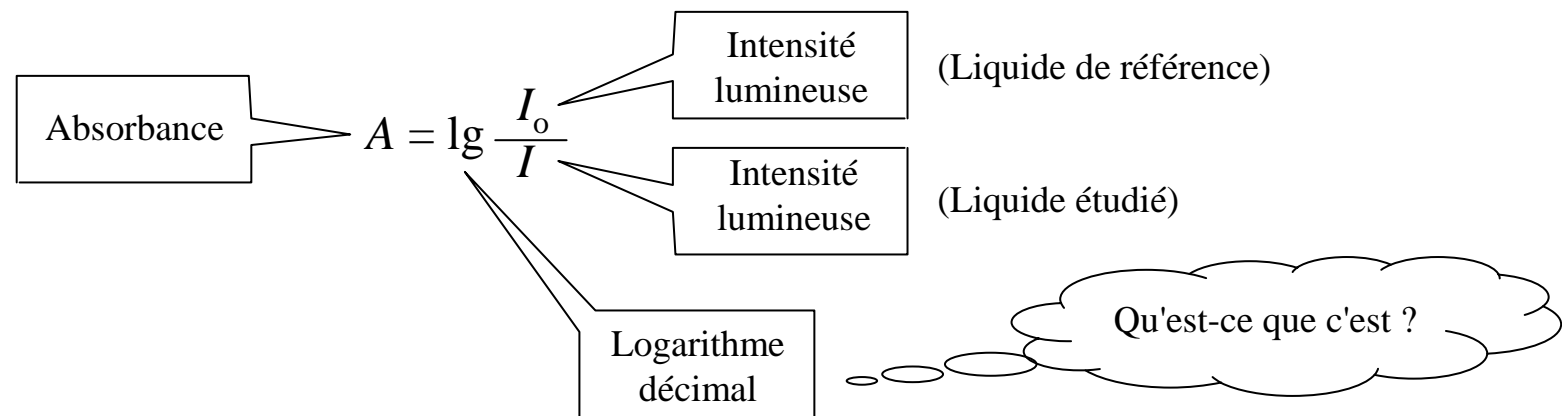


Qu'est-ce que c'est ?

Lire un spectre

Liquides

Loi de Beer & Lambert

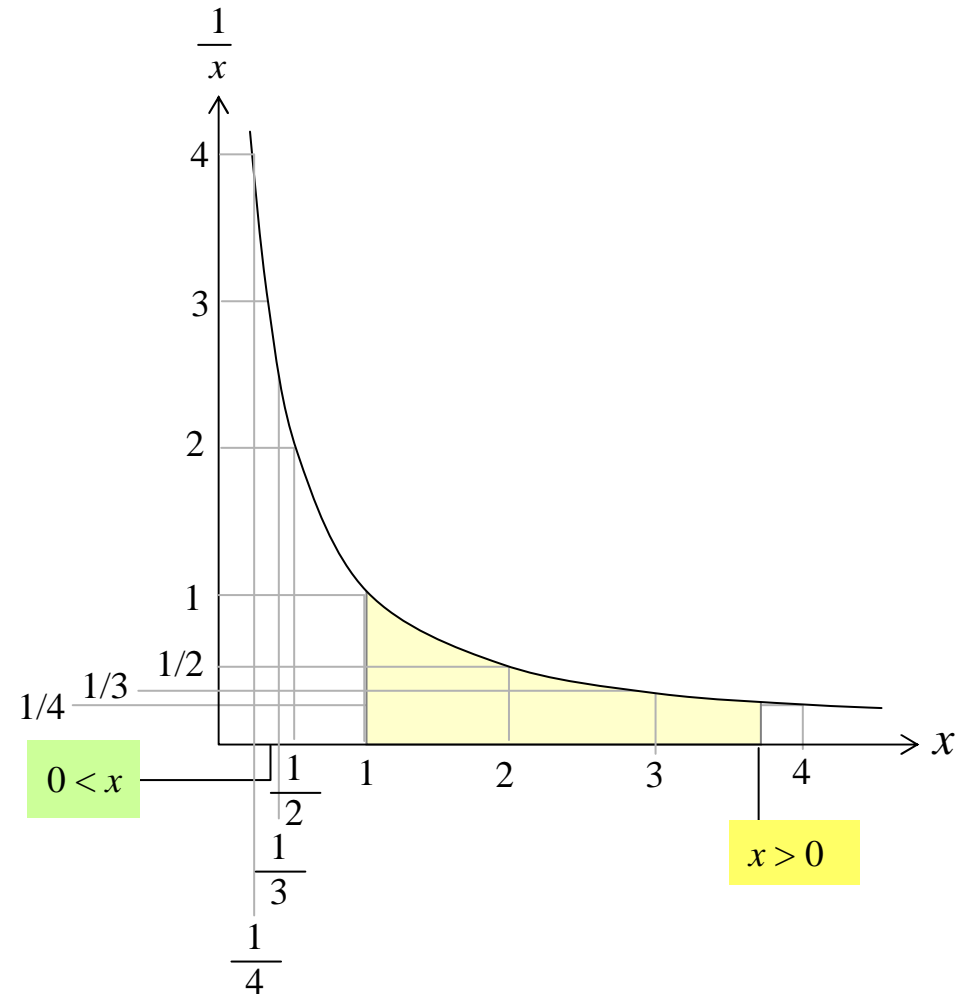


Les facteurs qui influencent l'absorbance d'une solution colorée sont les suivants :

- la **longueur d'onde** de la lumière qui la traverse ;
- sa **nature**, c'est-à-dire des espèces chimiques absorbantes la constituant ;
- sa **concentration** ;
- sa **température**.

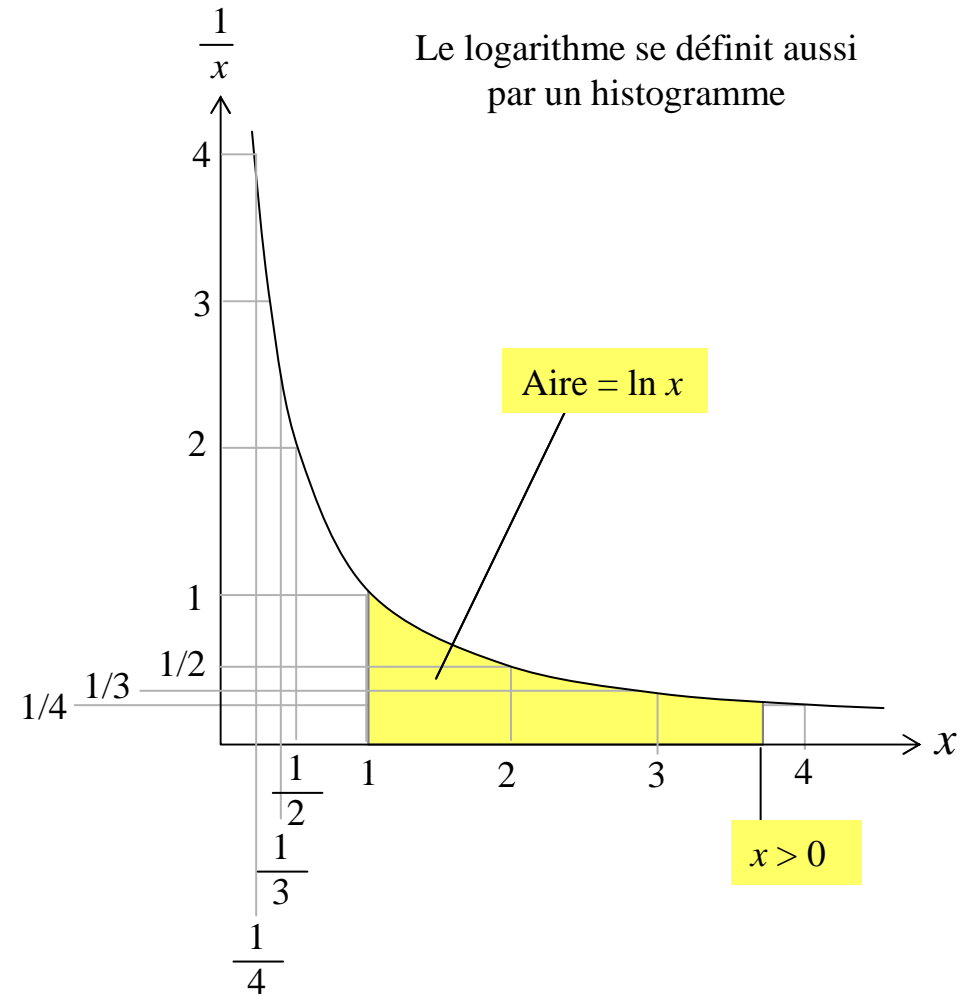
Loi de Beer & Lambert

Logarithme



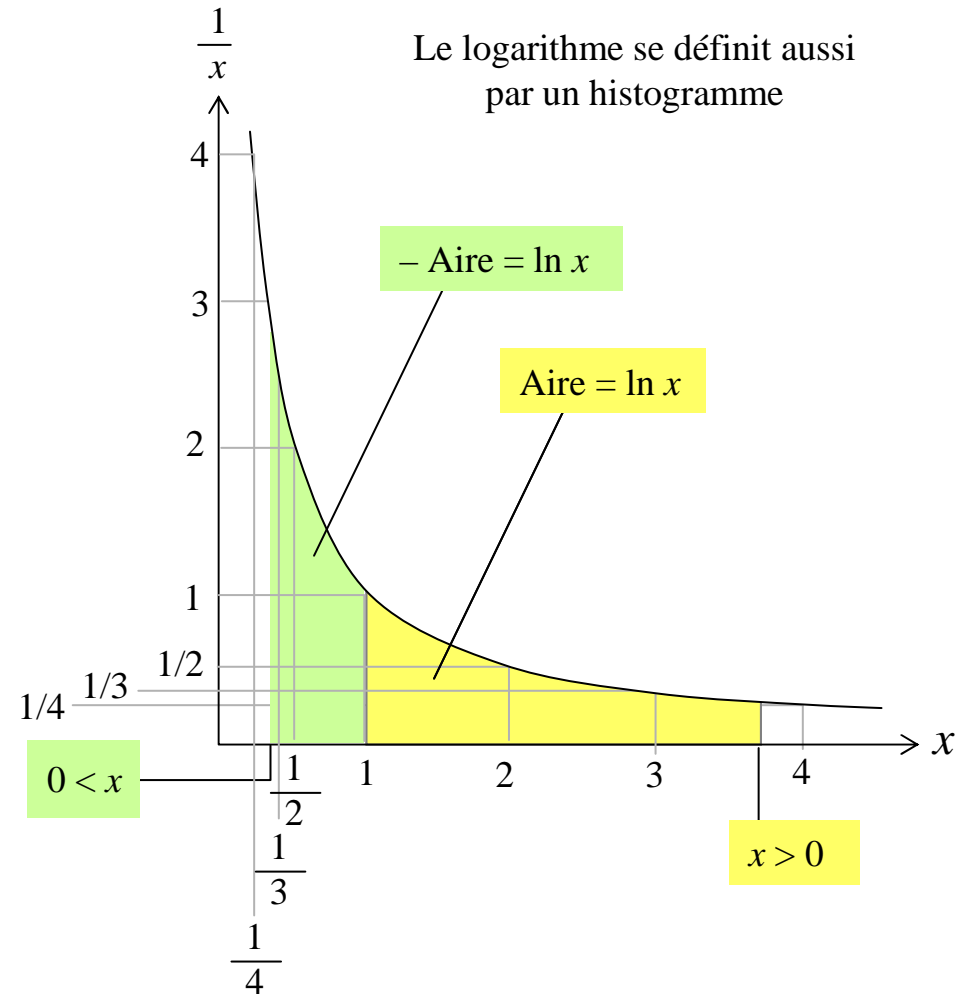
Loi de Beer & Lambert

Logarithme



Loi de Beer & Lambert

Logarithme



Loi de Beer & Lambert

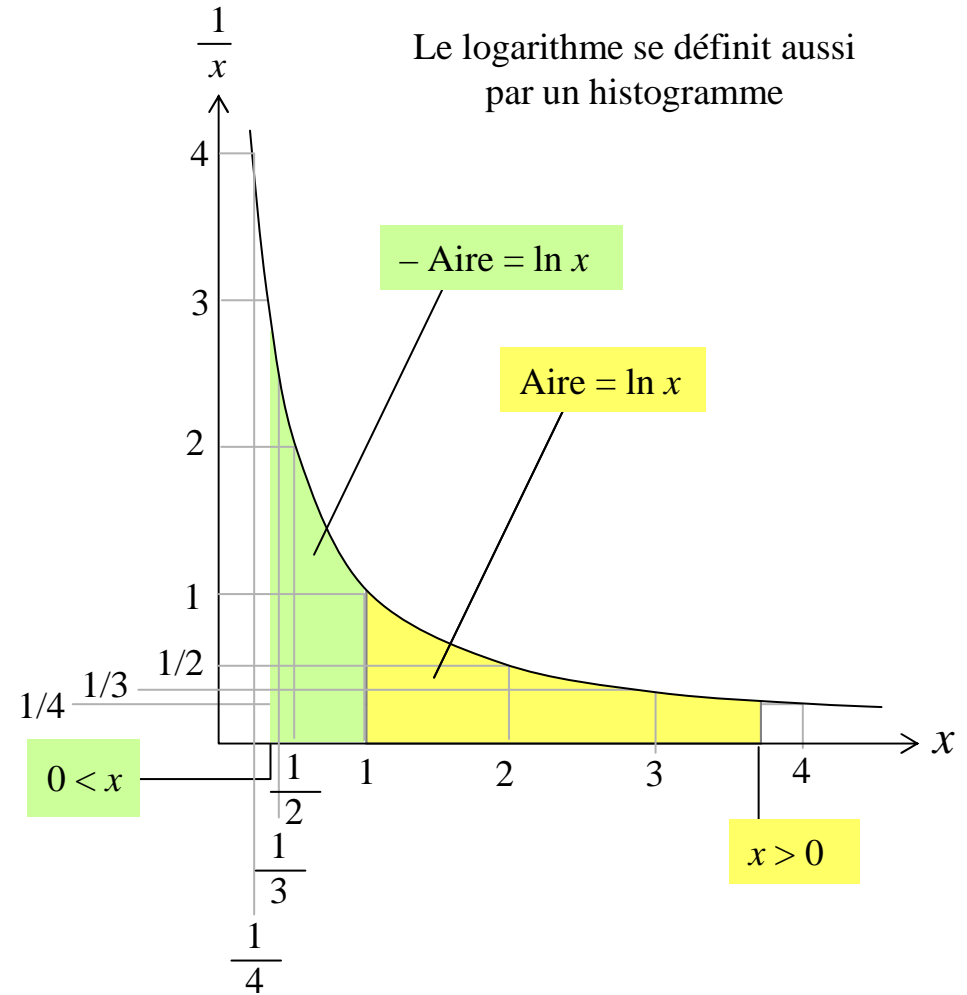
Logarithme

\ln = logarithme népérien

Propriétés

$$\ln(a b) = \ln a + \ln b$$

$$\ln \frac{a}{b} = \ln a - \ln b$$



Loi de Beer & Lambert

Logarithme

\ln = logarithme népérien

\lg ou \lg_{10} = logarithme décimal

Propriétés

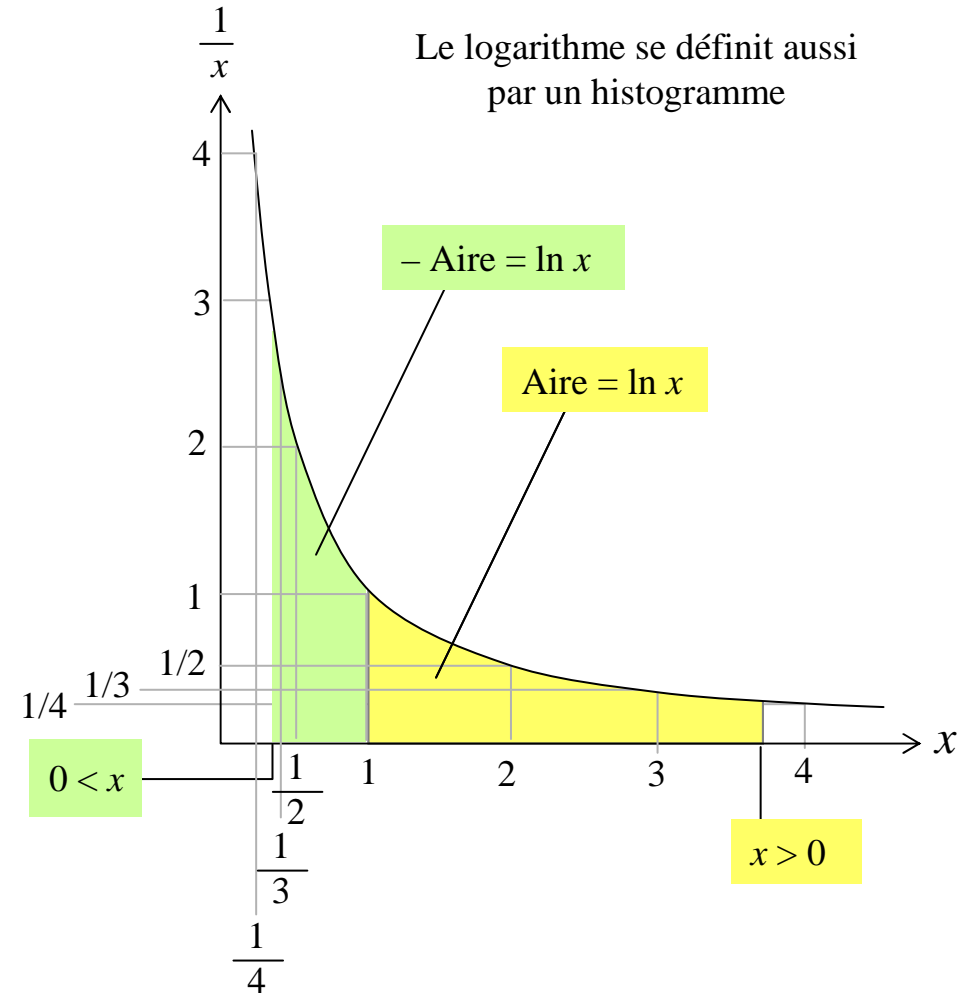
$$\ln(ab) = \ln a + \ln b \quad \ln \frac{a}{b} = \ln a - \ln b$$

Définition mathématique $\lg x = \frac{\ln x}{\ln 10}$

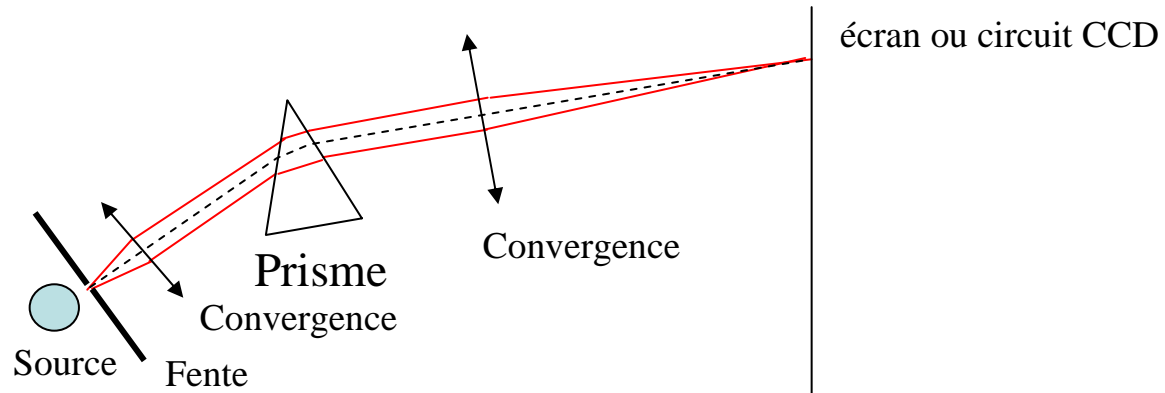
En optique $\lg I/I_0 = \frac{\ln I/I_0}{\ln 10}$

Absorbance $A = \frac{\ln I/I_0}{\ln 10}$

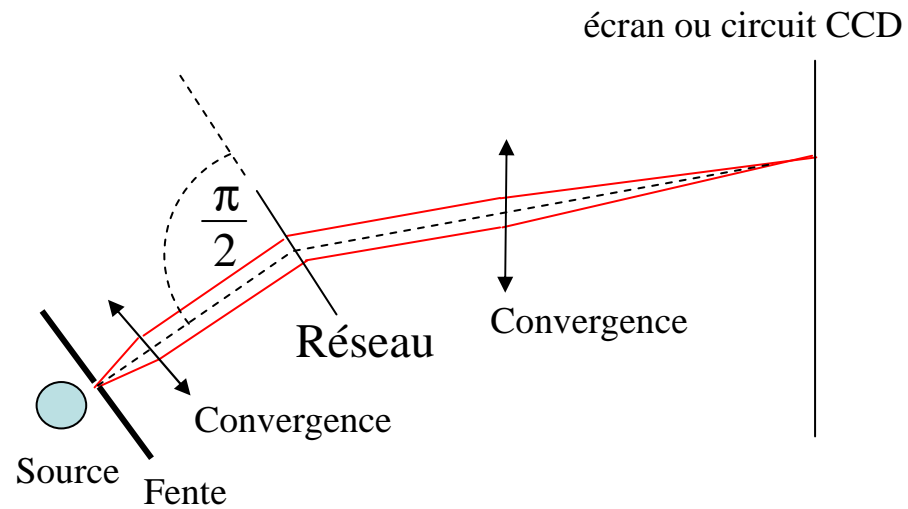
Algèbre $A \ln 10 = \ln I/I_0$

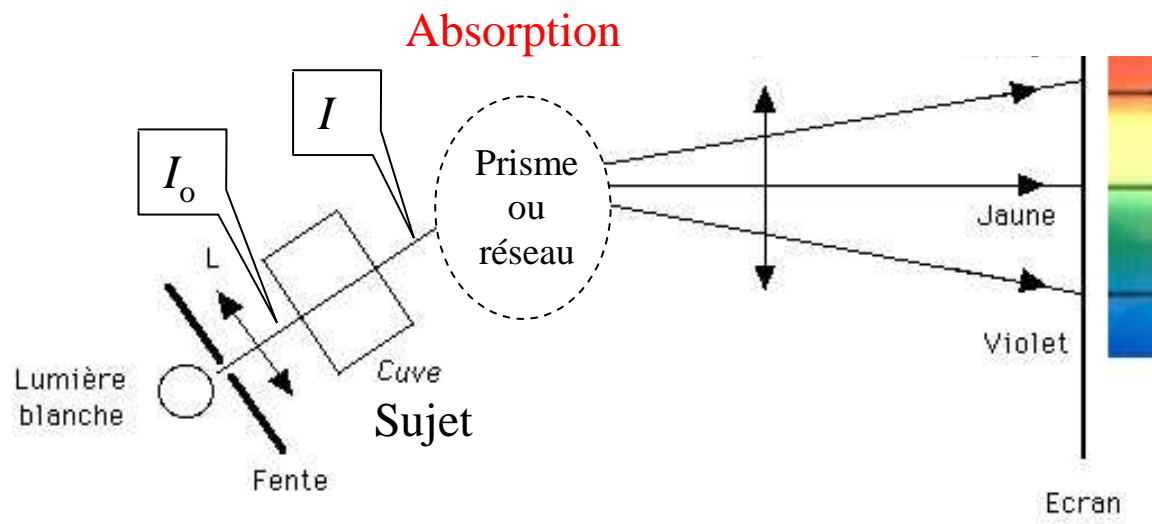
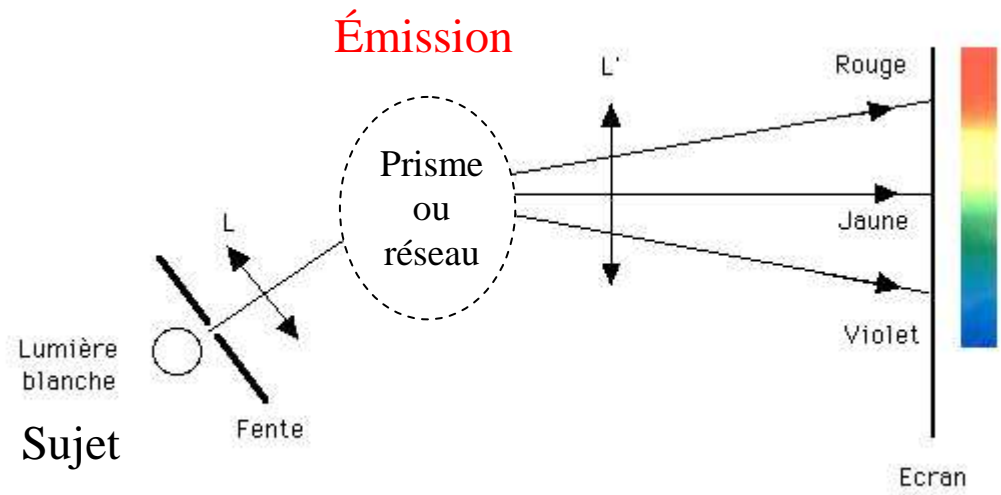


Fabriquer un spectre



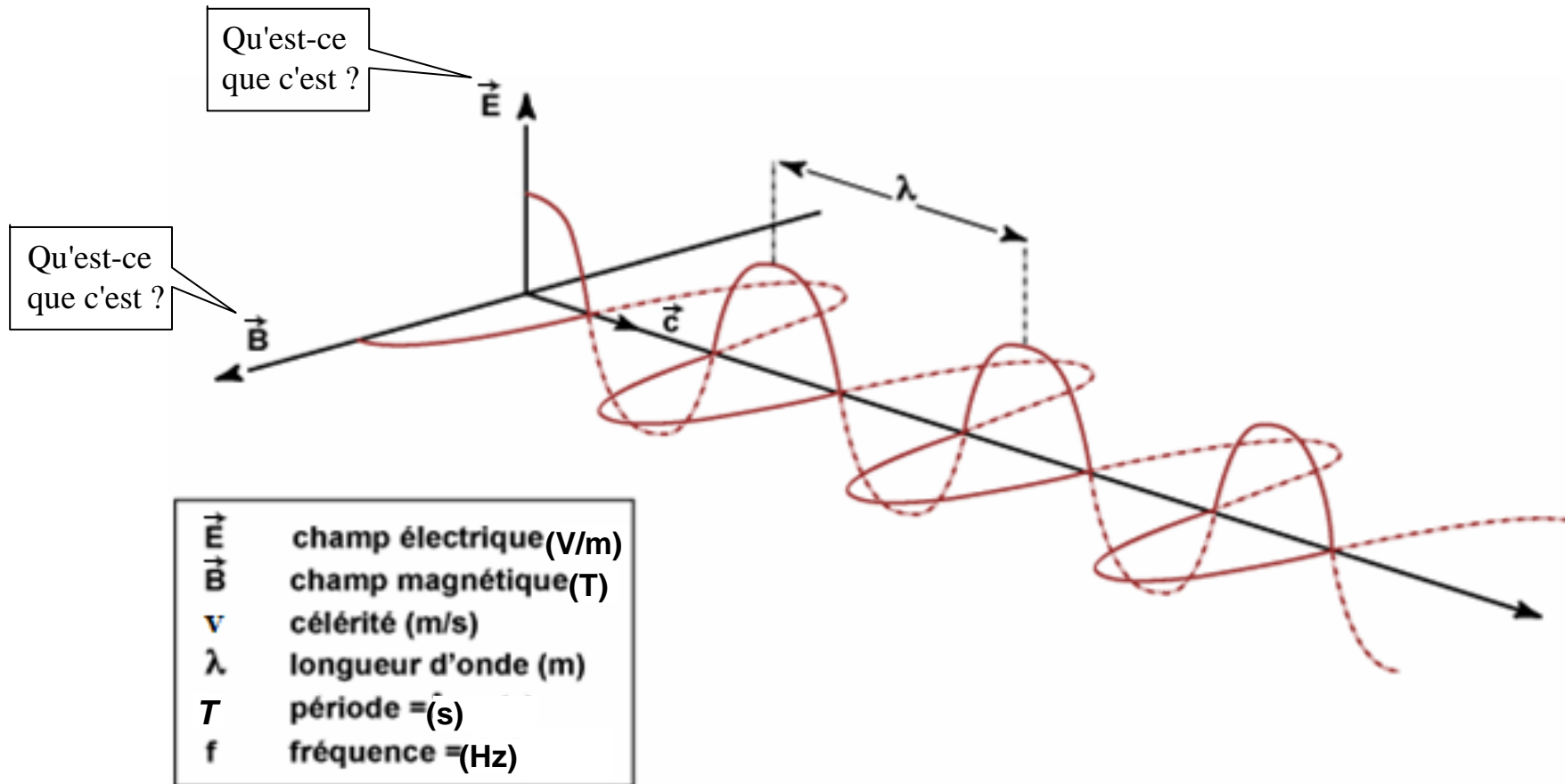
Fabriquer un spectre





Radiation monochromatique

CAS ÉLECTROMAGNÉTIQUE

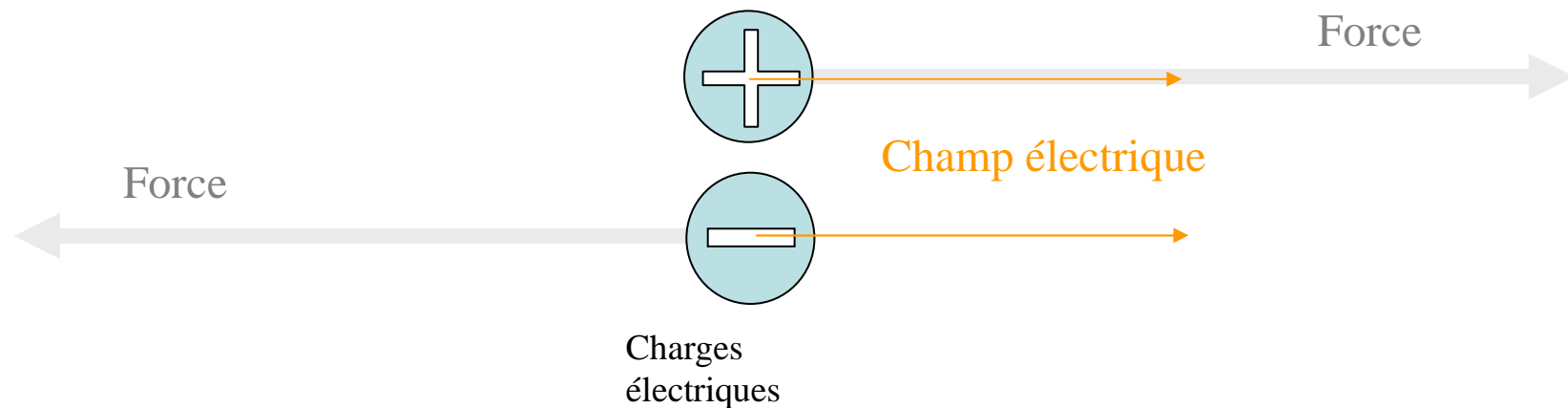


Champ électrique

C'est un pouvoir d'accélérer un corps électriquement chargé

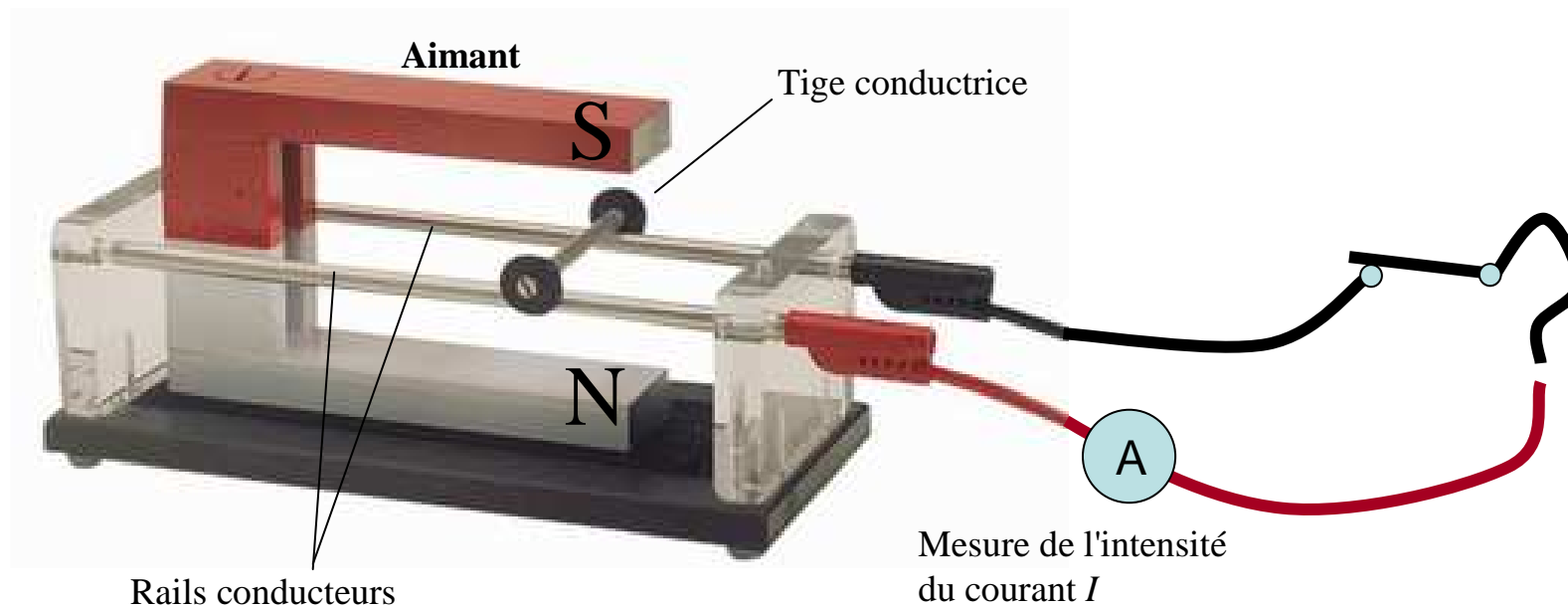
La modélisation est une fonction (au sens mathématique) dont les antécédents sont les lieux de l'espace-temps et les images des vecteurs

Un vecteur est un ensemble de flèches toutes identiques (même orientation et même longueur)

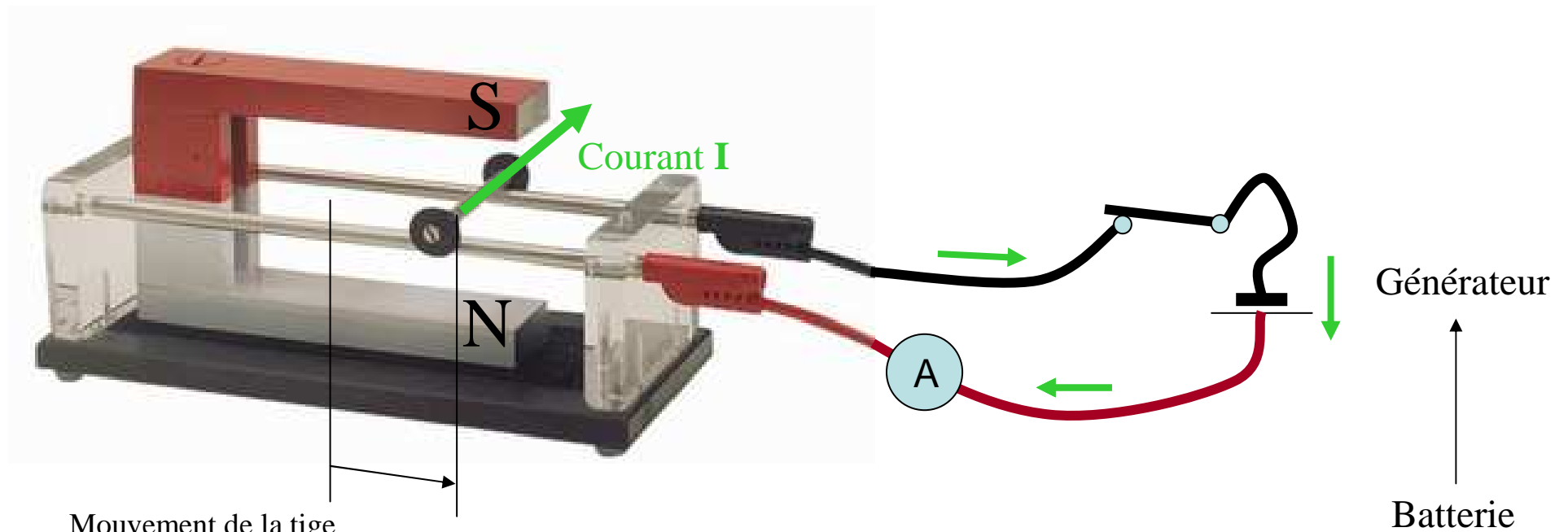


Postulat de Coulomb $m \mathbf{a} = \mathbf{F} = q \mathbf{E}$

Champ magnétique



Champ magnétique



Mouvement de la tige

Distance X

Le champ accélère le conducteur mobile

<http://ressources.univ-lemans.fr/AccesLibre/UM/Pedago/physique/02/electri/forcelaplace.html>

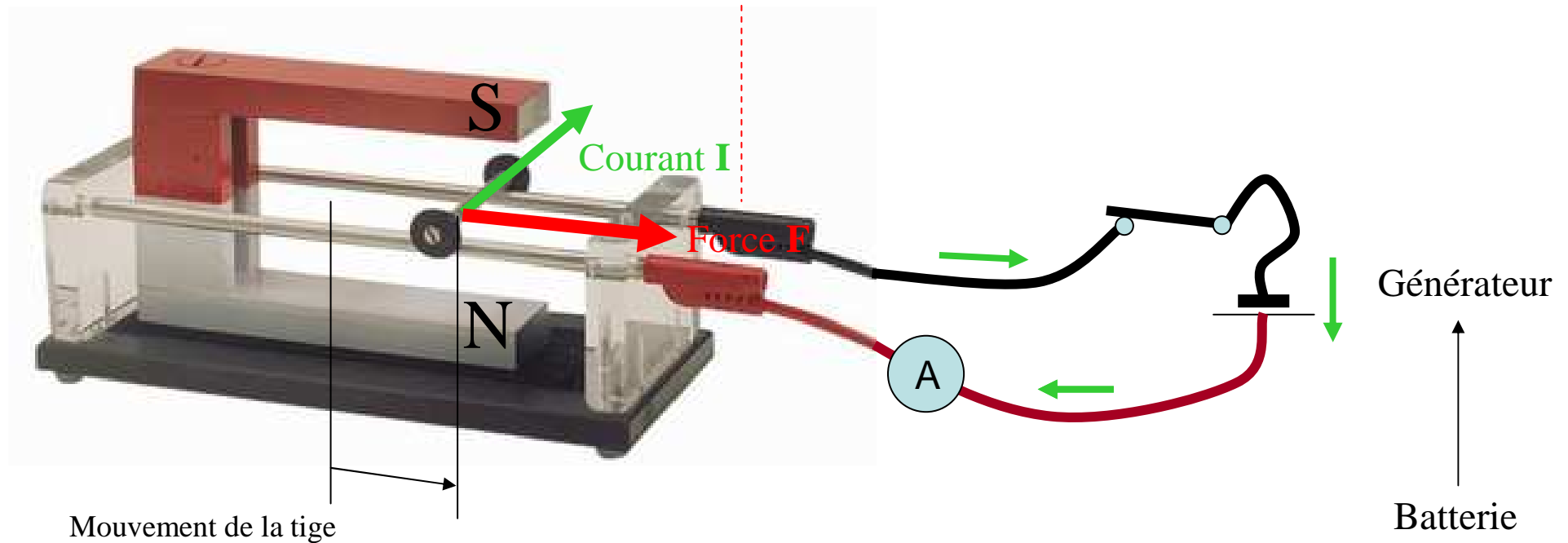
Champ magnétique

La tige accélère

Soit a l'accélération

Soit m la masse de la tige

Elle subit la force $F = m a$.



Champ magnétique

La tige accélère

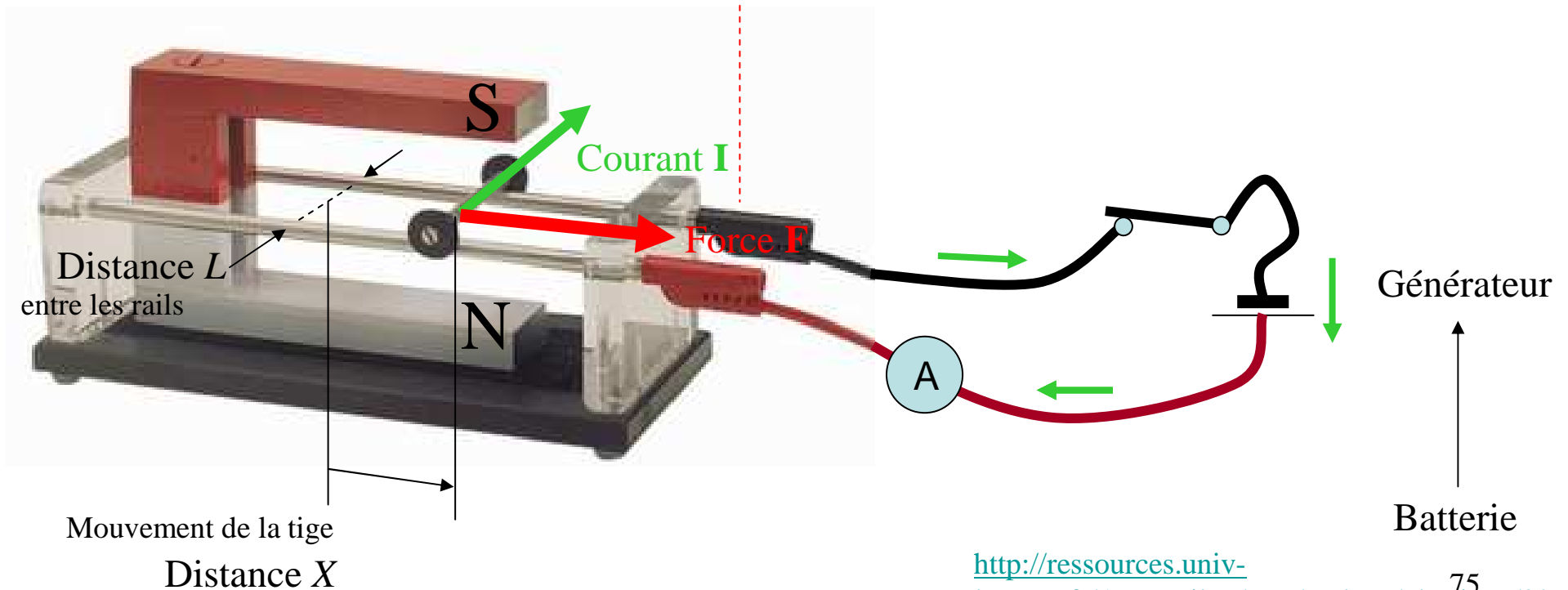
Soit a l'accélération

Soit m la masse de la tige

Elle subit la force $F = m a$.

L'expérience suggère de postuler une loi

$$F = I L [\text{coefficient}]$$



Champ magnétique

La tige accélère

Soit a l'accélération

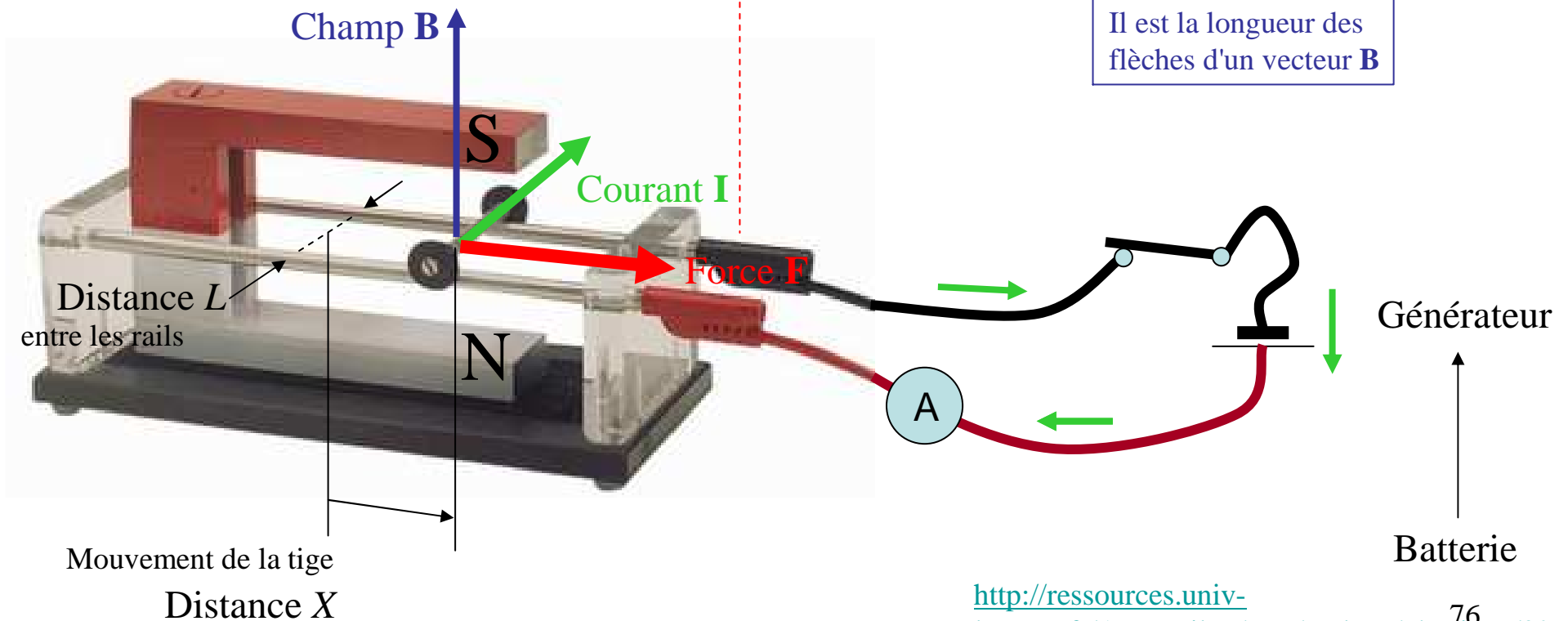
Soit m la masse de la tige

Elle subit la force $F = m a$.

L'expérience suggère de postuler une loi

$$F = I L [\text{coefficient}]$$

Il est la longueur des flèches d'un vecteur B



Champ magnétique

La tige accélère

Soit a l'accélération

Soit m la masse de la tige

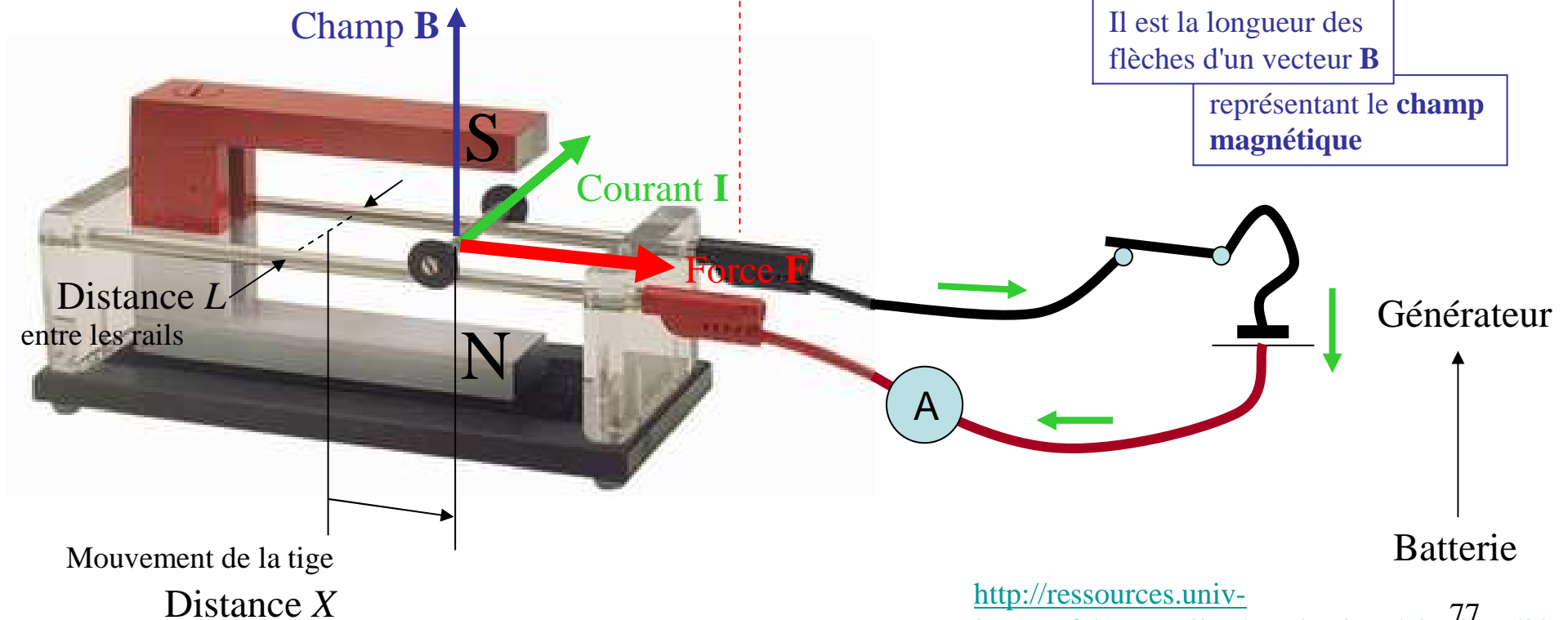
Elle subit la force $F = m a$.

L'expérience suggère de postuler une loi

$$F = I L [\text{coefficient}]$$

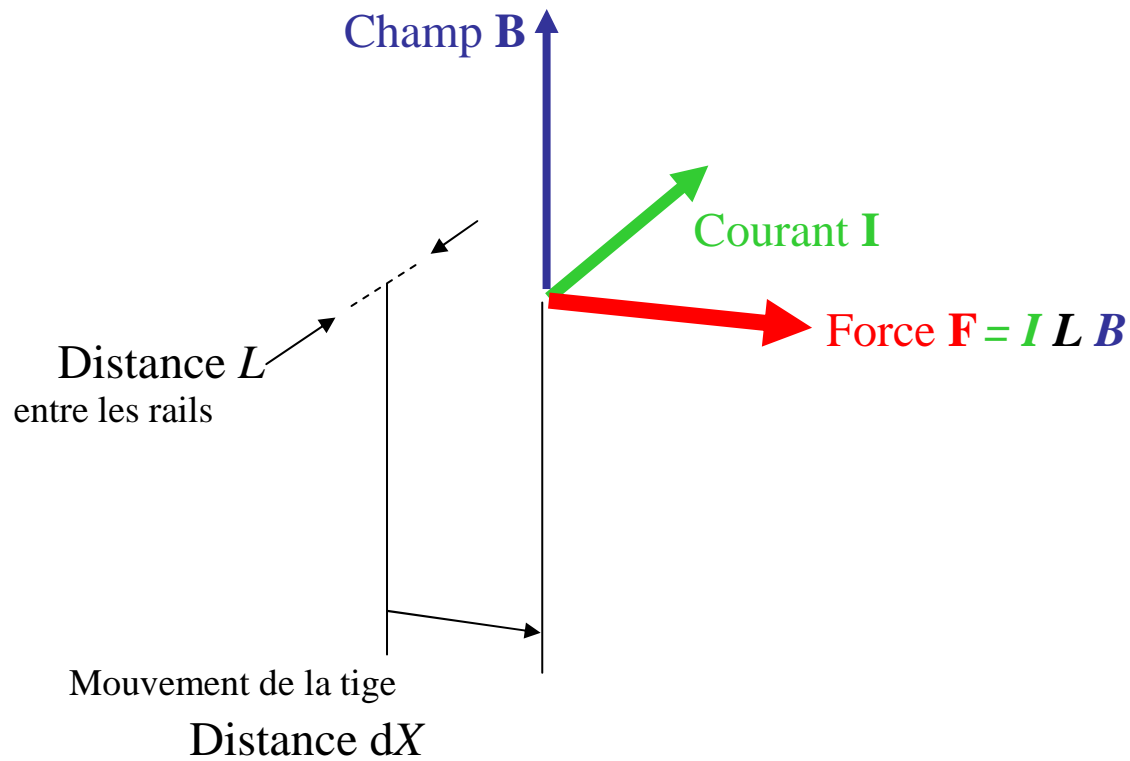
Il est la longueur des
flèches d'un vecteur B

représentant le **champ
magnétique**

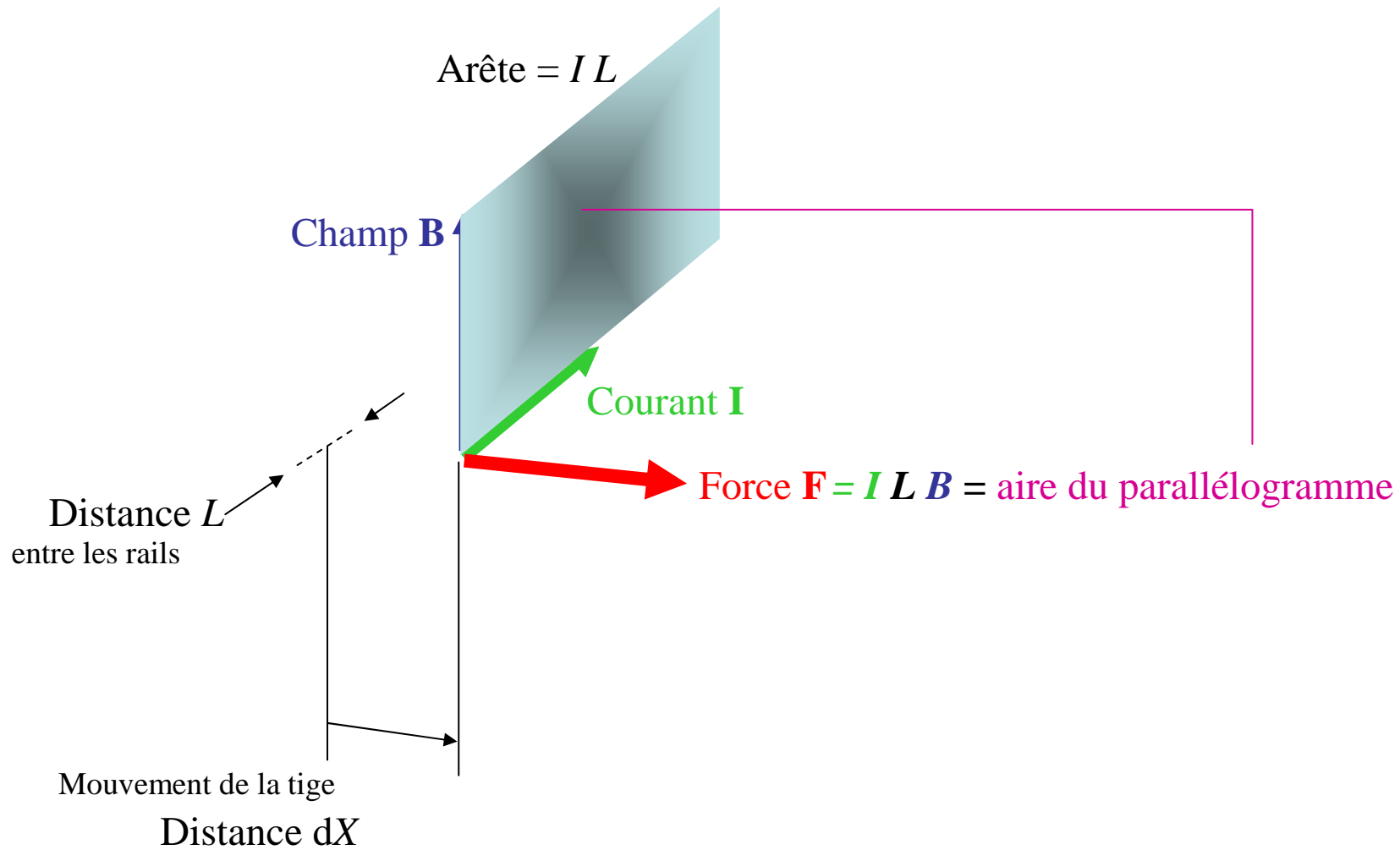


Champ magnétique

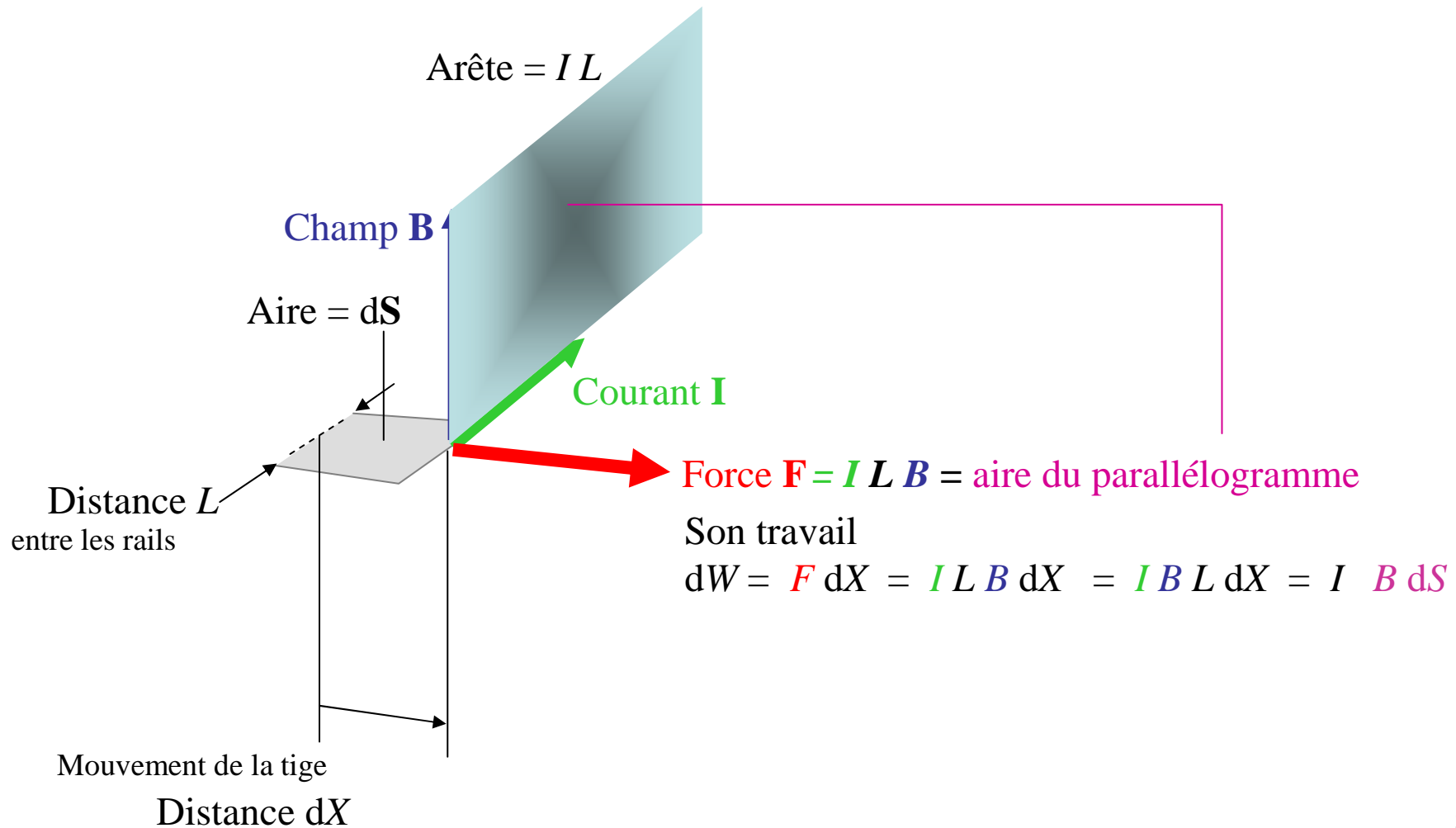
$$\text{Arête} = I L$$



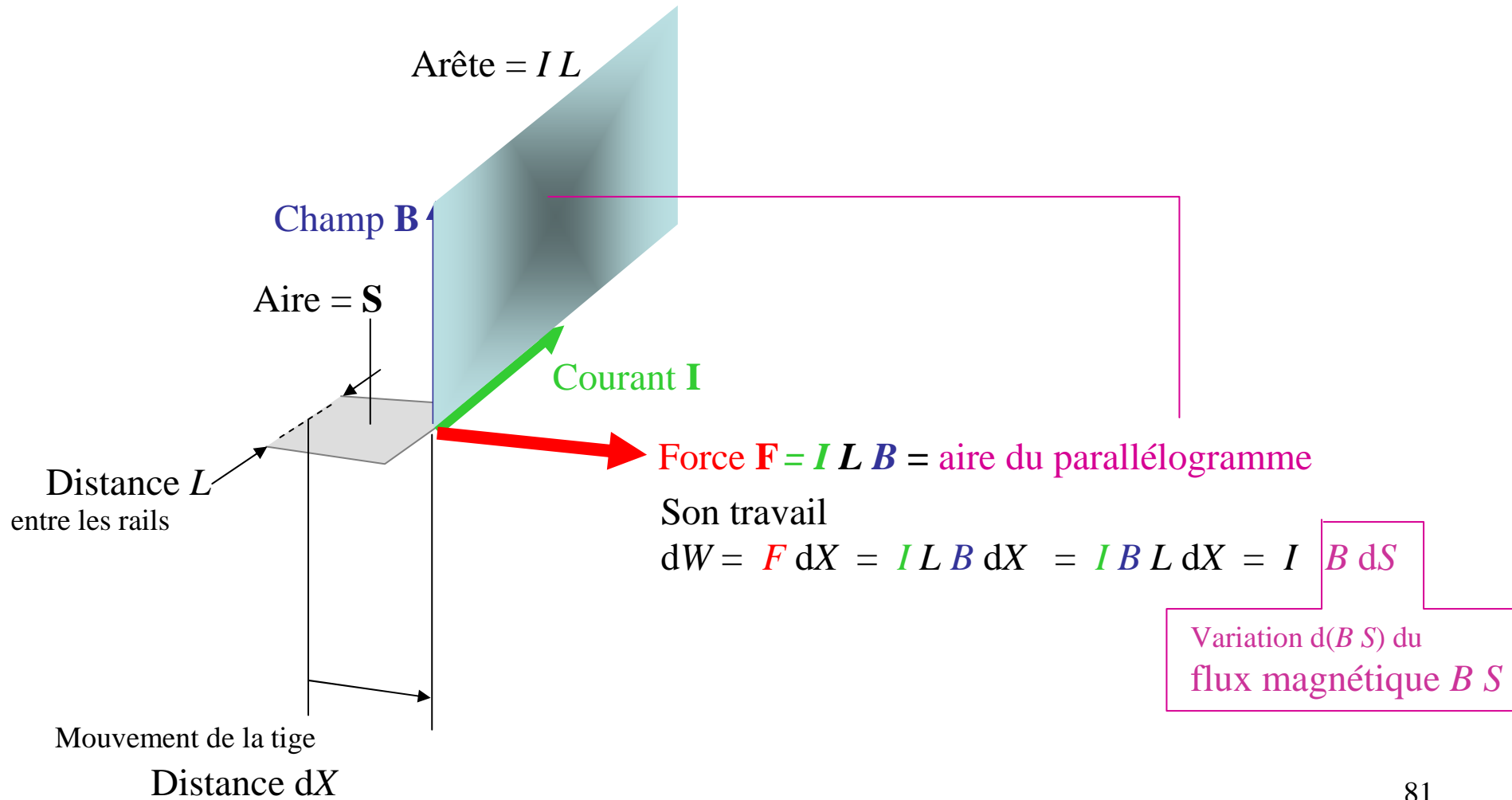
Champ magnétique



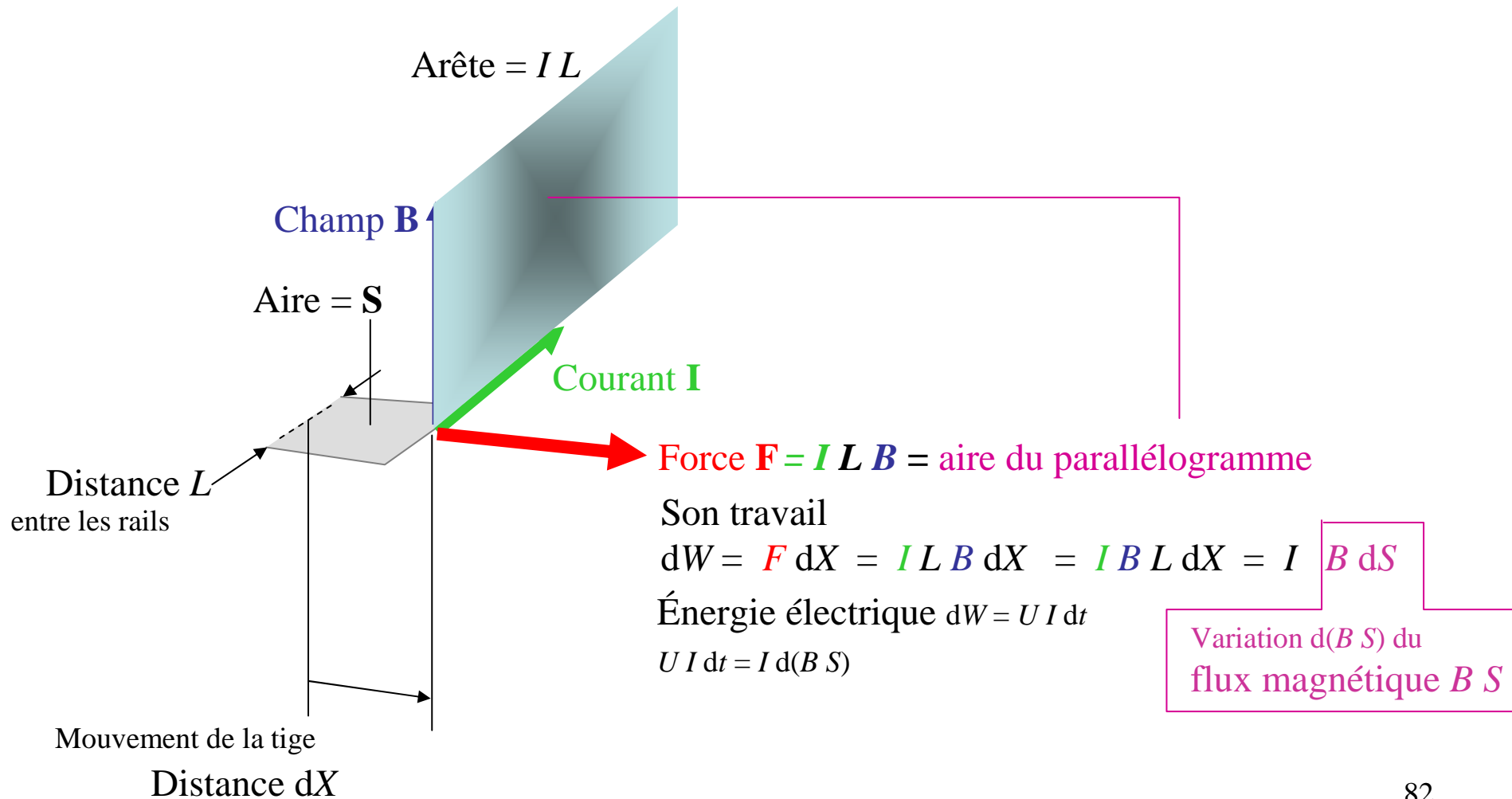
Champ magnétique



Champ magnétique



Champ magnétique



Champ magnétique

Arête = IL

Champ B

Aire = S

Courant I

Distance L
entre les rails

Force $F = ILB = \text{aire du parallélogramme}$

Son travail
 $dW = F dX = ILB dX = IB L dX = I B dS$

Énergie électrique $dW = UI dt$
 $UI dt = I d(B S)$

Variation $d(B S)$ du flux magnétique $B S$

Mouvement de la tige
Distance dX

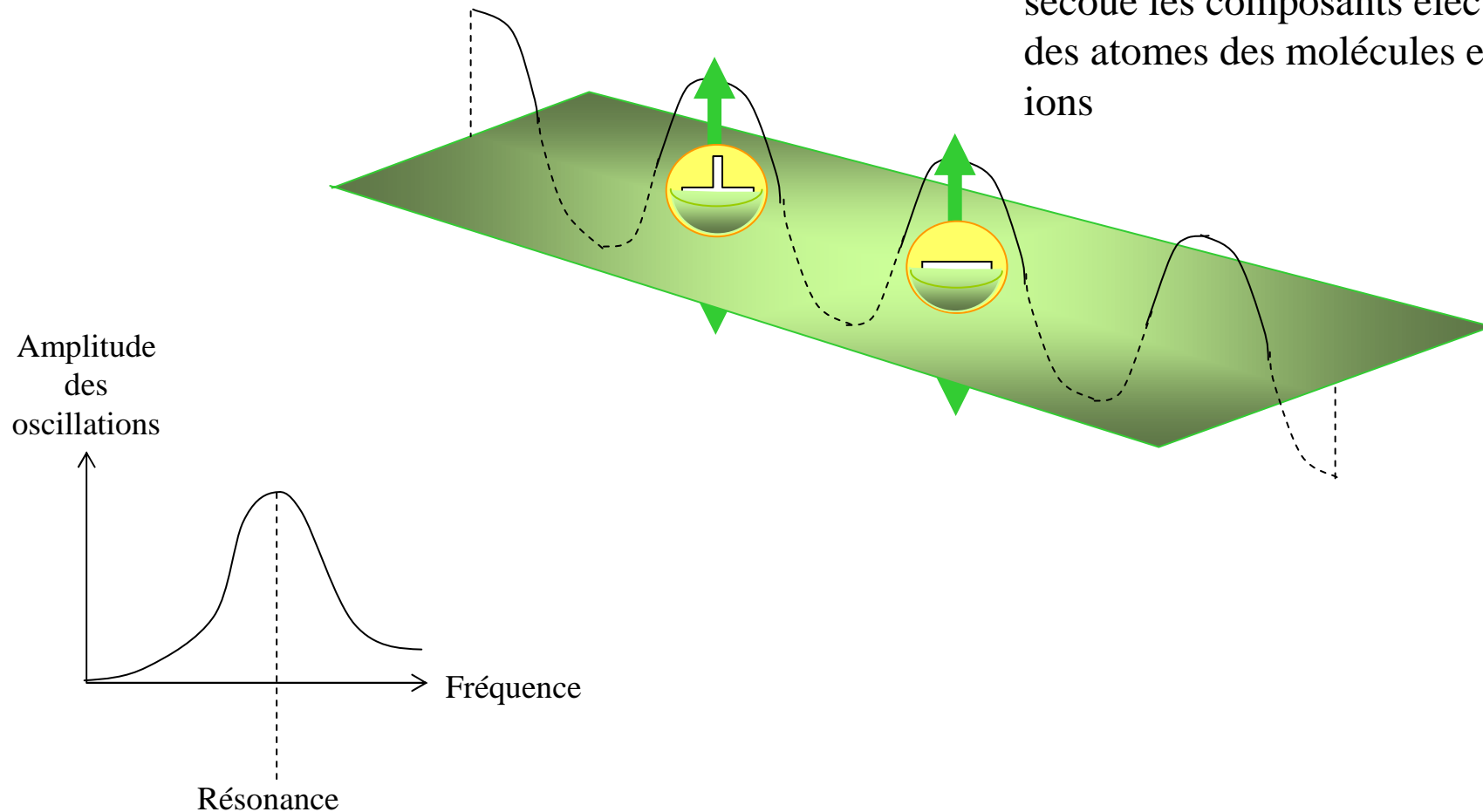
Loi de l'induction $U = \frac{d(B S)}{dt} = \frac{\text{Variation du flux magnétique}}{\text{Durée}}$

Ondes et matière

(physique classique)

(image 22)

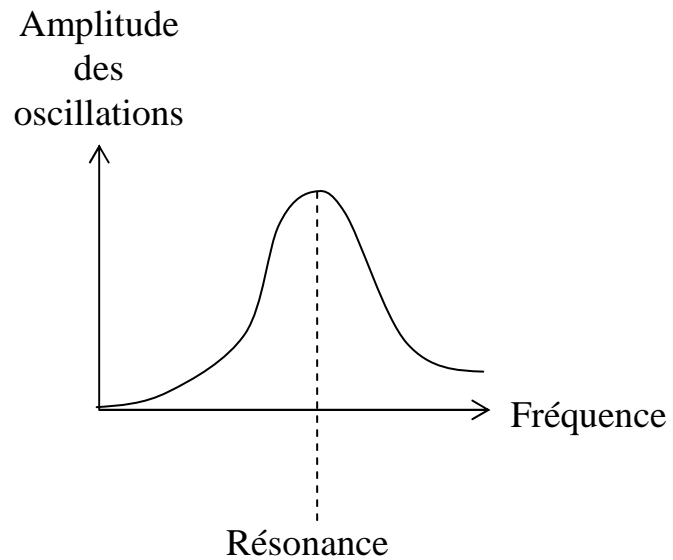
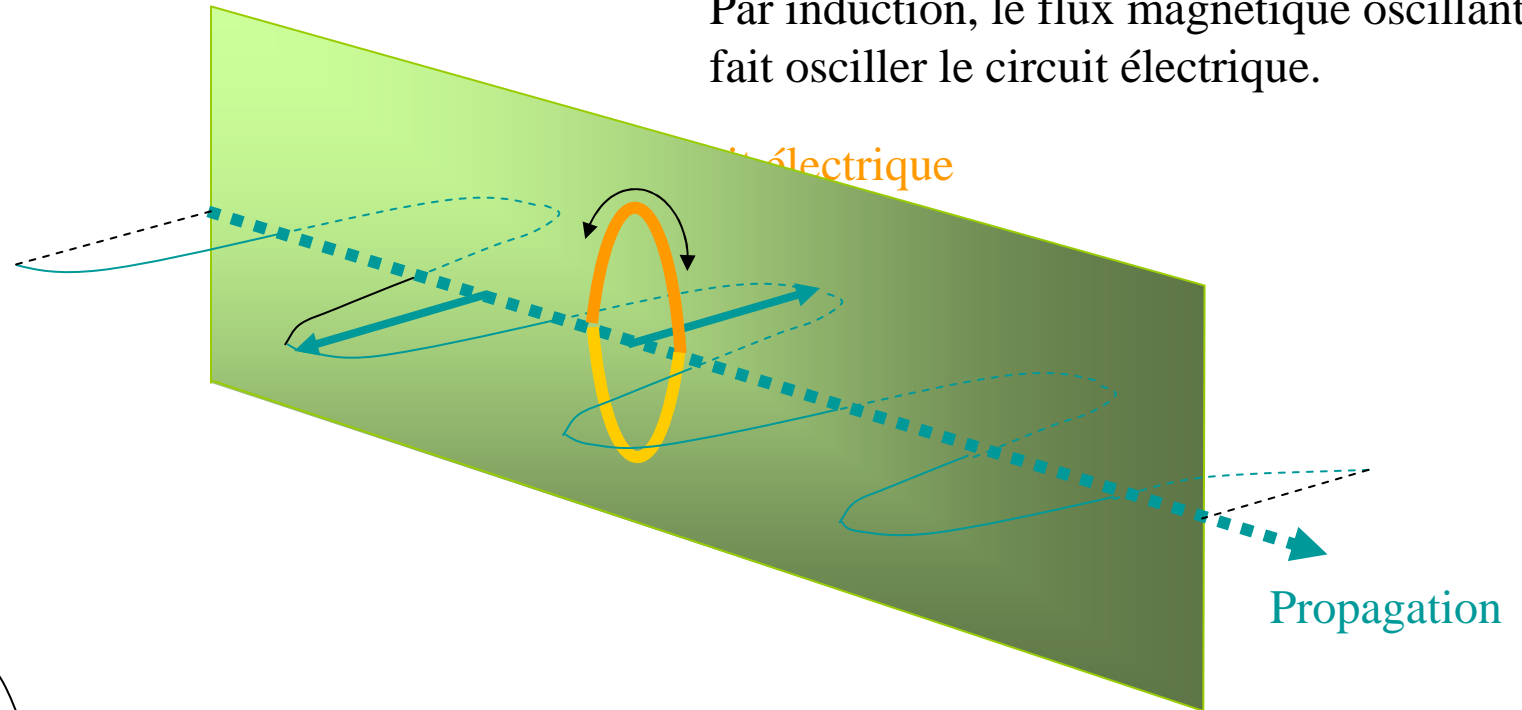
Le champ électrique oscillant secoue les composants électrisés des atomes des molécules et des ions



Ondes et matière

(physique classique)

Par induction, le flux magnétique oscillant fait osciller le circuit électrique.



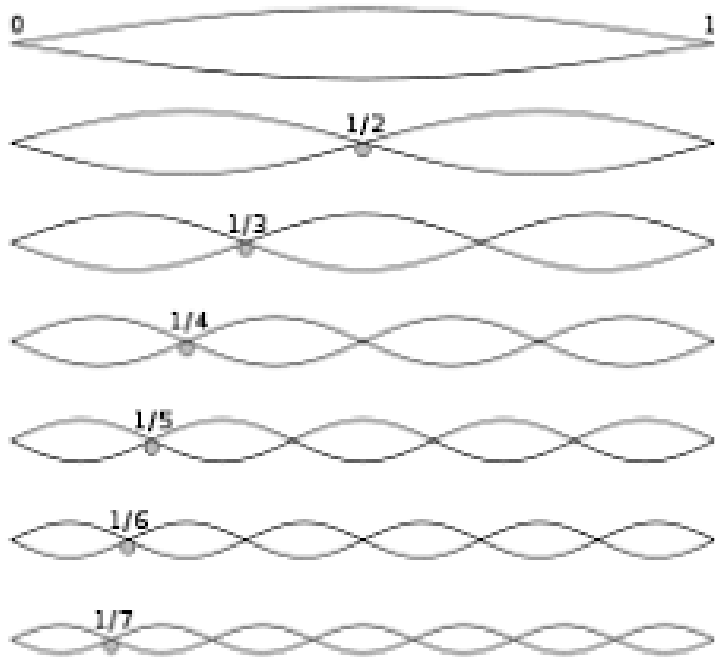
Interpréter un spectre

(corps noir)

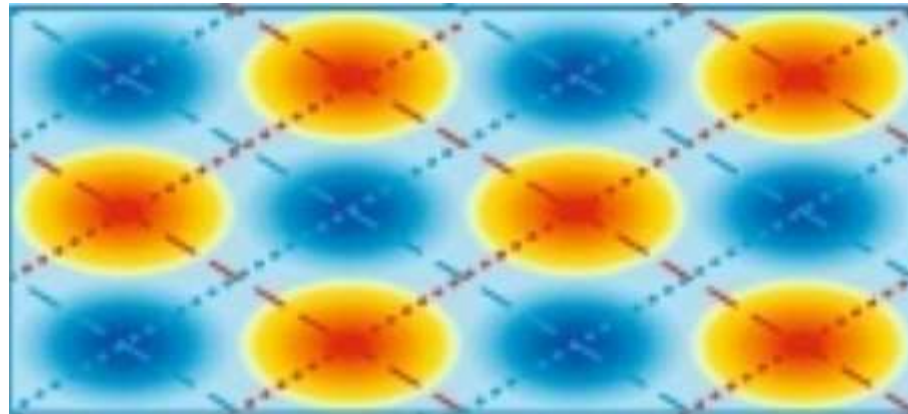
En 1900 Rayleigh a postulé ce qui suit.

- L'onde électromagnétique enfermée dans un corps noir se réfléchit totalement sur sa frontière et *en apparence* oscille sans se propager (état stationnaire).

Animation : https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/7/7d/Standing_wave_2.gif/400px-Standing_wave_2.gif



Une dimension



Deux dimensions

En trois dimensions il faut imaginer des copies superposées alternées de la figure en deux dimensions

Interpréter un spectre

(corps noir)

En 1900 Rayleigh a postulé ce qui suit.

- L'onde électromagnétique enfermée dans un corps noir se réfléchit totalement sur sa frontière et *en apparence* oscille sans se propager (état stationnaire).

Animation : https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/7/7d/Standing_wave_2.gif/400px-Standing_wave_2.gif

- Chaque onde stationnaire est vue comme un **oscillateur**.

Interpréter un spectre

(corps noir)

En 1900 Rayleigh a postulé ce qui suit.

- L'onde électromagnétique enfermée dans un corps noir se réfléchit totalement sur sa frontière et *en apparence* oscille sans se propager (état stationnaire).

Animation : https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/7/7d/Standing_wave_2.gif/400px-Standing_wave_2.gif

- Chaque onde stationnaire est vue comme un **oscillateur**.

Entre la fréquence nulle et une fréquence donnée ν un comptage des oscillateurs donnerait (si V est le volume du corps)

$$N(\nu) = \pi \frac{8}{3} \frac{\nu^3}{c^3} V$$

Interpréter un spectre

(corps noir)

En 1900 Rayleigh a postulé ce qui suit.

•L'onde électromagnétique enfermée dans un corps noir se réfléchit totalement sur sa frontière et *en apparence* oscille sans se propager (état stationnaire).

Animation : https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/7/7d/Standing_wave_2.gif/400px-Standing_wave_2.gif

•Chaque onde stationnaire est vue comme un **oscillateur**.

Entre la fréquence nulle et une fréquence donnée ν un comptage des oscillateurs donnerait (si V est le volume du corps)

$$N(\nu) = \pi \frac{8}{3} \frac{\nu^3}{c^3} V$$

soit une énergie totale

$$E(\nu) = \frac{8}{3} \pi \frac{\nu^3}{c^3} V k T.$$

Interpréter un spectre

(corps noir)

En 1900 Rayleigh a postulé ce qui suit.

- L'onde électromagnétique enfermée dans un corps noir se réfléchit totalement sur sa frontière et *en apparence* oscille sans se propager (état stationnaire).

Animation : https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/7/7d/Standing_wave_2.gif/400px-Standing_wave_2.gif

- Chaque onde stationnaire est vue comme un **oscillateur**.

Entre la fréquence nulle et une fréquence donnée ν un comptage des oscillateurs donnerait (si V est le volume du corps)

$$N(\nu) = \pi \frac{8}{3} \frac{\nu^3}{c^3} V$$

soit une énergie totale

$$E(\nu) = \frac{8}{3} \pi \frac{\nu^3}{c^3} V k T.$$

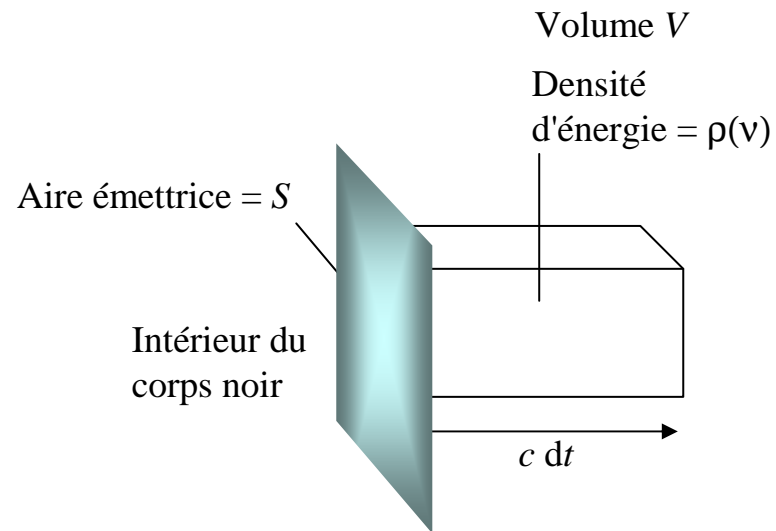
soit une densité d'énergie

Volume	Énergie
V	$E(\nu)$
1	$\rho(\nu)$
Proportion	

$$\rho(\nu) = \frac{8}{3} \pi \frac{\nu^3}{c^3} k T.$$

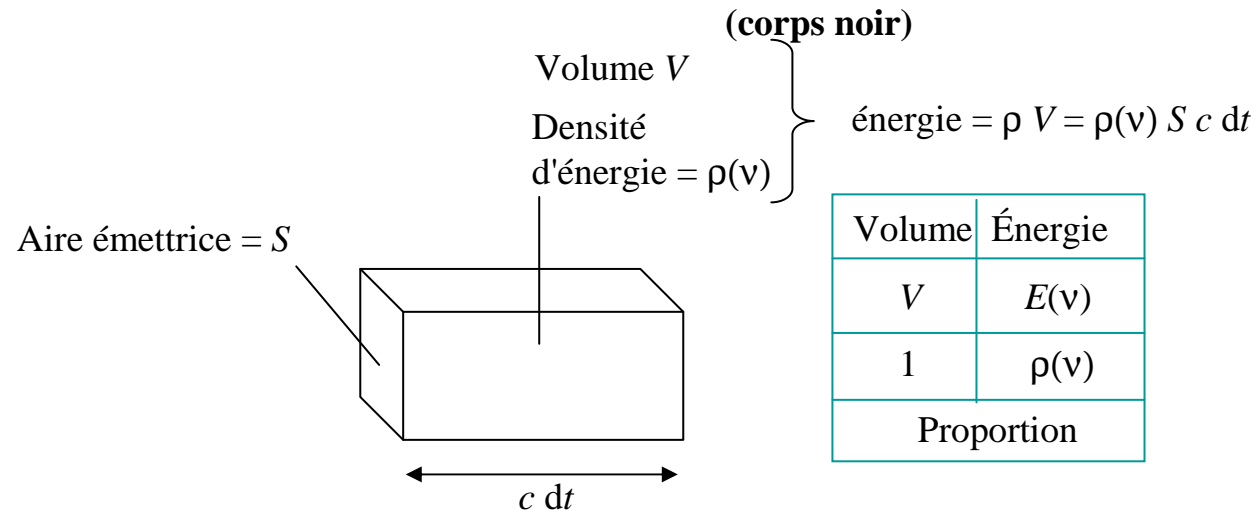
Interpréter un spectre

(corps noir)



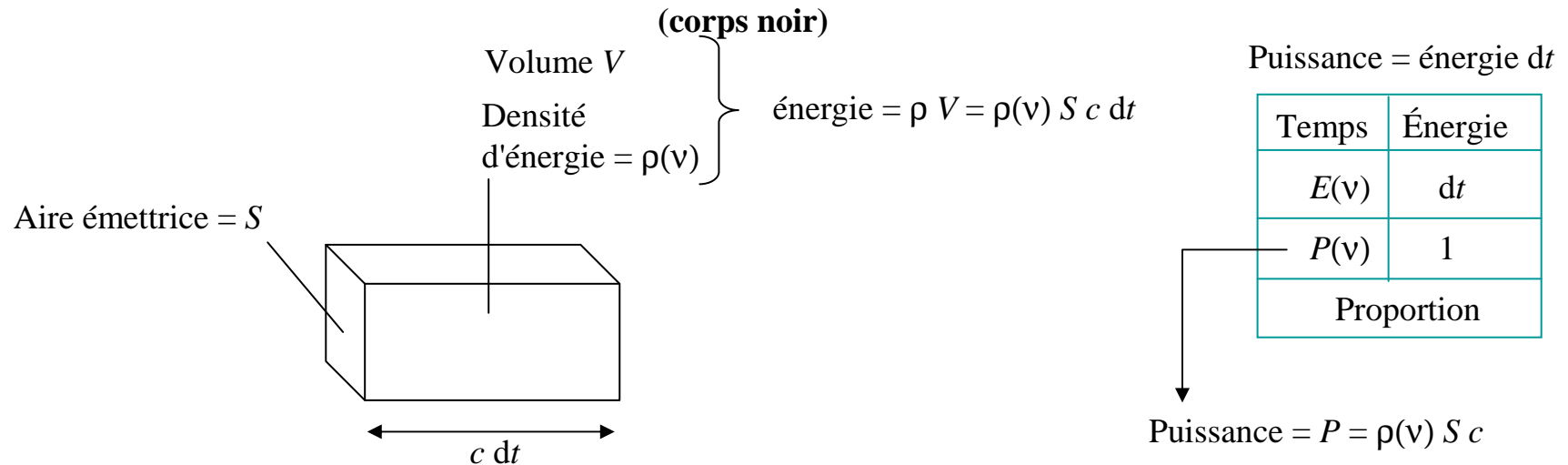
$$\rho(\nu) = \frac{8}{3} \pi \frac{\nu^3}{c^3} k T.$$

Interpréter un spectre



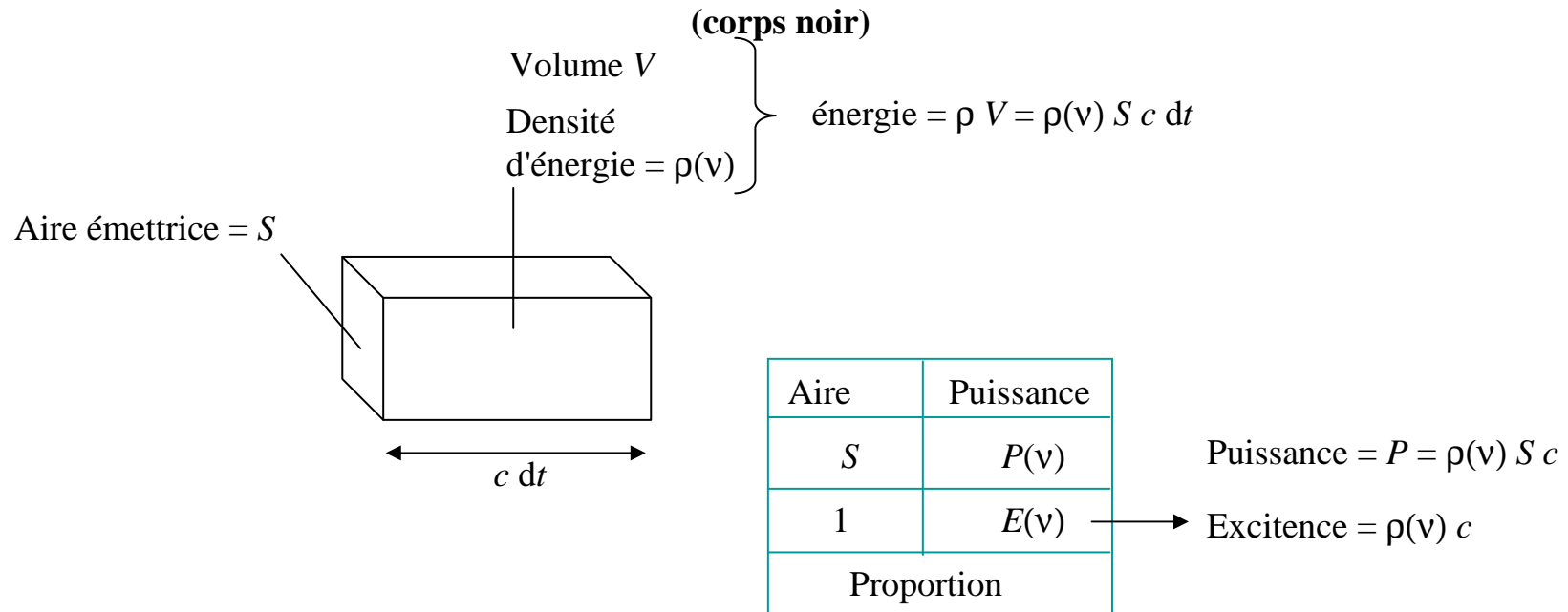
$$\rho(\nu) = \frac{8}{3} \pi \frac{\nu^3}{c^3} k T.$$

Interpréter un spectre



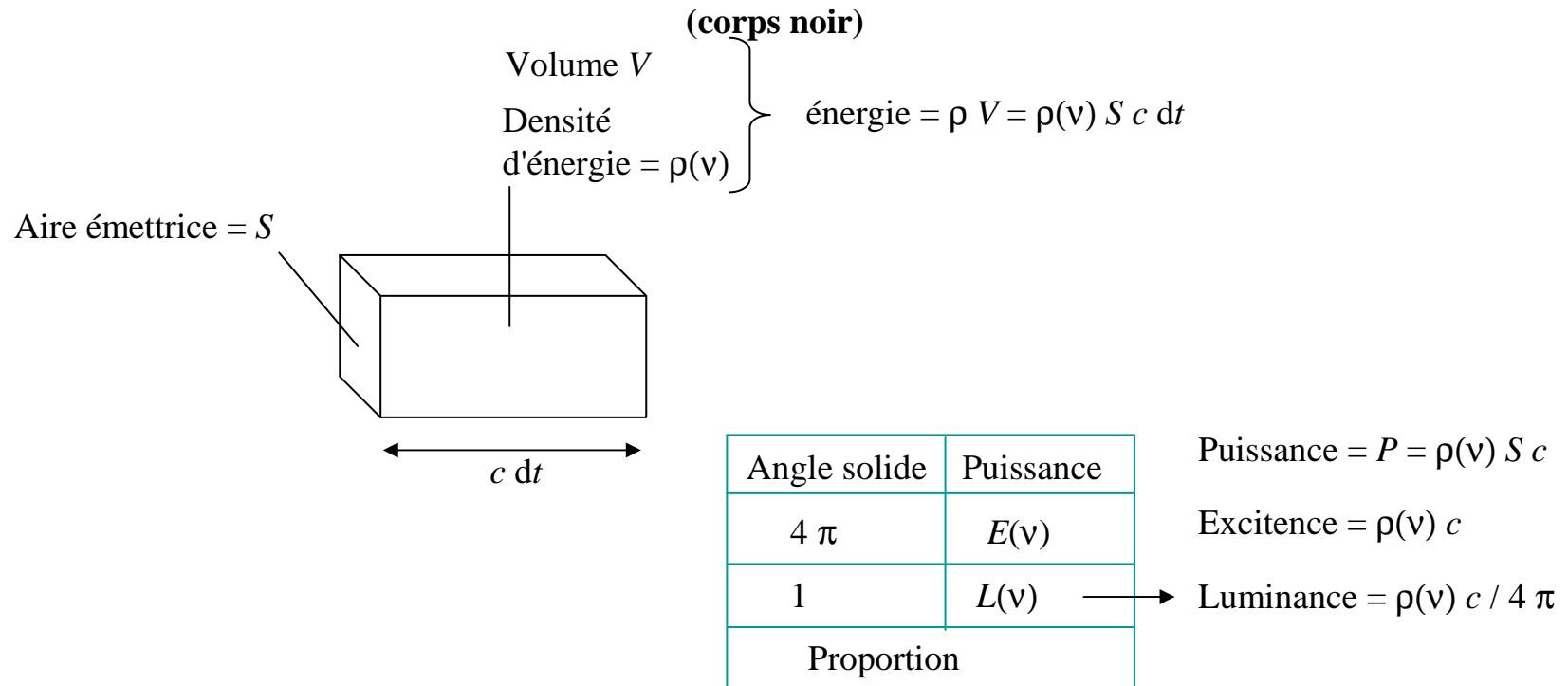
$$\rho(\nu) = \frac{8}{3} \pi \frac{\nu^3}{c^3} k T.$$

Interpréter un spectre



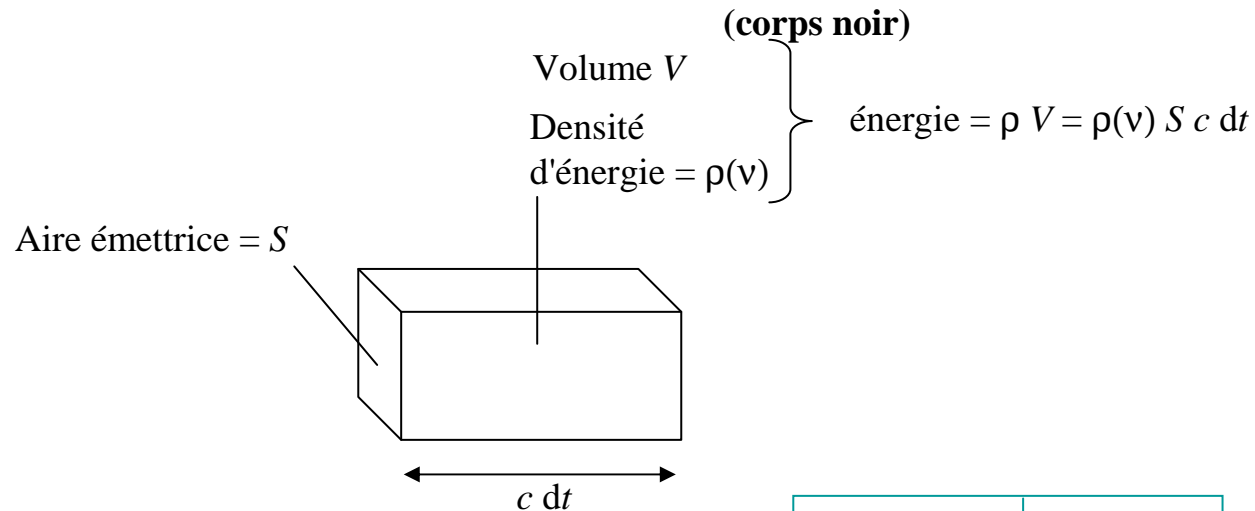
$$\rho(\nu) = \frac{8}{3} \pi \frac{\nu^3}{c^3} k T.$$

Interpréter un spectre



$$\rho(\nu) = \frac{8}{3} \pi \frac{\nu^3}{c^3} k T.$$

Interpréter un spectre



Angle solide	Puissance
4π	$E(\nu)$
1	$L(\nu)$
Proportion	

Puissance = $P = \rho(\nu) S c$

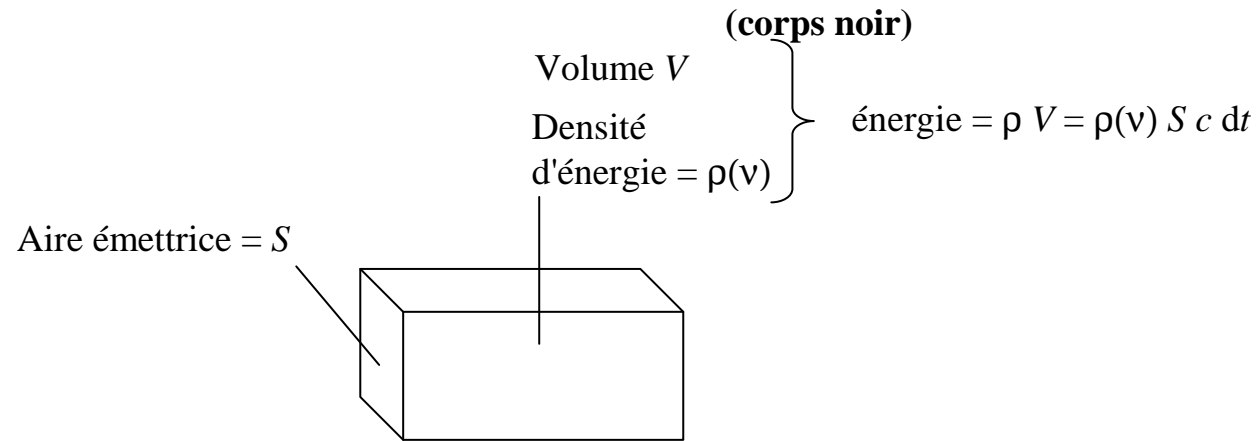
Excitence = $\rho(\nu) c$

Luminance = $\rho(\nu) c / 4 \pi$

$$L(\nu) = \frac{2}{3} \frac{\nu^3}{c^2} k T.$$

$$\rho(\nu) = \frac{8}{3} \pi \frac{\nu^3}{c^3} k T.$$

Interpréter un spectre

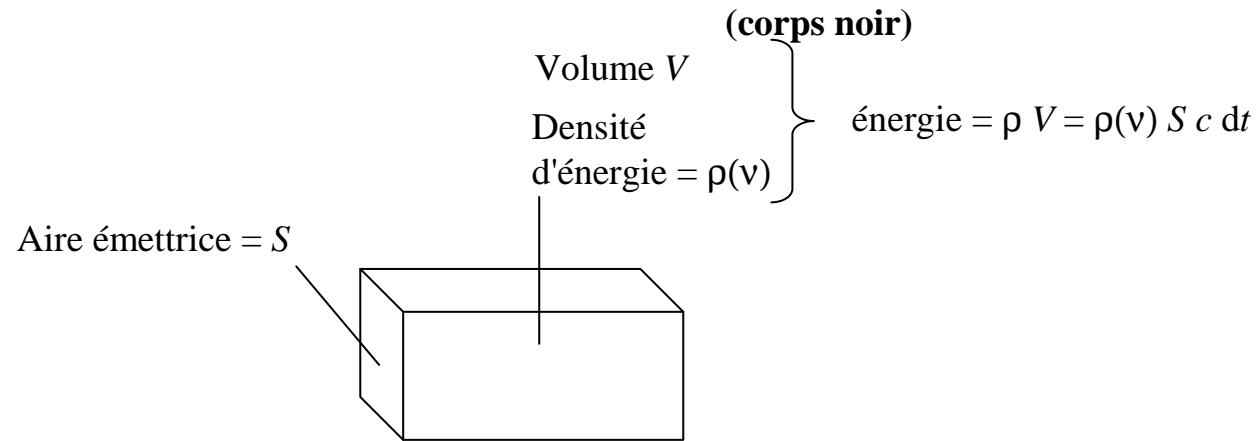


$$\text{Luminance spectrale} = L_\nu = \frac{dL}{d\nu}$$

$$L(\nu) = \frac{2}{3} \frac{\nu^3}{c^2} k T.$$

$$L_\nu = 2 \frac{\nu^2}{c^2} k T.$$

Interpréter un spectre

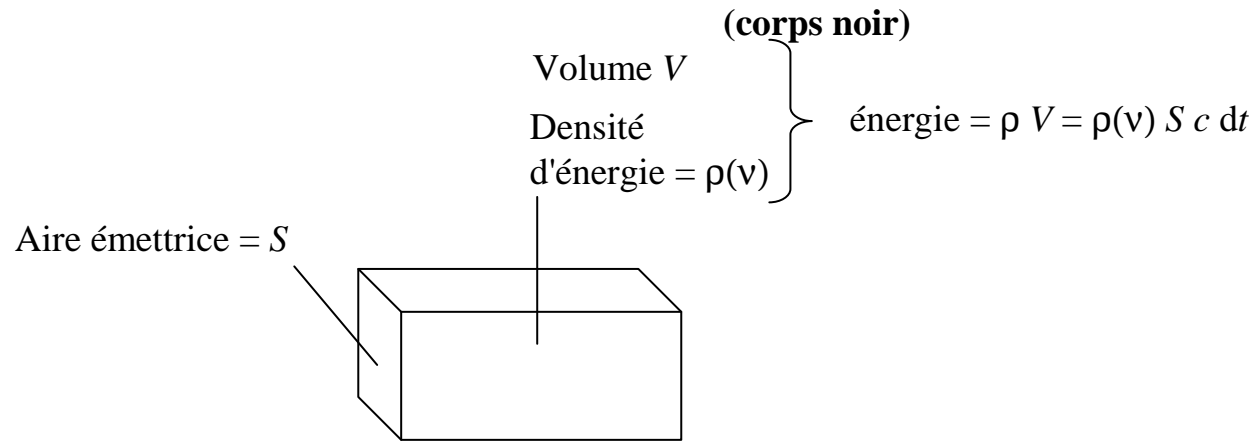


$$L(\lambda) = \frac{2}{3} \frac{c}{\lambda^3} k T.$$

$\nu = \frac{c}{\lambda}$

$$L(\nu) = \frac{2}{3} \frac{\nu^3}{c^2} k T.$$

Interpréter un spectre



Luminance spectrale = $L_\lambda = \frac{dL}{d\lambda}$

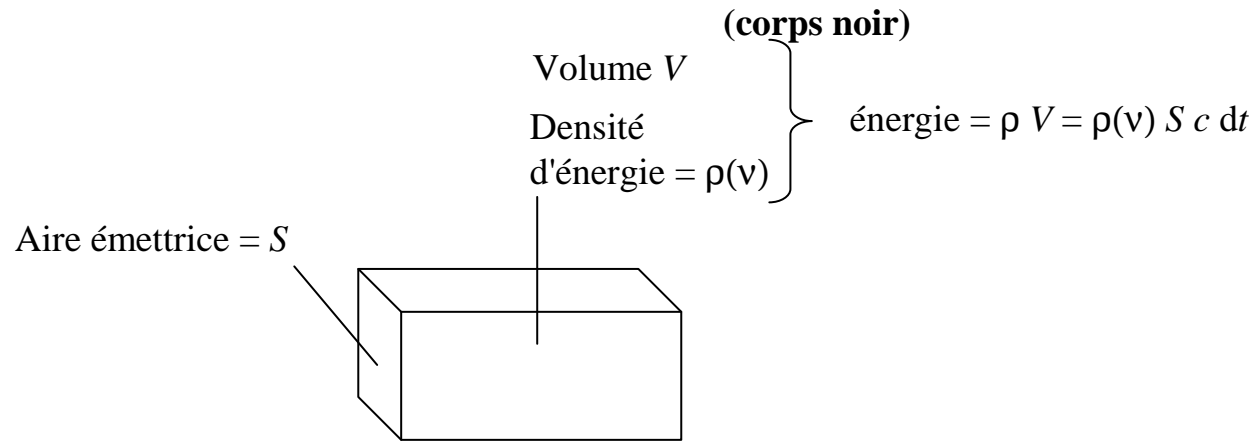
Dérivée de $1/\lambda^3 = -3\lambda^2/\lambda^6$

$L(\lambda) = \frac{2}{3} \frac{c}{\lambda^3} k T.$

$\nu = \frac{c}{\lambda}$

$L(\nu) = \frac{2}{3} \frac{\nu^3}{c^2} k T.$

Interpréter un spectre



Luminance spectrale = $L_\lambda = \frac{dL}{d\lambda}$

Dérivée de $1/\lambda^3 = -3\lambda^2/\lambda^6$

$$L(\lambda) = \frac{2}{3} \frac{c}{\lambda^3} k T.$$

$$L(\nu) = \frac{2}{3} \frac{\nu^3}{c^2} k T.$$

$\nu = \frac{c}{\lambda}$

$$L_\nu = 2 \frac{c}{\lambda^4} k T.$$

Formule de Rayleigh

Interpréter un spectre

(corps noir)

Planck (1900 encore, image 26) postula que l'énergie d'un oscillateur ne peut se stabiliser que sur un échelon d'un spectre discret de valeur $E_n = n h \nu$.

Interpréter un spectre

(corps noir)

Planck (1900 encore, image 26) postula que l'énergie d'un oscillateur ne peut se stabiliser que sur un échelon d'un spectre discret de valeur $E_n = n h \nu$.

Pour lui ce n'était qu'une hypothèse *ad hoc* ajouté aux concepts précédents en espérant qu'un jour émergera une nouvelle théorie cohérente.

Interpréter un spectre

(corps noir)

Planck (1900 encore, image 26) postula que l'énergie d'un oscillateur ne peut se stabiliser que sur un échelon d'un spectre discret de valeur $E_n = n h \nu$.

Pour lui ce n'était qu'une hypothèse *ad hoc* ajouté aux concepts précédents en espérant qu'un jour émergera une nouvelle théorie cohérente.

Il en démontra une loi de probabilité $\Pr(E = E_n)$ qui donne une valeur moyenne (espérance mathématique)

$$\text{Esp}(E = E_n) = \frac{h c / \lambda}{\exp \frac{h c / \lambda}{k T} - 1} \quad \text{donc dans l'ancienne expression de Rayleigh \& Jones cette formule remplace } k T$$

Interpréter un spectre

(corps noir)

Planck (1900 encore, image 26) postula que l'énergie d'un oscillateur ne peut se stabiliser que sur un échelon d'un spectre discret de valeur $E_n = n h \nu$.

Pour lui ce n'était qu'une hypothèse *ad hoc* ajouté aux concepts précédents en espérant qu'un jour émergera une nouvelle théorie cohérente.

Il en démontra une loi de probabilité $\Pr(E = E_n)$ qui donne une valeur moyenne (espérance mathématique)

$$\text{Esp}(E = E_n) = \frac{h c / \lambda}{\exp \frac{h c / \lambda}{k T} - 1}$$

donc dans l'ancienne expression de Rayleigh & Jones cette formule remplace $k T$

$$L_\lambda = 2 c \frac{1}{\lambda^4} \frac{h c / \lambda}{\exp \frac{h c}{\lambda k T} - 1}$$

Interpréter un spectre

(corps noir)

Planck (1900 encore, image 26) postula que l'énergie d'un oscillateur ne peut se stabiliser que sur un échelon d'un spectre discret de valeur $E_n = n h \nu$.

Pour lui ce n'était qu'une hypothèse *ad hoc* ajouté aux concepts précédents en espérant qu'un jour émergera une nouvelle théorie cohérente.

Il en démontra une loi de probabilité $\Pr(E = E_n)$ qui donne une valeur moyenne (espérance mathématique)

$$\text{Esp}(E = E_n) = \frac{h c / \lambda}{\exp \frac{h c / \lambda}{k T} - 1} \quad \text{donc dans l'ancienne expression de Rayleigh \& Jones cette formule remplace } k T$$

$$L_\lambda = 2 c \frac{1}{\lambda^4} \frac{h c / \lambda}{\exp \frac{h c}{\lambda k T} - 1}$$

Conclusion : loi de Planck

$$L_\lambda = 2 h c^2 \frac{1}{\lambda^5} \frac{1}{\exp \frac{h c}{\lambda k T} - 1}$$

Interpréter un spectre

(corps noir)

Planck (1900 encore, image 26) postula que l'énergie d'un oscillateur ne peut se stabiliser que sur un échelon d'un spectre discret de valeur $E_n = n h \nu$.

Pour lui ce n'était qu'une hypothèse *ad hoc* ajouté aux concepts précédents en espérant qu'un jour émergera une nouvelle théorie cohérente.

Il en démontra une loi de probabilité $\Pr(E = E_n)$ qui donne une valeur moyenne (espérance mathématique)

$$\text{Esp}(E = E_n) = \frac{h c / \lambda}{\exp \frac{h c / \lambda}{k T} - 1}$$

donc dans l'ancienne expression de Rayleigh & Jones cette formule remplace $k T$

$$L_\lambda = 2 c \frac{1}{\lambda^4} \frac{h c / \lambda}{\exp \frac{h c}{\lambda k T} - 1}$$

Conclusion : loi de Planck

$$L_\lambda = 2 h c^2 \frac{1}{\lambda^5} \frac{1}{\exp \frac{h c}{\lambda k T} - 1}$$

Rappel : L_λ est représenté par l'aire entre l'axe des ordonnées, celui des abscisses, la courbe représentative de $dL / d\lambda$ et la droite d'abscisse λ .

Son calcul est très compliqué !

Photons

Mileva Marić, l'épouse d'Einstein eut l'idée qu'un saut d'énergie d'un oscillateur est associé à la création ou à la disparition d'une particule de lumière que le chimiste Lewis nomma **photon** (en 1926).

Mais ce fut Einstein qui signa en 1905 la publication de l'idée.

Photons

Mileva Marić, l'épouse d'Einstein eut l'idée qu'un saut d'énergie d'un oscillateur est associé à la création ou à la disparition d'une particule de lumière que le chimiste Lewis nomma photon (en 1926).

Mais ce fut Einstein qui signa en 1905 la publication de l'idée.

Le temps et l'énergie, déjà associés dans les théories physique classiques le sont aussi mais autrement : une variation δE de l'énergie d'un photon est au minimum égale à $h \nu = h / T$ où T est la période.

Photons

Mileva Marić, l'épouse d'Einstein eut l'idée qu'un saut d'énergie d'un oscillateur est associé à la création ou à la disparition d'une particule de lumière que le chimiste Lewis nomma photon (en 1926).

Mais ce fut Einstein qui signa en 1905 la publication de l'idée.

Le temps et l'énergie, déjà associés dans les théories physique classiques le sont aussi mais autrement : une variation δE de l'énergie de création ou de disparition d'un photon est égale à $h \nu = h / T$ où T est la période.

Cela signifie que pour mesurer cette variation δE il faut un temps long d'au moins d'une période :

$\delta E \geq h / T \geq h \delta t$ puisqu'il faut que $dt \geq T$, donc $\delta E \delta t \geq h$ (Heisenberg, 1927)

Photons

Mileva Marić, l'épouse d'Einstein eut l'idée qu'un saut d'énergie d'un oscillateur est associé à la création ou à la disparition d'une particule de lumière que le chimiste Lewis nomma photon (en 1926).

Mais ce fut Einstein qui signa en 1905 la publication de l'idée.

Le temps et l'énergie, déjà associés dans les théories physique classiques le sont aussi mais autrement : une variation δE de l'énergie de création ou de disparition d'un photon est égale à $h \nu = h / T$ où T est la période.

Cela signifie que pour mesurer cette variation δE il faut un temps long d'au moins d'une période :

$\delta E \geq h / T \geq h \delta t$ puisqu'il faut que $dt \geq T$, donc $\delta E \delta t \geq h$ (Heisenberg, 1927)

C'est un fait nouveau : les incertitudes de mesure du temps et l'amplitude de la variation de l'énergie pendant une transition sont fondamentalement incompressibles quelles que soient les prouesses futures des techniques de mesure !

"Onde de matière"

En 1927 Louis du Broglie postula que toute particule (à l'époque on ne connaissait que les électrons, les protons et les neutrons) est associée à une onde comme les photons sont associés à une onde électromagnétique.

"Onde de matière"

En 1927 Louis du Broglie postula que toute particule (à l'époque on ne connaissait que les électrons, les protons et les neutrons) est associée à une onde comme les photons sont associés à une onde électromagnétique.

Si la particule est immobile, alors la relation $m c^2 = h \nu$ est postulée.

"Onde de matière"

En 1927 Louis du Broglie postula que toute particule (à l'époque on ne connaissait que les électrons, les protons et les neutrons) est associée à une onde comme les photons sont associés à une onde électromagnétique.

Si la particule est immobile, alors la relation $m c^2 = h \nu$ est postulée.

En se servant des transformation du temps dans un changement de référentiel (Lorentz, 1921) $t = \beta \left(t' - \frac{V x'}{c^2} \right)$

où V est la vitesse de la patricule et β la racine carrée de $1 - V^2/c^2$.

"Onde de matière"

En 1927 Louis du Broglie postula que toute particule (à l'époque on ne connaissait que les électrons, les protons et les neutrons) est associée à une onde comme les photons sont associés à une onde électromagnétique.

Si la particule est immobile, alors la relation $m c^2 = h \nu$ est postulée.

En se servant des transformation du temps dans un changement de référentiel (Lorentz, 1921) $t = \beta \left(t' - \frac{V x'}{c^2} \right)$

où V est la vitesse de la patricule et β la racine carrée de $1 - V^2/c^2$.

Il démontra alors que **pour une particule libre** l'onde se propage à la vitesse $u = c^2 / V$ qui est largement plus grande que c , la vitesse de la lumière. Il conclut que l'onde ne peut pas transmettre une force, en particulier qu'elle n'est pas électromagnétique.

"Onde de matière"

En 1927 Louis du Broglie postula que toute particule (à l'époque on ne connaissait que les électrons, les protons et les neutrons) est associée à une onde comme les photons sont associés à une onde électromagnétique.

Si la particule est immobile, alors la relation $m c^2 = h \nu$ est postulée.

En se servant des transformation du temps dans un changement de référentiel (Lorentz, 1921) $t = \beta \left(t' - \frac{V x'}{c^2} \right)$

où V est la vitesse de la patricule et β la racine carrée de $1 - V^2/c^2$.

Il démontra alors que pour une particule libre l'onde se propage à la vitesse $u = c^2/V$ qui est largement plus grande que c , la vitesse de la lumière. Il conclut que l'onde ne peut pas transmettre une force, en particulier qu'elle n'est pas électromagnétique.

Une particule bousculée par un photon augmentes son énergie cinétique de $\delta \left(\frac{1}{2} m v^2 \right) = m v \delta v = \delta(m v) v$.

On a donc $\delta E \delta t$ soit $\delta(m v) v \delta t \geq h$. Mais $v dt$ est une distance δx donc $\delta(m v) \delta x \geq h$

Les incertitudes de mesure simultanée de l'impulsion $m v$ et de la position x sont incompressibles.

"Onde de matière"

En 1927 Louis du Broglie postula que toute particule (à l'époque on ne connaissait que les électrons, les protons et les neutrons) est associée à une onde comme les photons sont associés à une onde électromagnétique.

Si la particule est immobile, alors la relation $m c^2 = h \nu$ est postulée.

En se servant des transformation du temps dans un changement de référentiel (Lorentz, 1921) $t = \beta \left(t' - \frac{V x'}{c^2} \right)$

où V est la vitesse de la patricule et β la racine carrée de $1 - V^2/c^2$.

Il démontra alors que pour une particule libre l'onde se propage à la vitesse $u = c^2 V$ qui est largement plus grande que c , la vitesse de la lumière. Il conclut que l'onde ne peut pas transmettre une force, en particulier qu'elle n'est pas électromagnétique.

Une particule bousculée par un photon augmentes son énergie cinétique de $\delta \left(\frac{1}{2} m v^2 \right) = m v \delta v = \delta(m v) v$.

On a donc $\delta E \delta t$ soit $\delta(m v) v \delta t \geq h$. Mais $v dt$ est une distance δx donc $\delta(m v) \delta x \geq h$

(Heisenberg, 1927)

Les incertitudes de mesure simultanée de l'impulsion $m v$ et de la position x sont incompressibles.

Application : si l'électron tombe sur le proton d'un atome d'hydrogène, l'incertitude sur sa position serait nulle, donc $m v$ donc sa vitesse serait infinie.

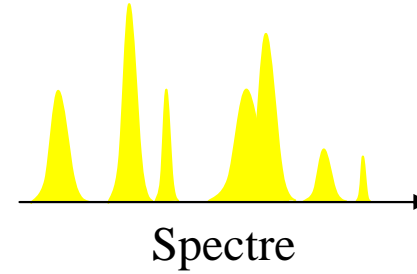
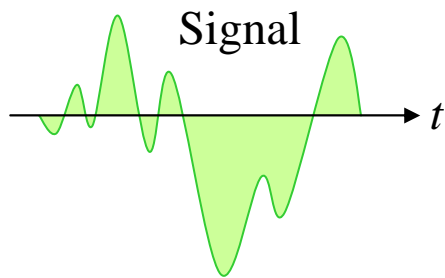
Conséquence fondamentale : les électrons ne peuvent pas tomber dans les noyaux atomiques (stabilité de la matière).

Paquet d'onde

Une onde sinusoïdale pure est éternelle et étendue dans tout l'espace, ce qui ne convient pas pour localiser une particule (photon, électron, proton ou neutron). Mais on savait que Joseph Fourier avait démontré mathématiquement que n'importe quel signal a son spectre.

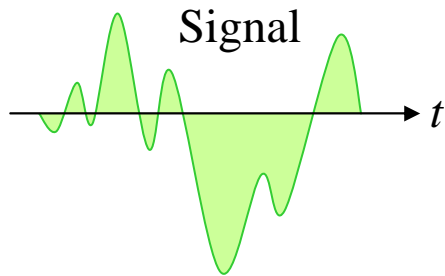
Paquet d'onde

Une onde sinusoïdale pure est éternelle et étendue dans tout l'espace, ce qui ne convient pas pour localiser une particule (photon, électron, proton ou neutron). Mais on savait que Joseph Fourier avait démontré mathématiquement que n'importe quel signal a son spectre.

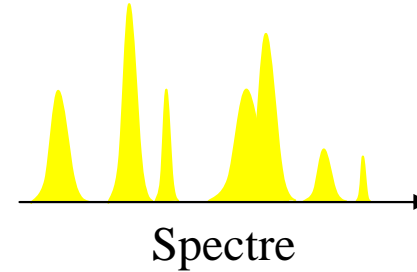


Paquet d'onde

Une onde sinusoïdale pure est éternelle et étendue dans tout l'espace, ce qui ne convient pas pour localiser une particule (photon, électron, proton ou neutron). Mais on savait que Joseph Fourier avait démontré mathématiquement que n'importe quel signal a son spectre.



$$f(t) = \int \frac{1}{2\pi} F(\omega) \exp + i \omega t d\omega$$



$$F(\omega) = \int f(t) \exp - i \omega t dt$$

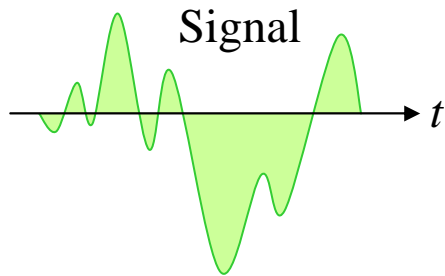
Du Broglie a postulé qu'à toute particule est associé un signal nommé **paquet d'onde**.

La fréquence ν des ondes d'un paquet appartient à un intervalle de longueur $\delta\nu$ respectant l'inégalité d'Eisenberg.

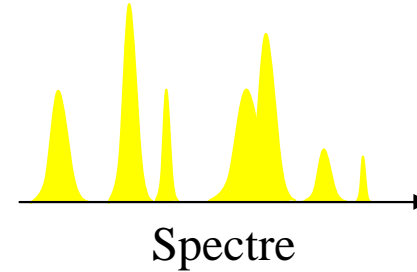
La formule $\lambda \nu = c$ permet de démontrer que $c \delta(1 / \lambda) \delta t \geq 1$.
(image 6)

Paquet d'onde

Une onde sinusoïdale pure est éternelle et étendue dans tout l'espace, ce qui ne convient pas pour localiser une particule (photon, électron, proton ou neutron). Mais on savait que Joseph Fourier avait démontré mathématiquement que n'importe quel signal a son spectre.



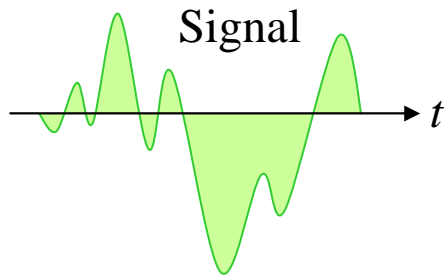
$$f(t) = \int \frac{1}{2\pi} F(\omega) \exp + i \omega t d\omega$$



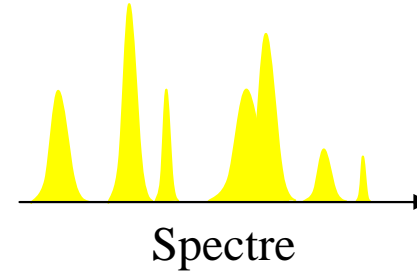
$$F(\omega) = \int f(t) \exp - i \omega t dt$$

Paquet d'onde

Une onde sinusoïdale pure est éternelle et étendue dans tout l'espace, ce qui ne convient pas pour localiser une particule (photon, électron, proton ou neutron). Mais on savait que Joseph Fourier avait démontré mathématiquement que n'importe quel signal a son spectre.



$$f(t) = \int \frac{1}{2\pi} F(\omega) \exp + i \omega t d\omega$$

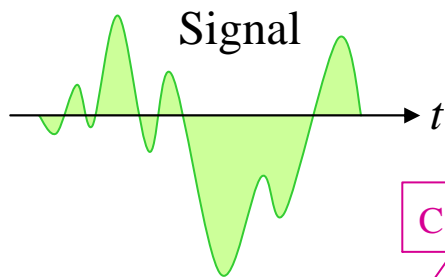


$$F(\omega) = \int f(t) \exp - i \omega t dt$$

Du Broglie a postulé qu'à toute particule est associé un signal nommé **paquet d'onde**.

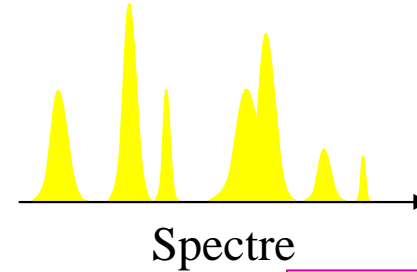
Paquet d'onde

Une onde sinusoïdale pure est éternelle et étendue dans tout l'espace, ce qui ne convient pas pour localiser une particule (photon, électron, proton ou neutron). Mais on savait que Joseph Fourier avait démontré mathématiquement que n'importe quel signal a son spectre.



$$f(t) = \int \frac{1}{2\pi} F(\omega) \exp + i \omega t d\omega$$

C'est quoi ?



$$F(\omega) = \int f(t) \exp - i \omega t dt$$

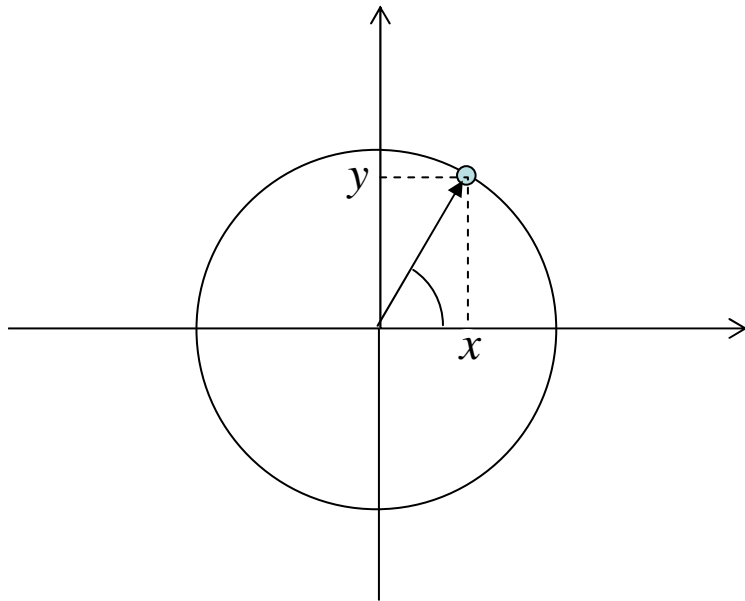
C'est quoi ?

Du Broglie a postulé qu'à toute particule est associé un signal nommé **paquet d'onde**.

La fréquence ν des ondes d'un paquet appartient à un intervalle de longueur $\delta\nu$ respectant l'inégalité d'Eisenberg.

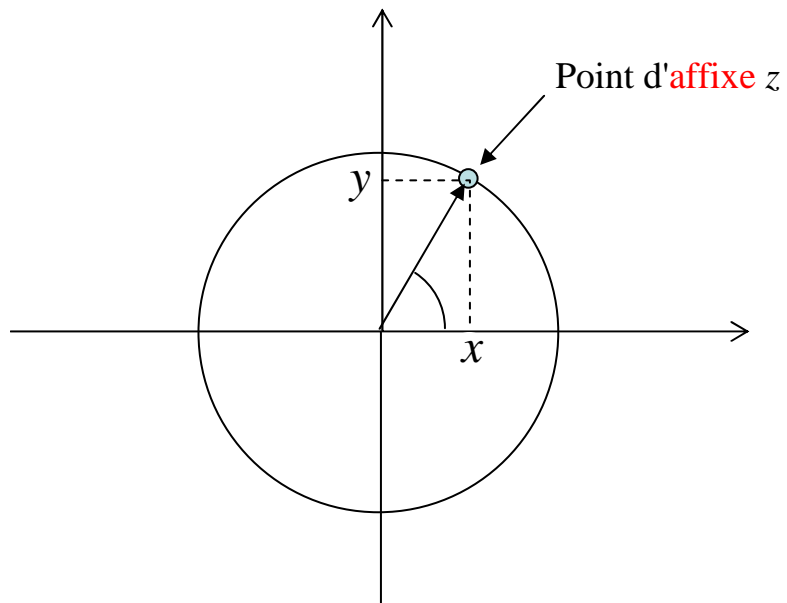
Nombres complexes

(mathématiques)



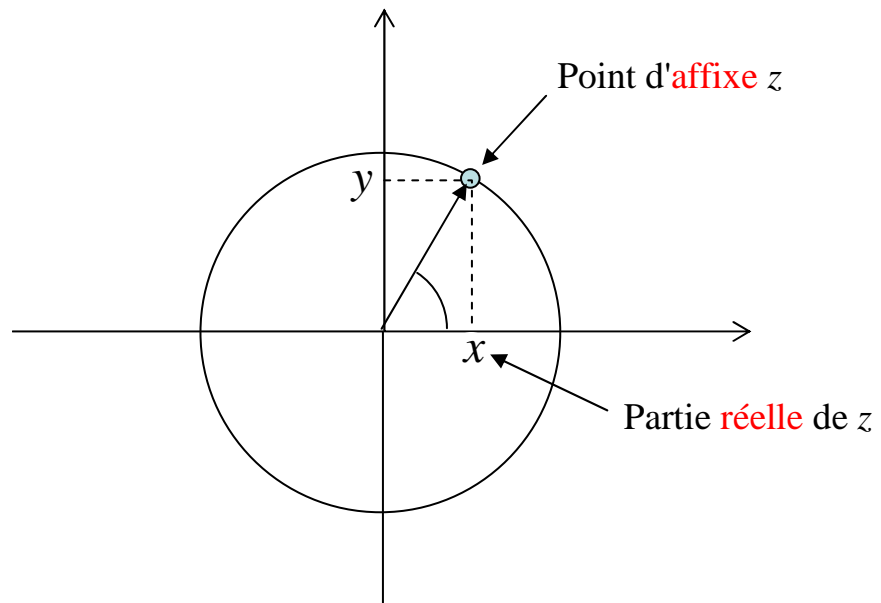
Nombres complexes

(mathématiques)



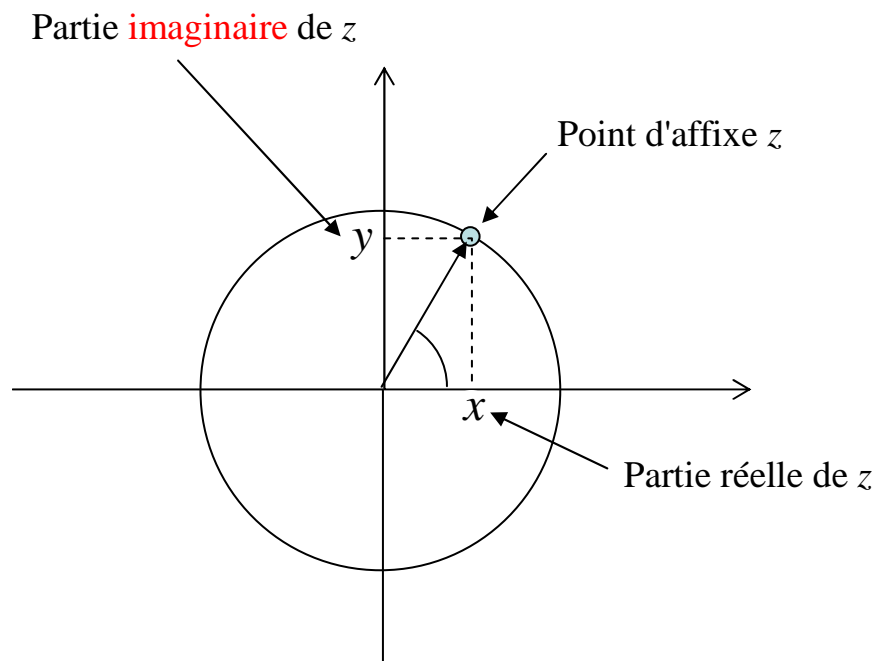
Nombres complexes

(mathématiques)



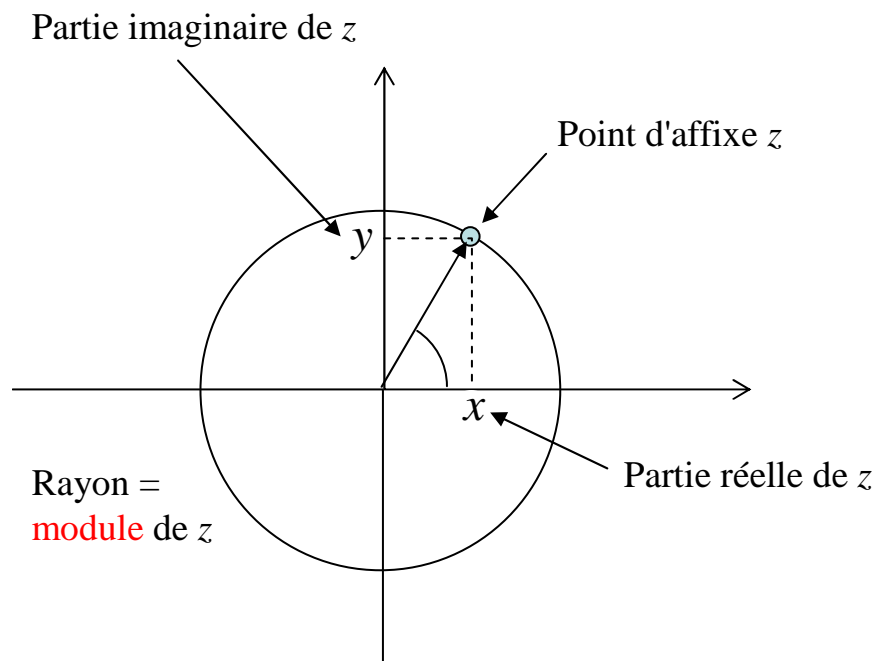
Nombres complexes

(mathématiques)



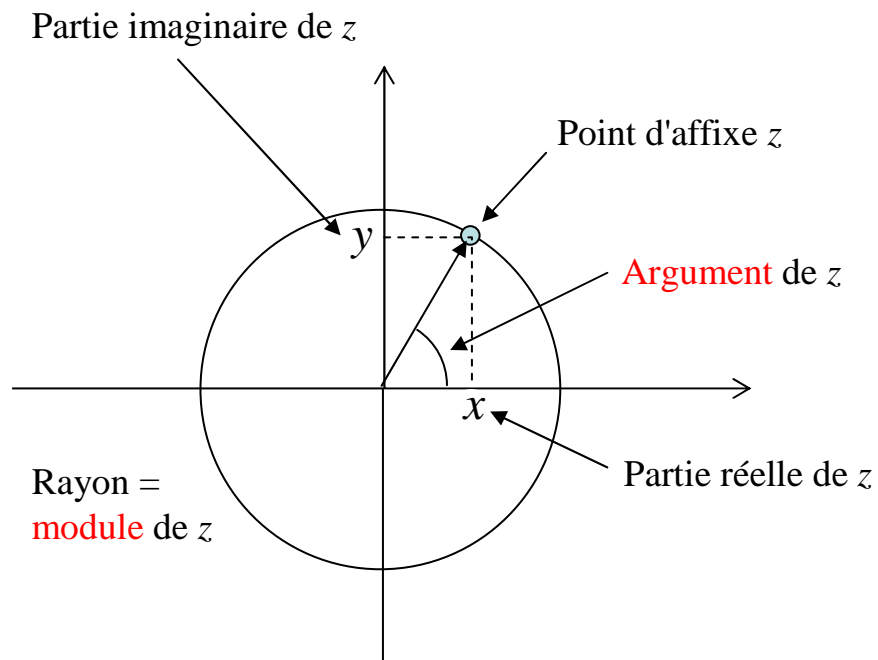
Nombres complexes

(mathématiques)



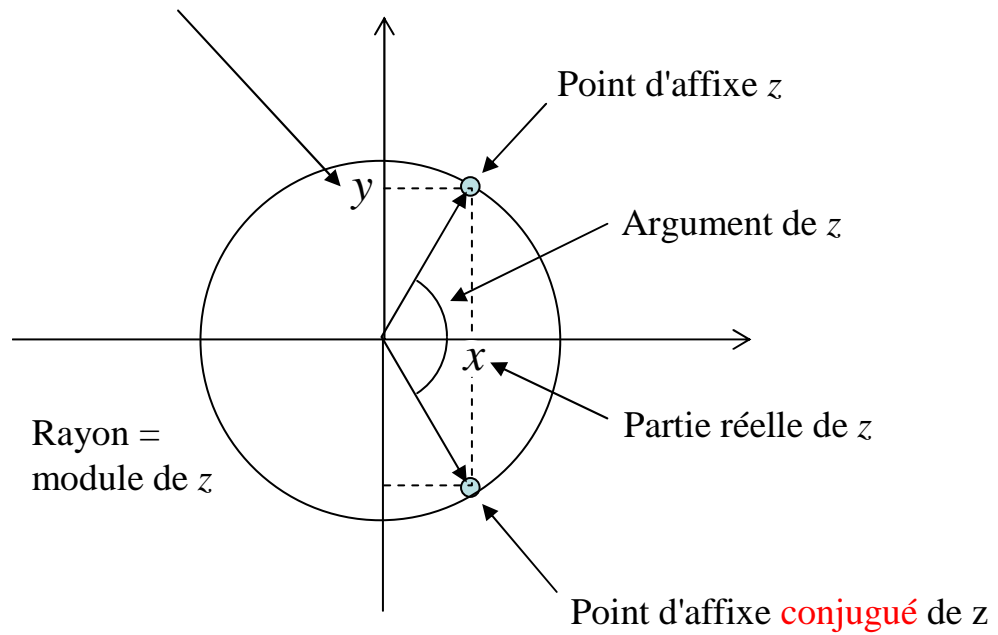
Nombres complexes

(mathématiques)



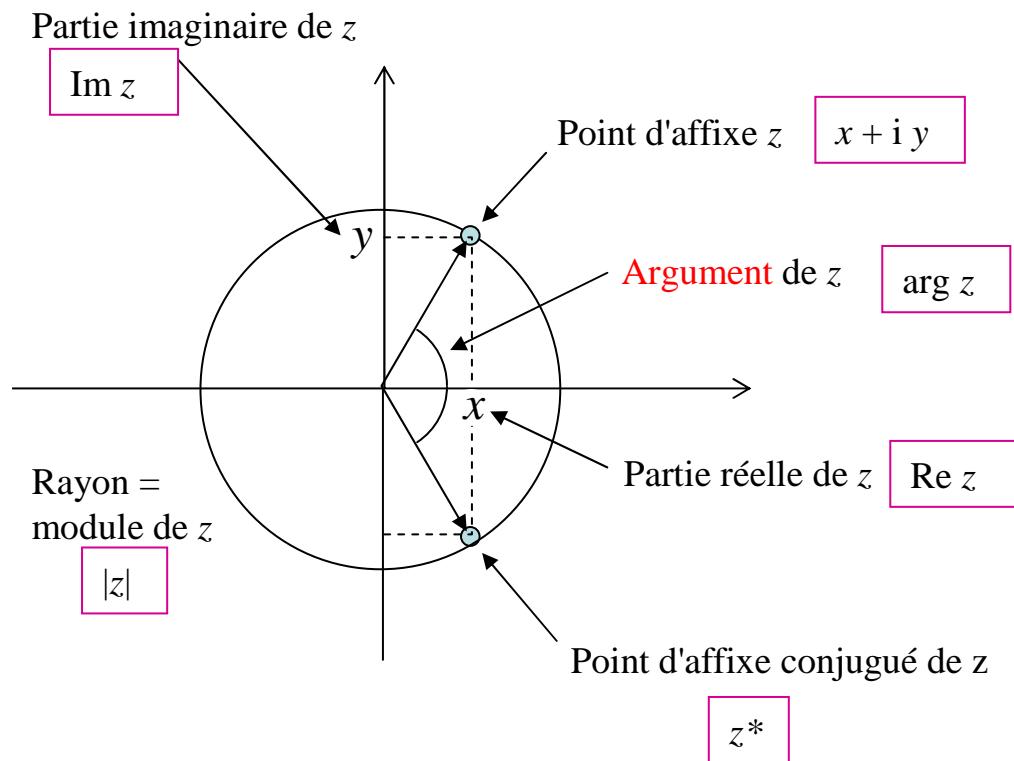
Nombres complexes

(mathématiques)



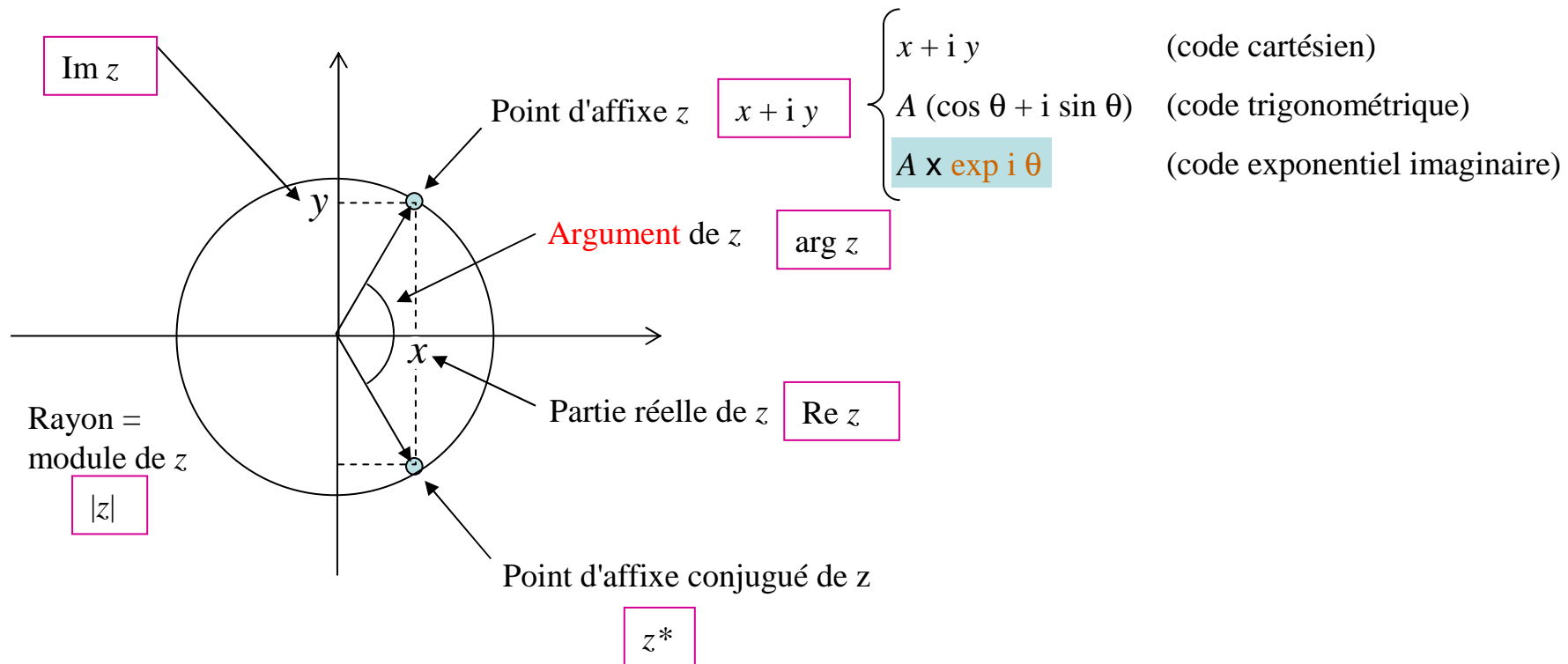
Nombres complexes

(mathématiques)



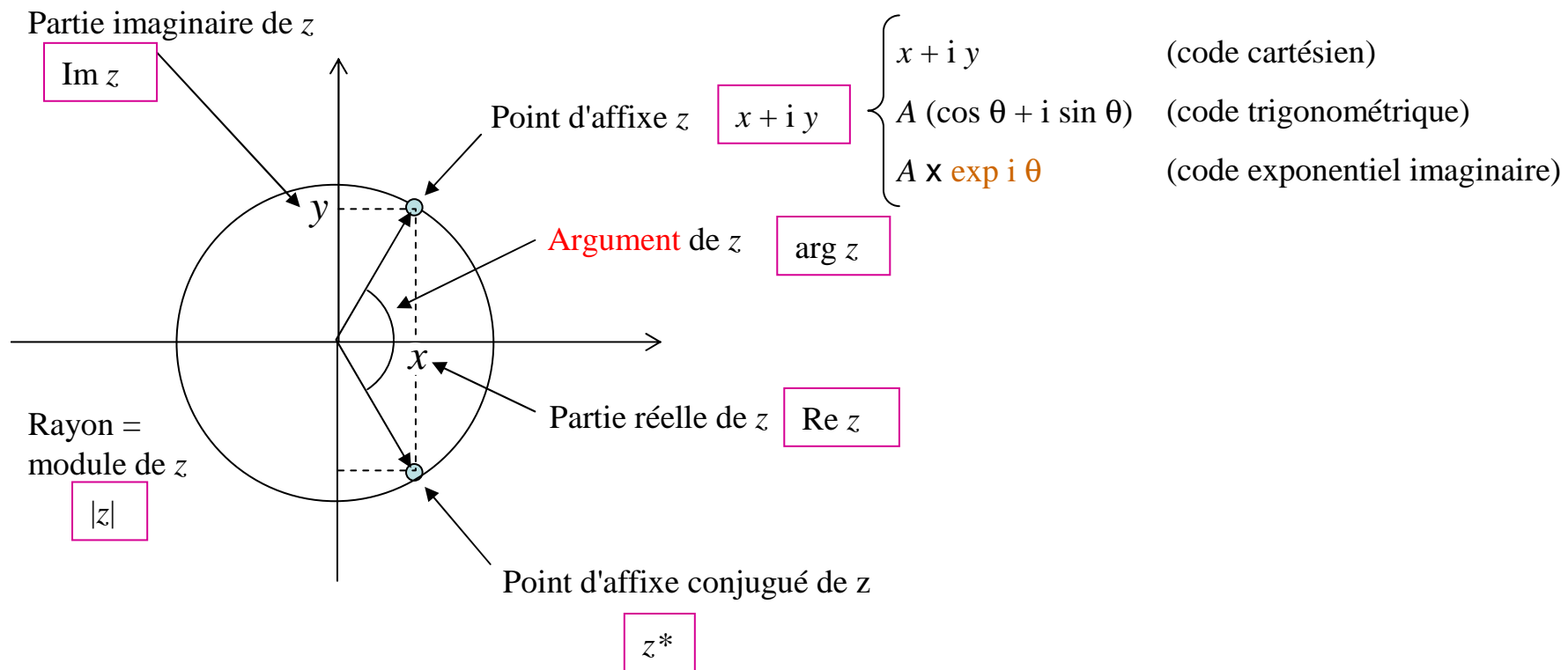
Nombres complexes

(mathématiques)



Nombres complexes

(mathématiques)



Quelques propriétés mathématiques

$$z z^* = |z|^2$$

$$(a + i b) (a - i b) = (a^2 + b^2) = |z|^2$$

$$z^n = |z|^n \times \exp n z$$

$$\exp i \alpha \times \exp i \beta = \exp i (\alpha + \beta)$$

Le hasard quantique

Capturer une particule (photon, électron, etc) est une **expérience aléatoire**.

Le hasard quantique

Capturer une particule (photon, électron, etc) est une **expérience aléatoire**.

Divisons le temps d'expérience en durées ΔT .

Le hasard quantique

Capturer une particule (photon, électron, etc) est une **expérience aléatoire**.

Divisons le temps d'expérience en durées ΔT .

Soit ΔV la partie de l'espace surveillée par un détecteur de volume dV .

Le hasard quantique

Capter une particule (photon, électron, etc) est une **expérience aléatoire**.

Divisons le temps d'expérience en durées ΔT .

Soit ΔV la partie de l'espace surveillée par un détecteur de volume dV .

Soit N est le nombre total de durées ΔT et n le nombre de captures.

Le hasard quantique

Capter une particule (photon, électron, etc) est une **expérience aléatoire**.

Divisons le temps d'expérience en durées ΔT .

Soit ΔV la partie de l'espace surveillée par un détecteur de volume dV .

Soit N est le nombre total de durées ΔT et n le nombre de captures.

La **fréquence** est le rapport n / N .

Le hasard quantique

Capter une particule (photon, électron, etc) est une **expérience aléatoire**.

Divisons le temps d'expérience en durées ΔT .

Soit ΔV la partie de l'espace surveillée par un détecteur de volume dV .

Soit N est le nombre total de durées ΔT et n le nombre de captures.

La **fréquence** est le rapport n / N .

En cas de capture, N et n augmentent d'une unité donc la fréquence augmente de $\frac{n+1}{N+1} - \frac{n}{N}$.

Le hasard quantique

Capturer une particule (photon, électron, etc) est une **expérience aléatoire**.

Divisons le temps d'expérience en durées ΔT .

Soit ΔV la partie de l'espace surveillée par un détecteur de volume dV .

Soit N est le nombre total de durées ΔT et n le nombre de captures.

La **fréquence** est le rapport n / N .

En cas de capture, N et n augmentent d'une unité donc la fréquence augmente de $\frac{n+1}{N+1} - \frac{n}{N}$.

Une réduction au même dénominateur et une simplification donnent

$$\frac{(n+1)N - (N+1)n}{(N+1)n} = \frac{N-n}{(N+1)n} < \frac{N-n}{Nn} < \frac{N}{Nn} = \frac{1}{n}$$

Le hasard quantique

Capter une particule (photon, électron, etc) est une **expérience aléatoire**.

Divisons le temps d'expérience en durées ΔT .

Soit ΔV la partie de l'espace surveillée par un détecteur de volume dV .

Soit N est le nombre total de durées ΔT et n le nombre de captures.

La **fréquence** est le rapport n / N .

En cas de capture, N et n augmentent d'une unité donc la fréquence augmente de $\frac{n+1}{N+1} - \frac{n}{N}$.

Une réduction au même dénominateur et une simplification donnent

$$\frac{(n+1)N - (N+1)n}{(N+1)n} = \frac{N-n}{(N+1)n} < \frac{N-n}{Nn} < \frac{N}{Nn} = \frac{1}{n}$$

En cas de non capture N seule augmentent d'une unité donc la fréquence diminue de $\frac{n}{N} - \frac{n}{N+1}$

Une réduction au même dénominateur et une simplification donne

$$\frac{n(N+1) - Nn}{(N+1)n} = \frac{n}{(N+1)n} < \frac{1}{N+1} < \frac{1}{N} < \frac{1}{n}$$

Le hasard quantique

Capter une particule (photon, électron, etc) est une **expérience aléatoire**.

Divisons le temps d'expérience en durées ΔT .

Soit ΔV la partie de l'espace surveillée par un détecteur de volume dV .

Soit N est le nombre total de durées ΔT et n le nombre de captures.

La **fréquence** est le rapport n / N .

En cas de capture, N et n augmentent d'une unité donc la fréquence augmente de $\frac{n+1}{N+1} - \frac{n}{N}$.

Une réduction au même dénominateur et une simplification donnent

$$\frac{(n+1)N - (N+1)n}{(N+1)n} = \frac{N-n}{(N+1)n} < \frac{N-n}{Nn} < \frac{N}{Nn} = \frac{1}{n}$$

En cas de non capture N seule augmentent d'une unité donc la fréquence diminue de $\frac{n}{N} - \frac{n}{N+1}$

Une réduction au même dénominateur et une simplification donne

$$\frac{n(N+1) - Nn}{(N+1)n} = \frac{n}{(N+1)n} < \frac{1}{N+1} < \frac{1}{N} < \frac{1}{n}$$

La variation de la fréquence appartient à l'intervalle $[-1/n, +1/n]$.

Le hasard quantique

Capter une particule (photon, électron, etc) est une **expérience aléatoire**.

Divisons le temps d'expérience en durées ΔT .

Soit ΔV la partie de l'espace surveillée par un détecteur de volume dV .

Soit N est le nombre total de durées ΔT et n le nombre de captures.

La **fréquence** est le rapport n / N .

En cas de capture, N et n augmentent d'une unité donc la fréquence augmente de $\frac{n+1}{N+1} - \frac{n}{N}$.

Une réduction au même dénominateur et une simplification donnent

$$\frac{(n+1)N - (N+1)n}{(N+1)n} = \frac{N-n}{(N+1)n} < \frac{N-n}{Nn} < \frac{N}{Nn} = \frac{1}{n}$$

En cas de non capture N seule augmentent d'une unité donc la fréquence diminue de $\frac{n}{N} - \frac{n}{N+1}$

Une réduction au même dénominateur et une simplification donne

$$\frac{n(N+1) - Nn}{(N+1)n} = \frac{n}{(N+1)n} < \frac{1}{N+1} < \frac{1}{N} < \frac{1}{n}$$

La variation de la fréquence appartient à l'intervalle $[-1/n, +1/n]$.

Au fur et à mesure que les captures ont lieu, parce que n ne peut qu'augmenter, cet intervalle se rétrécit (sa longueur est $2/n$).

Le hasard quantique

Capturer une particule (photon, électron, etc) est une **expérience aléatoire**.

Divisons le temps d'expérience en durées ΔT .

Soit ΔV la partie de l'espace surveillée par un détecteur de volume dV .

Soit N est le nombre total de durées ΔT et n le nombre de captures.

La **fréquence** est le rapport n / N .

En cas de capture, N et n augmentent d'une unité donc la fréquence augmente de $\frac{n+1}{N+1} - \frac{n}{N}$.

Une réduction au même dénominateur et une simplification donnent

$$\frac{(n+1)N - (N+1)n}{(N+1)n} = \frac{N-n}{(N+1)n} < \frac{N-n}{Nn} < \frac{N}{Nn} = \frac{1}{n}$$

En cas de non capture N seule augmentent d'une unité donc la fréquence diminue de $\frac{n}{N} - \frac{n}{N+1}$

Une réduction au même dénominateur et une simplification donne

$$\frac{n(N+1) - Nn}{(N+1)n} = \frac{n}{(N+1)n} < \frac{1}{N+1} < \frac{1}{N} < \frac{1}{n}$$

La variation de la fréquence appartient à l'intervalle $[-1/n, +1/n]$.

Au fur et à mesure que les captures ont lieu, parce que n ne peut qu'augmenter, cet intervalle se rétrécit (sa longueur est $2/n$).

Progressivement, la fréquence n / N de capture se stabilise sur une valeur limite.

Le hasard quantique

Capturer une particule (photon, électron, etc) est une **expérience aléatoire**.

Divisons le temps d'expérience en durées ΔT .

Soit ΔV la partie de l'espace surveillée par un détecteur de volume dV .

Soit N est le nombre total de durées ΔT et n le nombre de captures.

La **fréquence** est le rapport n / N .

En cas de capture, N et n augmentent d'une unité donc la fréquence augmente de $\frac{n+1}{N+1} - \frac{n}{N}$.

Une réduction au même dénominateur et une simplification donnent

$$\frac{(n+1)N - (N+1)n}{(N+1)n} = \frac{N-n}{(N+1)n} < \frac{N-n}{Nn} < \frac{N}{Nn} = \frac{1}{n}$$

En cas de non capture N seule augmentent d'une unité donc la fréquence diminue de $\frac{n}{N} - \frac{n}{N+1}$

Une réduction au même dénominateur et une simplification donne

$$\frac{n(N+1) - Nn}{(N+1)n} = \frac{n}{(N+1)n} < \frac{1}{N+1} < \frac{1}{N} < \frac{1}{n}$$

La variation de la fréquence appartient à l'intervalle $[-1/n, +1/n]$.

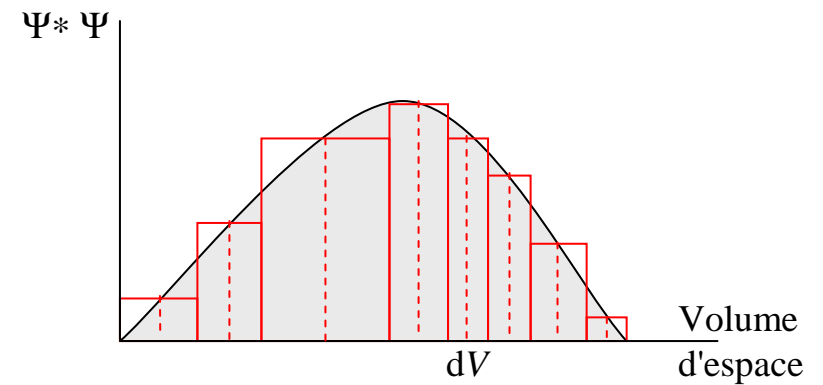
Au fur et à mesure que les captures ont lieu, parce que n ne peut qu'augmenter, cet intervalle se rétrécit (sa longueur est $2/n$).

Progressivement, la fréquence n / N de capture se stabilise sur une valeur limite.

Si l'expérience est répétée dans les mêmes circonstances physiques, cette limite n'a pas de raison de varier : selon le principe du rasoir d'Occam, on postule qu'elle ne varie pas.

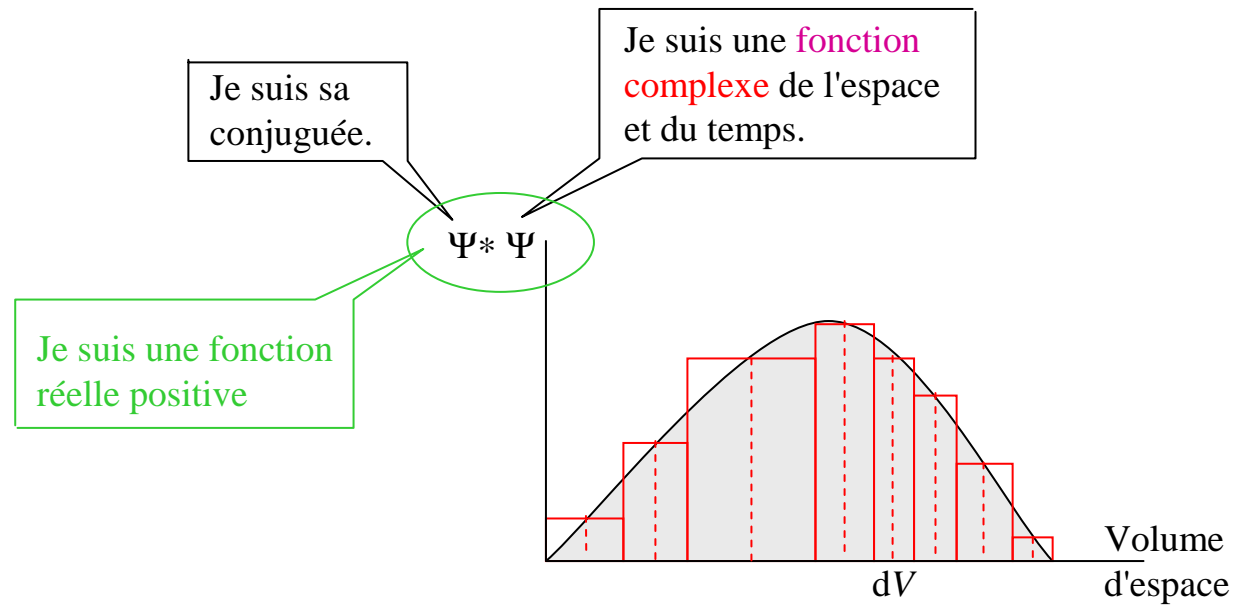
On l'appelle **probabilité de capture**.

Le hasard quantique



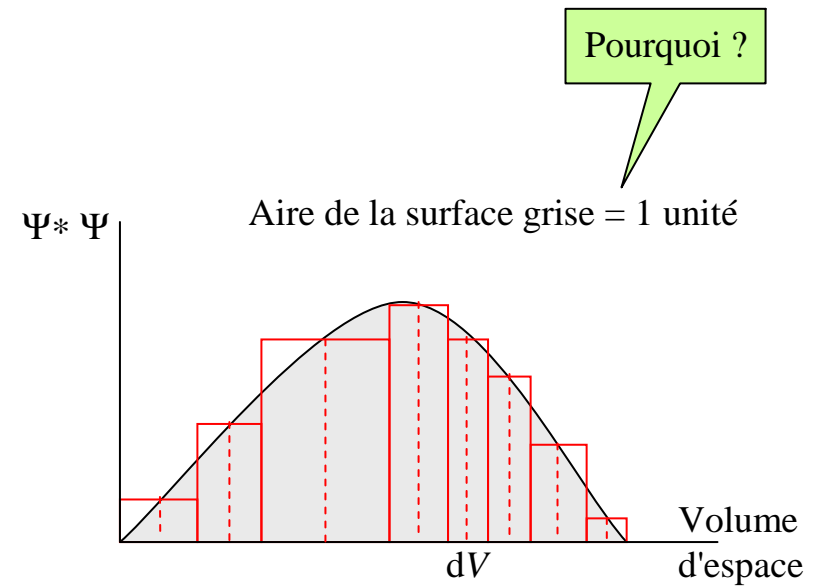
On l'appelle **probabilité de capture**.

Le hasard quantique



On l'appelle **probabilité de capture**.

Le hasard quantique



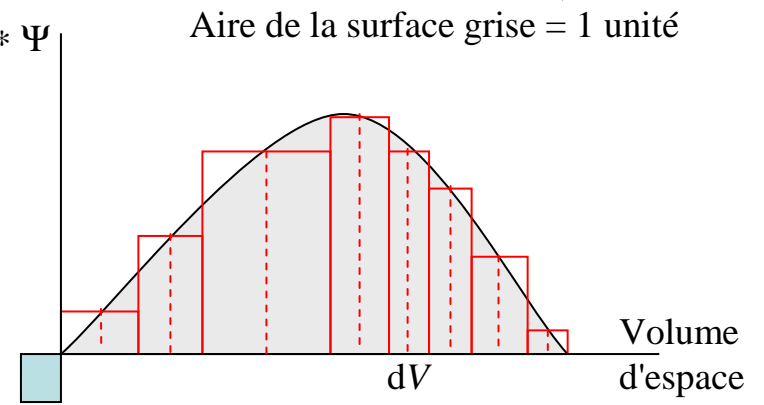
On l'appelle **probabilité de capture**.

Le hasard quantique

On postula que cette probabilité de capture est proportionnelle au volume d'espace surveillé :

Volume	Probabilité
dV	$\text{Pr}(dV)$
1	$\Psi^* \Psi$
Proportion	

$\Psi^* \Psi$



Pourquoi ?

Aire de la surface grise = 1 unité

Volume d'espace

dV

On l'appelle **probabilité de capture**.

Le hasard quantique

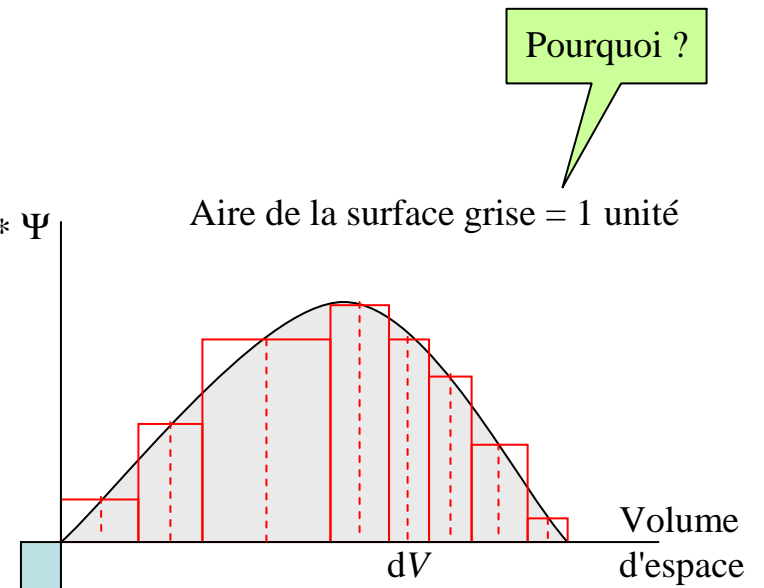
On postula que cette probabilité de capture est proportionnelle au volume d'espace surveillé :

Volume	Probabilité
dV	$\text{Pr}(dV)$
1	$\Psi^* \Psi$
Proportion	

La probabilité de capture de la particule dans un domaine donné \mathcal{D} de l'espace est

$$\int_{\mathcal{D}} \Psi^* \Psi dV$$

On l'appelle **probabilité de capture**.



Le hasard quantique

On postula que cette probabilité de capture est proportionnelle au volume d'espace surveillé :

Volume	Probabilité
dV	$\text{Pr}(dV)$
1	$\Psi^* \Psi$
Proportion	

$$\int_{\text{Espace}} \Psi^* \Psi dV = 1$$

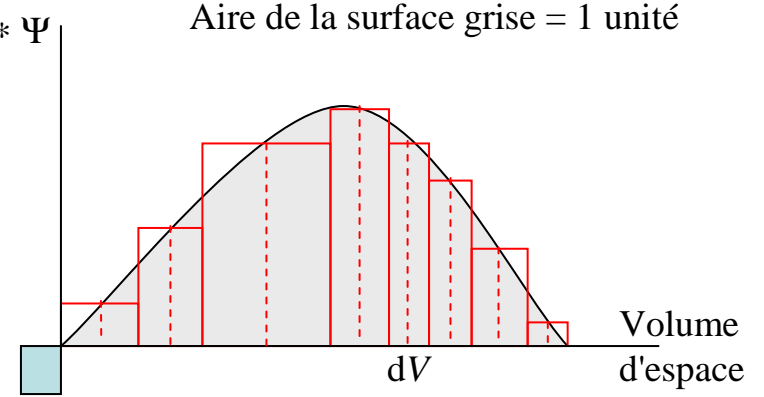
$\Psi^* \Psi$

Pourquoi ?

Aire de la surface grise = 1 unité

La probabilité de capture de la particule dans un domaine donné \mathcal{D} de l'espace est

$$\int_{\mathcal{D}} \Psi^* \Psi dV$$



On l'appelle **probabilité de capture**.

Le hasard quantique

On postule que cette probabilité de capture est proportionnelle au volume d'espace surveillé :

Volume	Probabilité
dV	$\text{Pr}(dV)$
1	$\Psi^* \Psi$
Proportion	

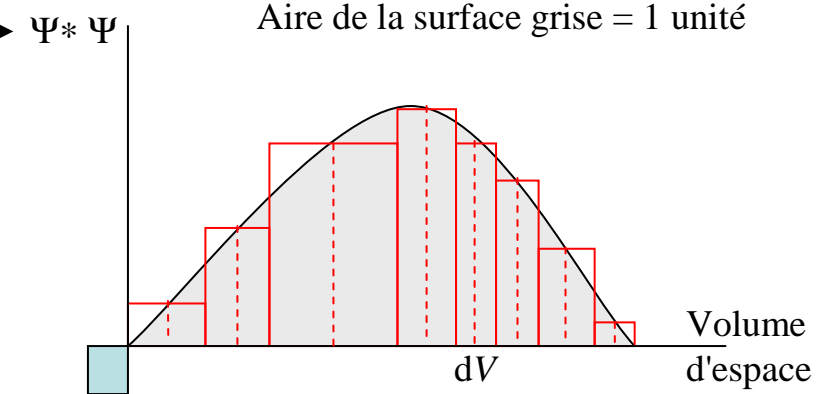
$$\int_{\text{Espace}} \Psi^* \Psi dV = 1$$

Parce que la probabilité du passage de la particule dans n'importe quelle domaine de l'espace est 1, ou 100 %.

Pourquoi ?

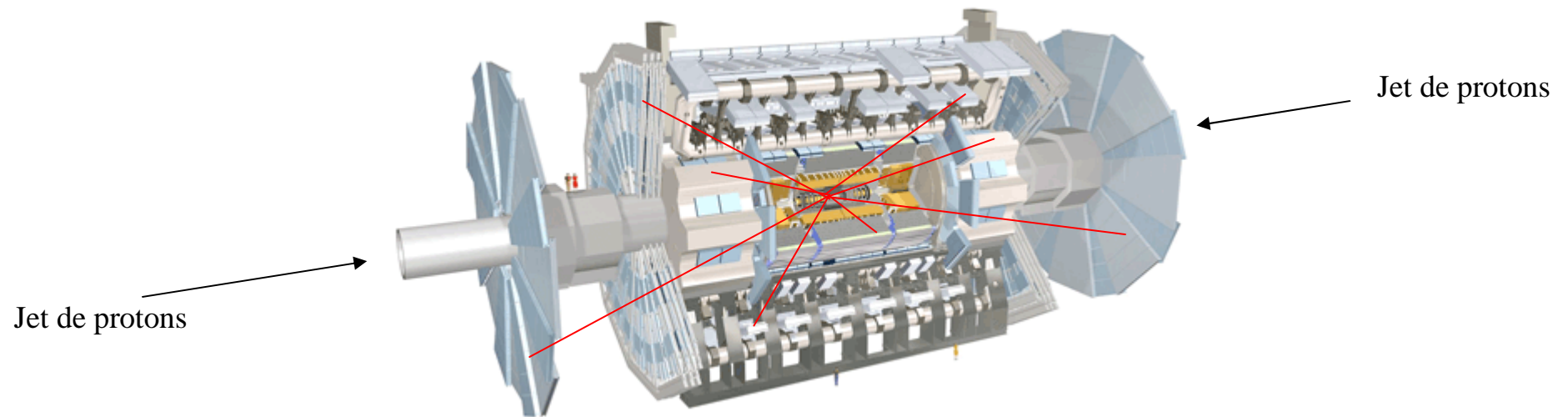
La probabilité de capture de la particule dans un domaine donné \mathcal{D} de l'espace est

$$\int_{\mathcal{D}} \Psi^* \Psi dV$$

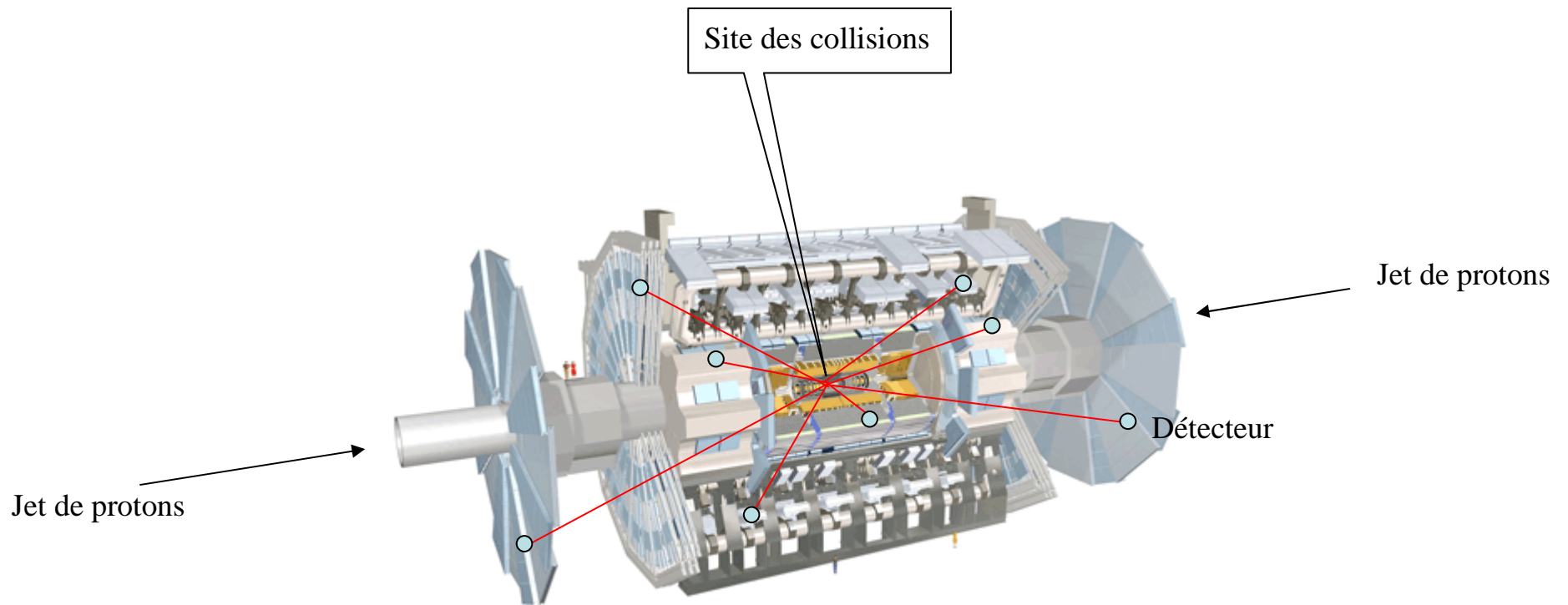


On l'appelle **probabilité de capture**.

Exemple

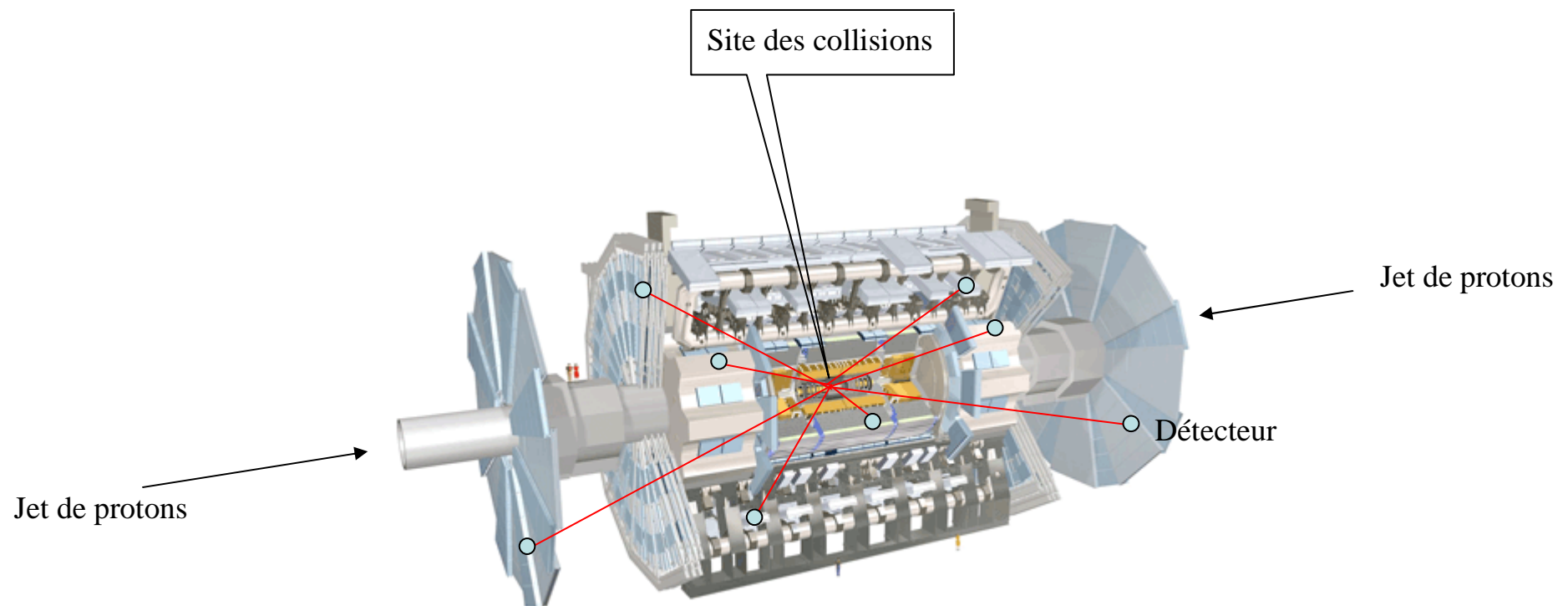


Exemple



Exemple

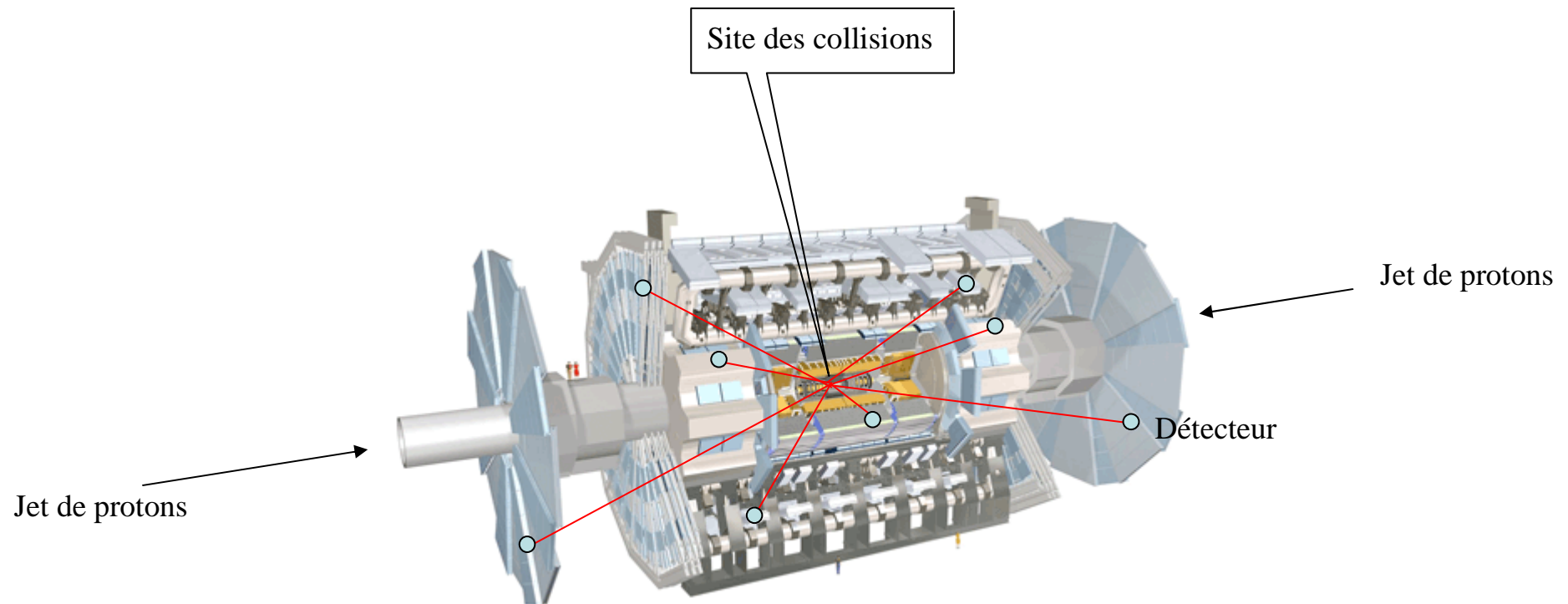
Tout détecteur de particule surveille une région de l'espace de volume non nul et fini ΔV . Il partage cet espace en un certain nombre de "pixels".



Exemple

Tout détecteur de particule surveille une région de l'espace de volume non nul et fini ΔV . Il partage cet espace en un certain nombre de "pixels".

Le paquet d'ondes couvre un certain nombre de pixels quand il traverse le détecteur.

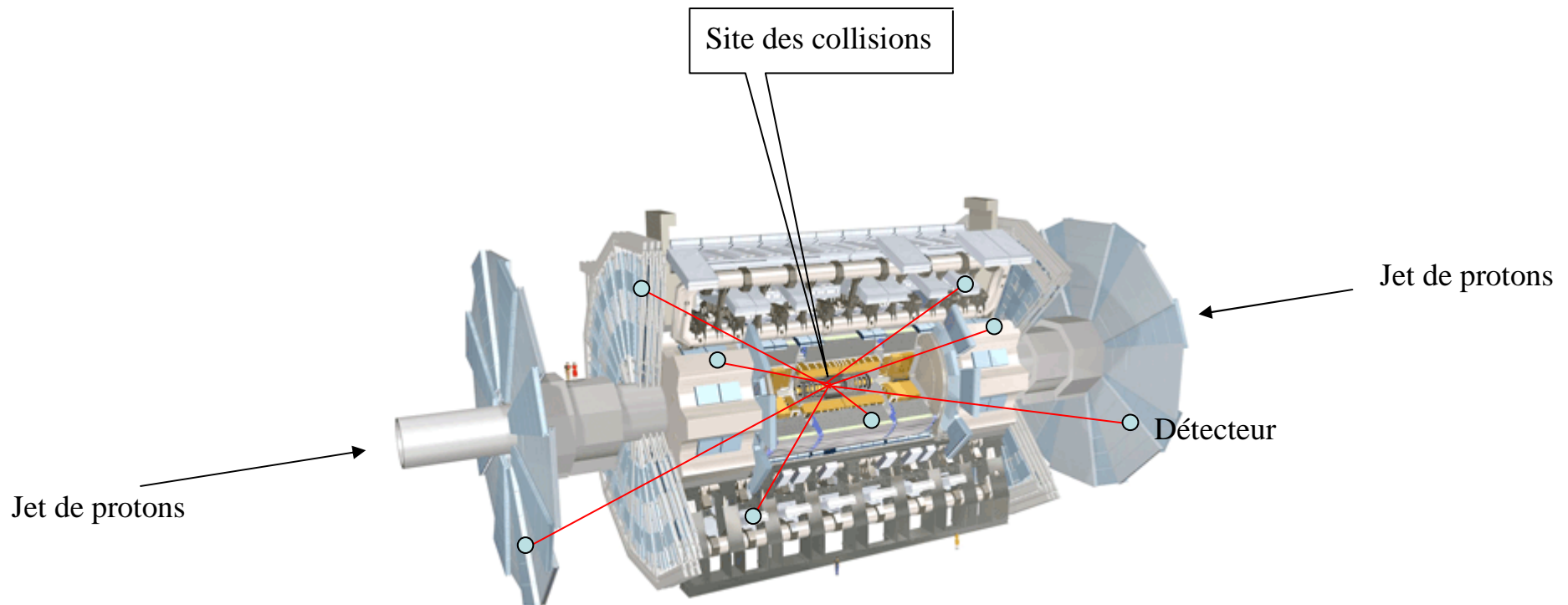


Exemple

Tout détecteur de particule surveille une région de l'espace de volume non nul et fini ΔV . Il partage cet espace en un certain nombre de "pixels".

Le paquet d'ondes couvre un certain nombre de pixels quand il traverse le détecteur.

Mais quand l'appareil détecte, un seul pixel réagit (loi de **réduction du paquet d'ondes**).



Exemple

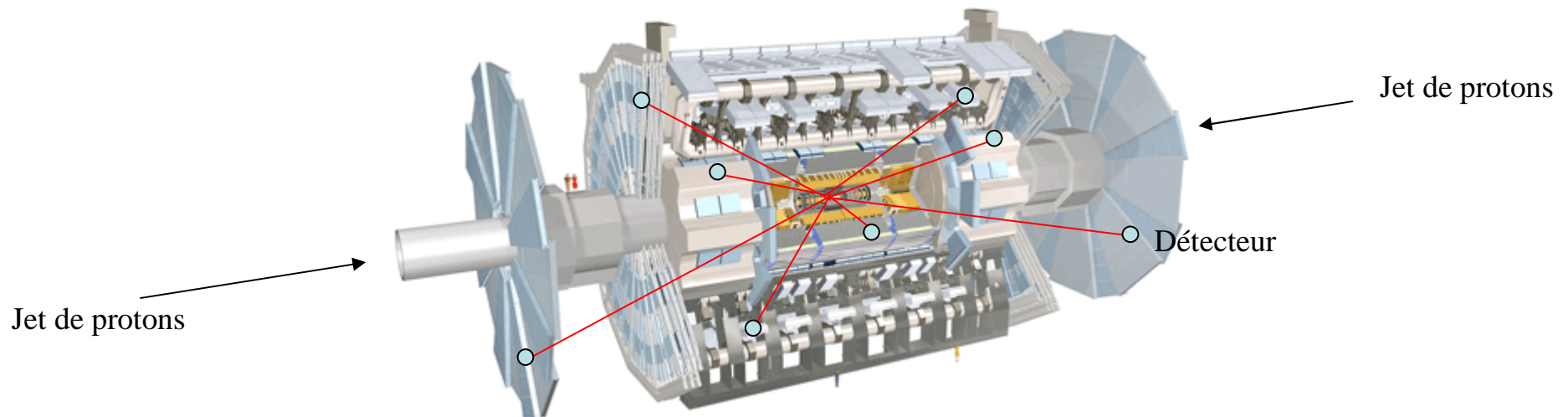
Tout détecteur de particule surveille une région de l'espace de volume non nul et fini ΔV . Il partage cet espace en un certain nombre de "pixels".

Le paquet d'ondes couvre un certain nombre de pixels quand il traverse le détecteur.

Mais quand l'appareil détecte, un seul pixel réagit (loi de réduction du paquet d'ondes).

Dans les collisionneurs de particules comme le CERN (centre européen de recherche nucléaire) chaque détecteur envoie ensuite ses coordonnées et résultats de mesure à un centre de calcul, puis celui-ci calcule une représentation graphique en 3D

(voir <https://public-archive.web.cern.ch/fr/research/Detector-fr.html>)



Interprétation

(DÉTECTION)

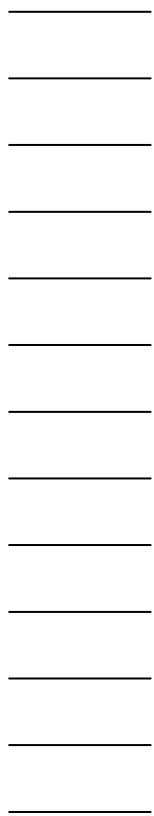
C'est seulement UN atome d'UN pixel qui capte soudain toute l'énergie de la particule.

Voire la particule elle-même.

Le signal généré est amplifié avant d'être exploité.

Spectre des valeurs propres

C'est l'ensemble des valeurs de l'énergie d'un corps quand celle-ci est stable.



Exemple : un
Oscillateur
harmonique
de corps noir

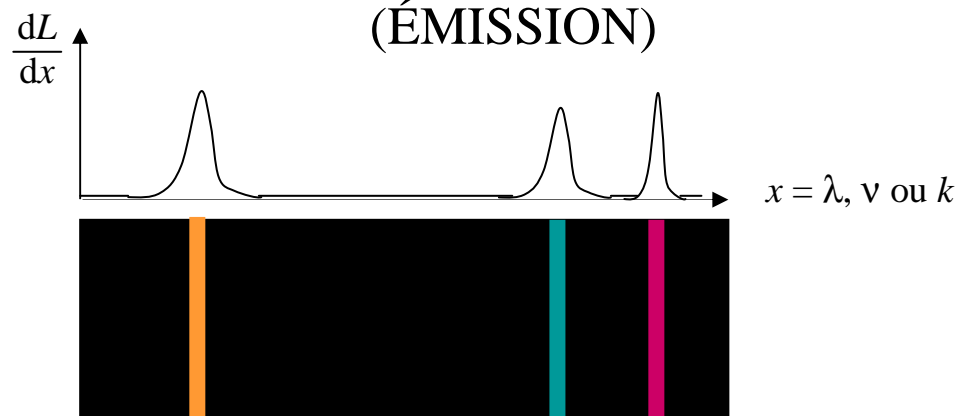


Autre exemple : un
atome
d'hydrogène

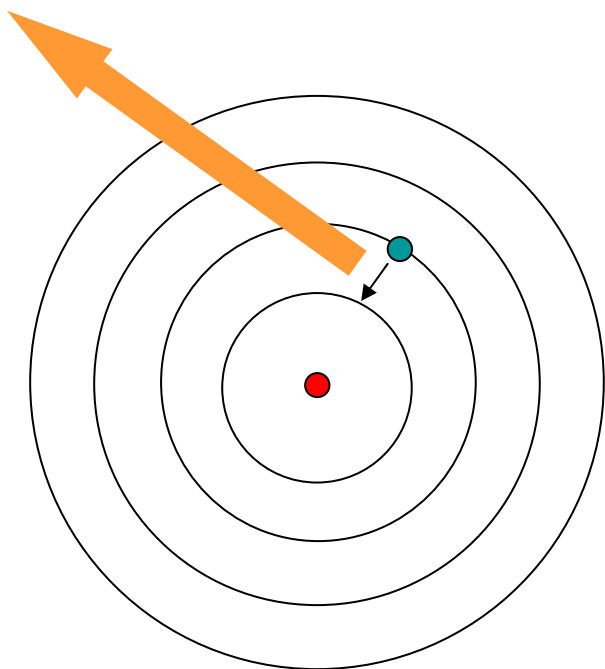
Une **transition** entre un niveau haut et un niveau bas émet ou absorbe un **photon** dont λ ou ν ou k est l'abscisse du sommet d'un pic étroit sur un spectre.

Spectre de raies

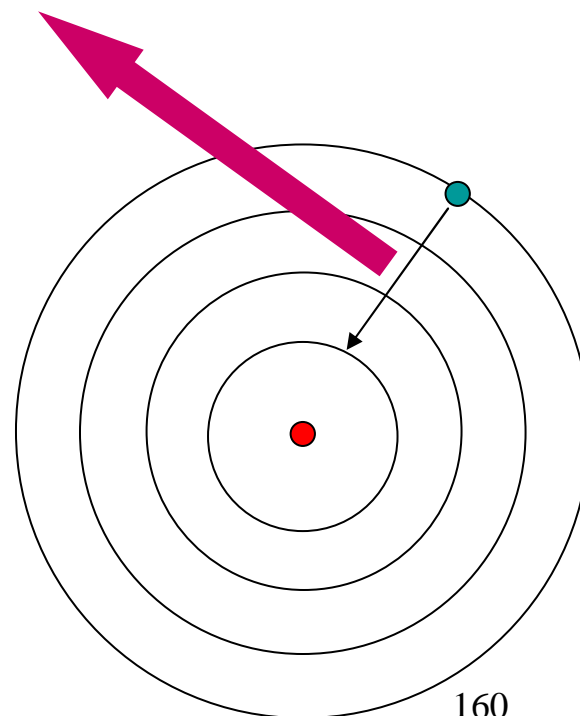
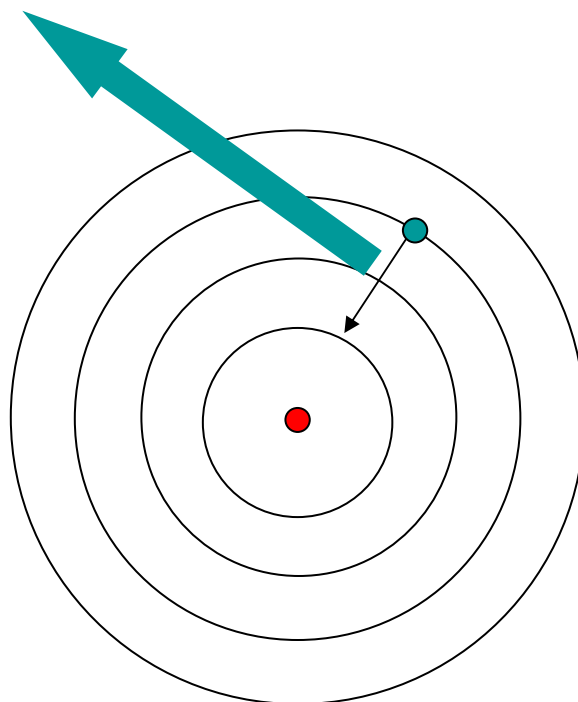
(ÉMISSION)



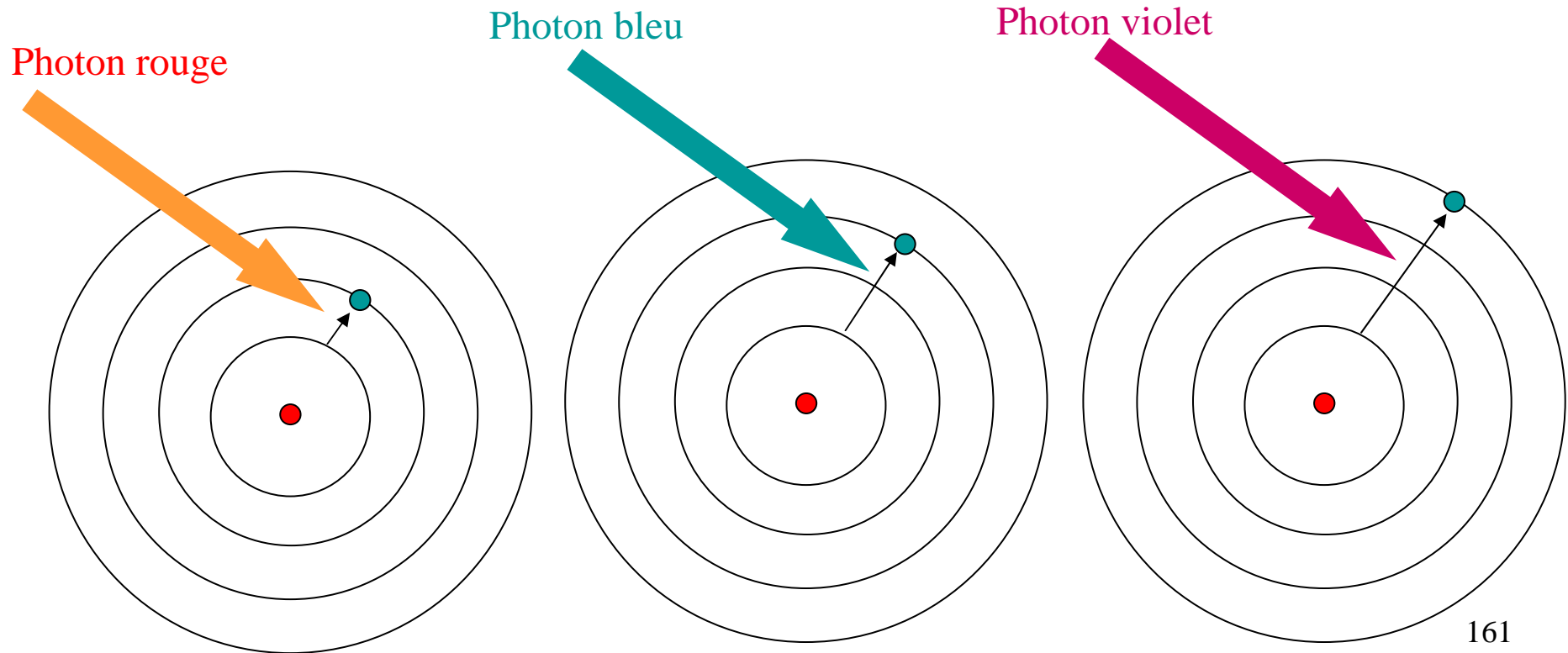
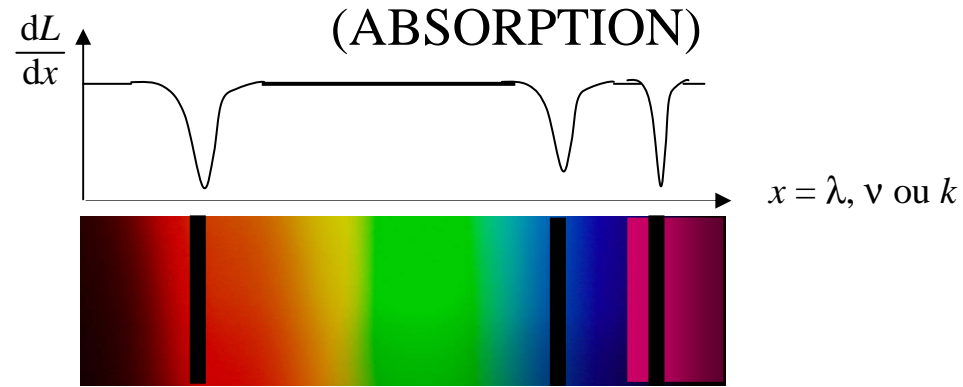
Photon rouge



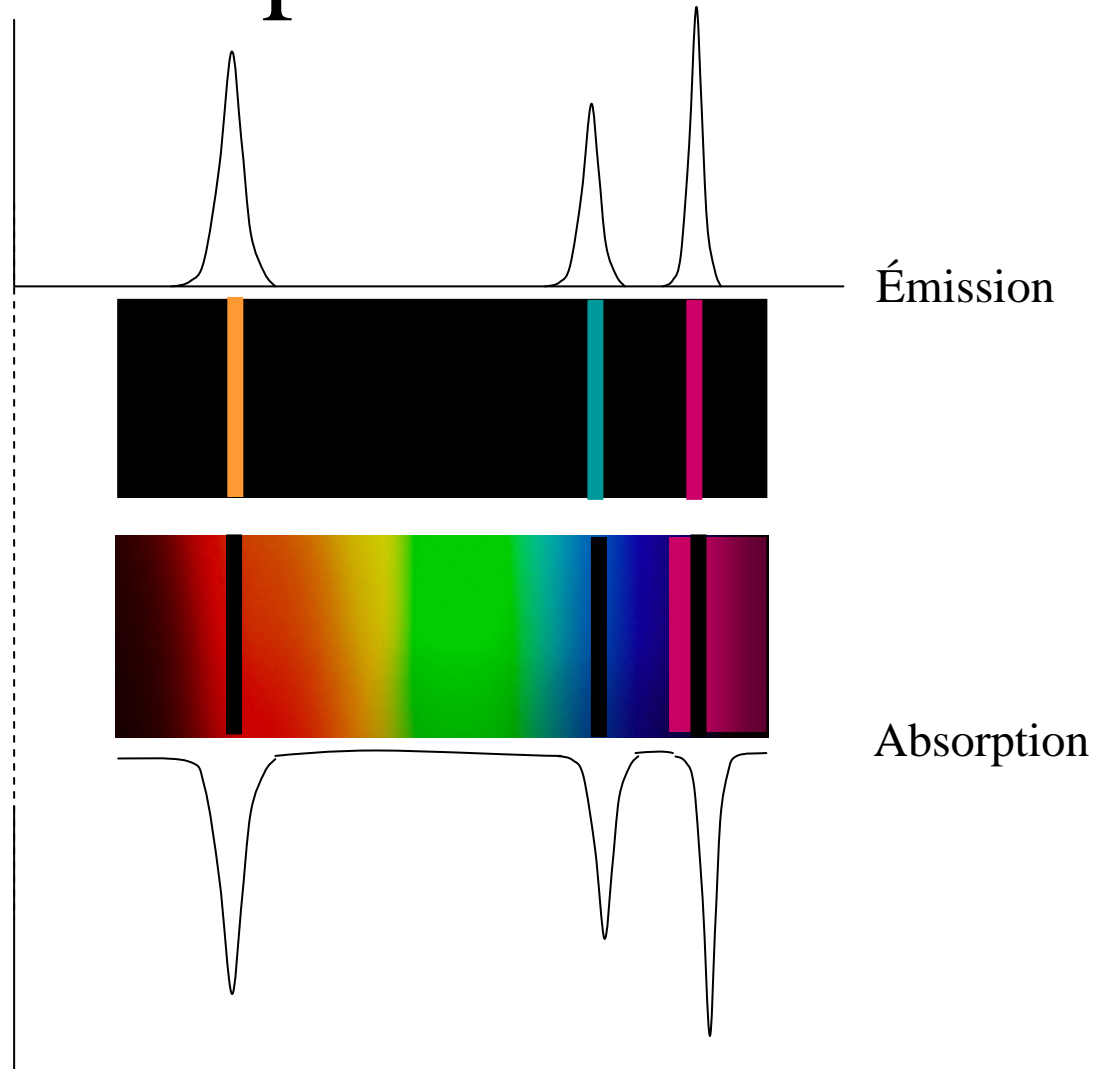
Photon violet



Spectre de raies



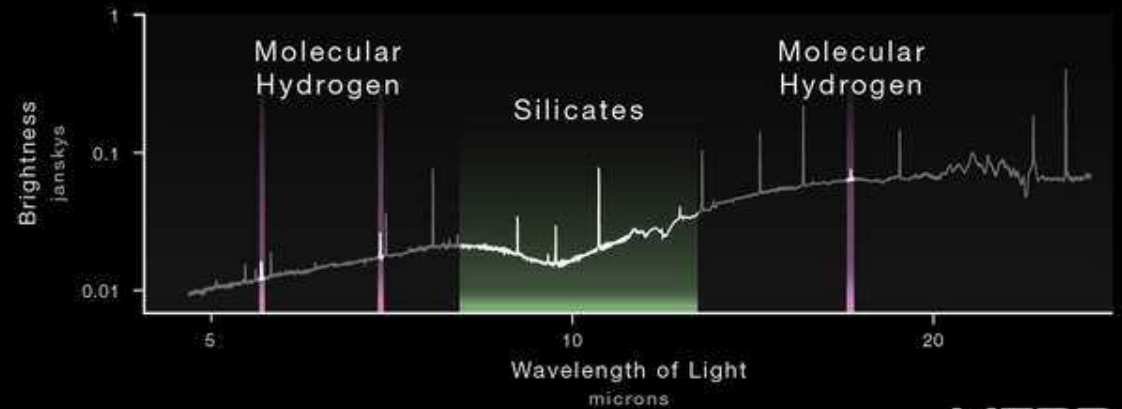
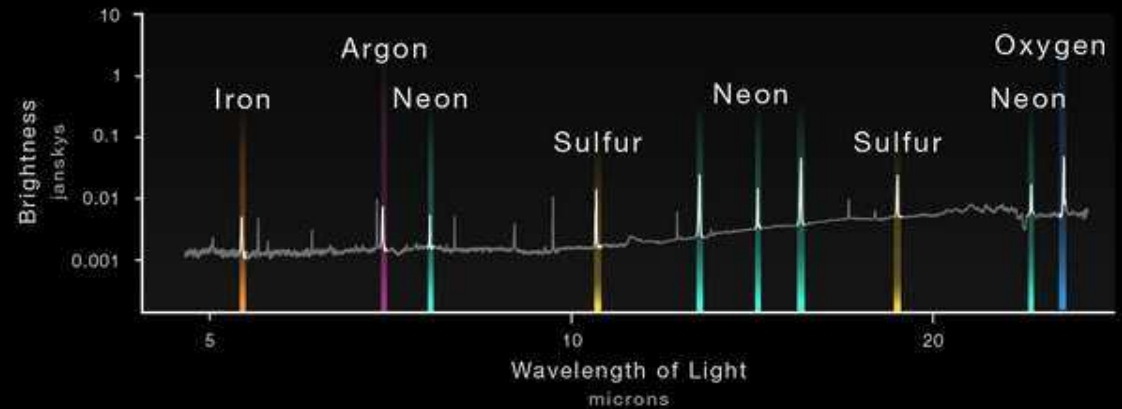
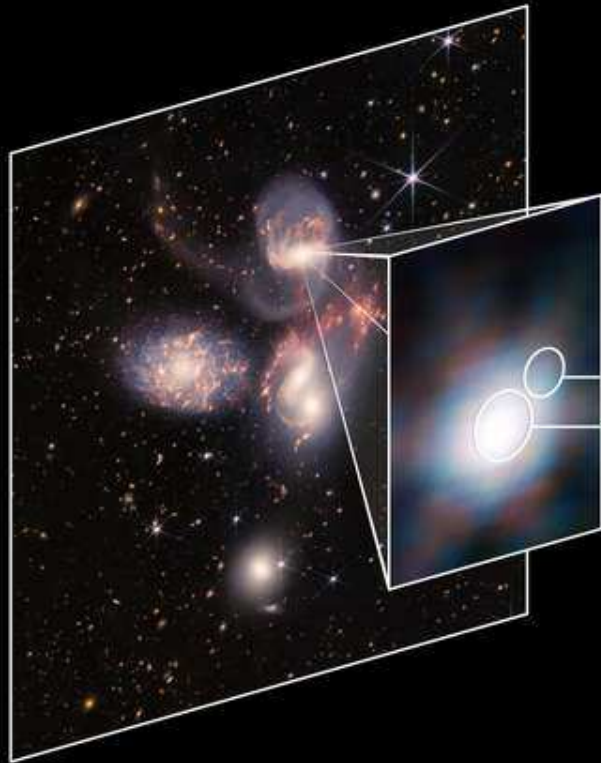
Spectre de raies



COMPOSITION OF GAS AROUND ACTIVE BLACK HOLE

NIRCam and MIRI Imaging

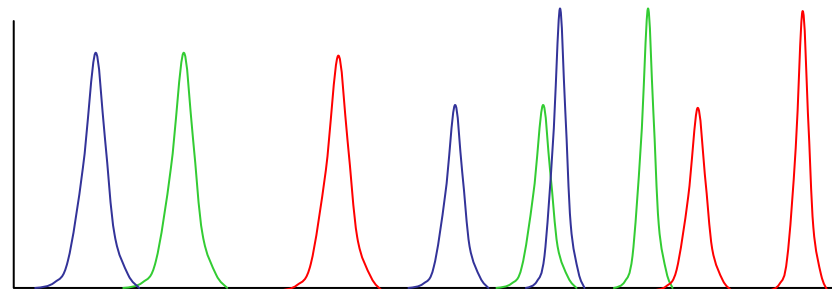
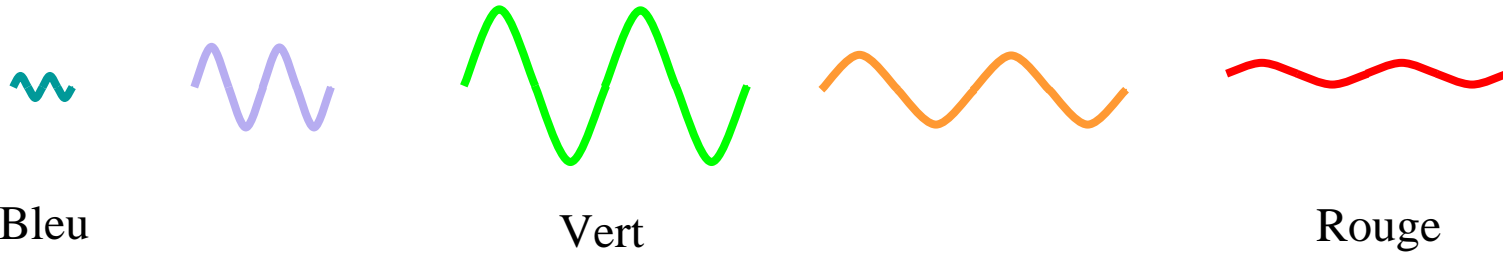
MIRI IFU Medium Resolution Spectroscopy



WEBB
SPACE TELESCOPE

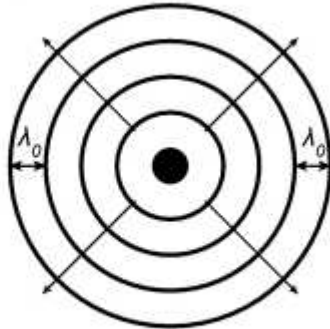
Décalage Doppler

nnnnnniiiiiiiiiiiiiaaaaaaaaaaooooooooooooommmmmmmmmmmmm



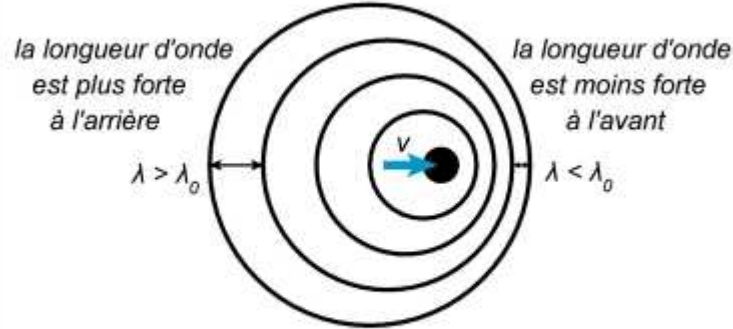
Décalage Doppler

cas n°1 : $v = 0$



les ondes se propagent par cercles concentriques autour de la source
 λ_0 est identique en tout point

cas n°2 : $0 < v < c$

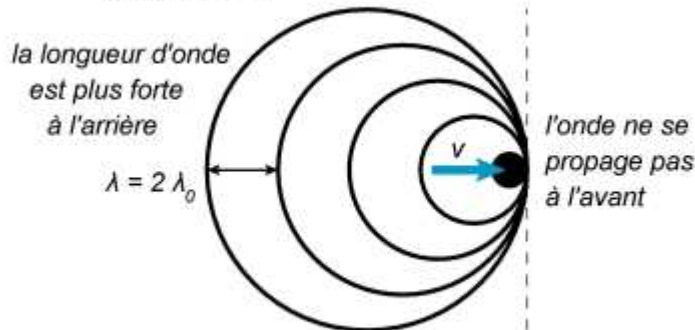


la longueur d'onde est plus forte à l'arrière
 $\lambda > \lambda_0$

la longueur d'onde est moins forte à l'avant
 $\lambda < \lambda_0$

la source se déplace

cas n°3 : $v = c$

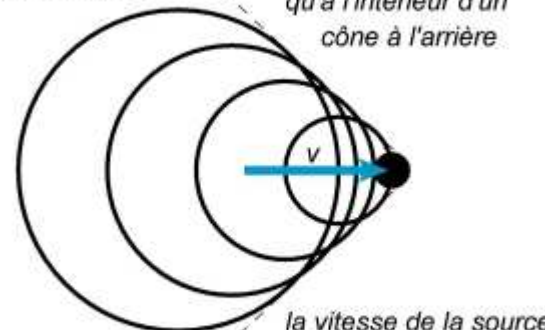


la longueur d'onde est plus forte à l'arrière
 $\lambda = 2\lambda_0$

l'onde ne se propage pas à l'avant

la vitesse de la source et la célérité de l'onde sont égales

cas n°4 : $v > c$



les ondes ne se propagent qu'à l'intérieur d'un cône à l'arrière

la vitesse de la source est plus forte que la célérité de l'onde

https://www.google.fr/search?q=effet+doppler+formule&sxsrf=ALiCzsZ9NvG6rBVLtLMseDC_NXg-Jh5WqA:1656657034139&tbm=isch&source=iu&ictx=1&vet=1&fir=gWVf-qEHIxNdiM%252CdNYId37e_Lf_yM%252C_&usg=AI4_-kSRwJ2iYgquWyaJMuUVmyXX66LxWg&sa=X&ved=2ahUKEwjf96KwiNf4AhVIyYUKHRbEBooQ9QF6BAgKEAE&biw=1366&bih=596&dpr=1#imgrc=m8l587vJNT9tzM&imgdii=9V9wpzcPnN0vKM

Jh5WqA:1656657034139&tbm=isch&source=iu&ictx=1&vet=1&fir=gWVf-

qEHIxNdiM%252CdNYId37e_Lf_yM%252C_&usg=AI4_-

kSRwJ2iYgquWyaJMuUVmyXX66LxWg&sa=X&ved=2ahUKEwjf96KwiNf4AhVIyYUKHRbEBooQ9QF6BAgKEAE&biw=136

6&bih=596&dpr=1#imgrc=m8l587vJNT9tzM&imgdii=9V9wpzcPnN0vKM

Décalage Doppler

POSITION DU PROBLÈME

Référentiel choisi : celui où le détecteur est immobile.

$$\text{Vitesse de la source} = \begin{pmatrix} V \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

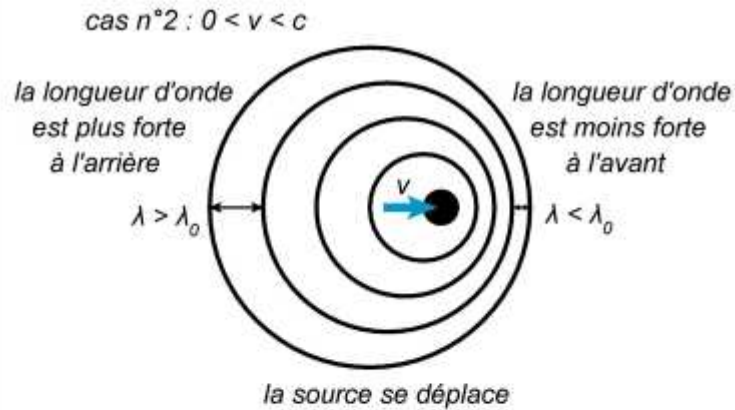
$$\text{Période} = T_S$$

$$\text{Longueur d'onde} = \lambda_R$$

Référentiel choisi : celui où la source est immobile.

$$\text{Période} = T_S$$

$$\text{Longueur d'onde} = \lambda_S$$



SOLUTION DU PROBLÈME

$$\lambda_R = V T_S - \lambda_S$$

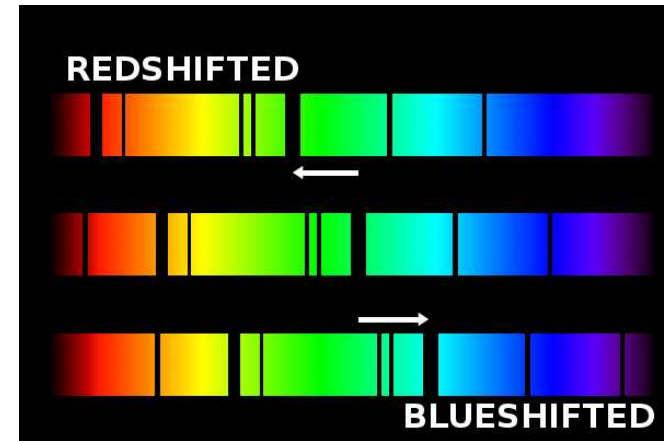
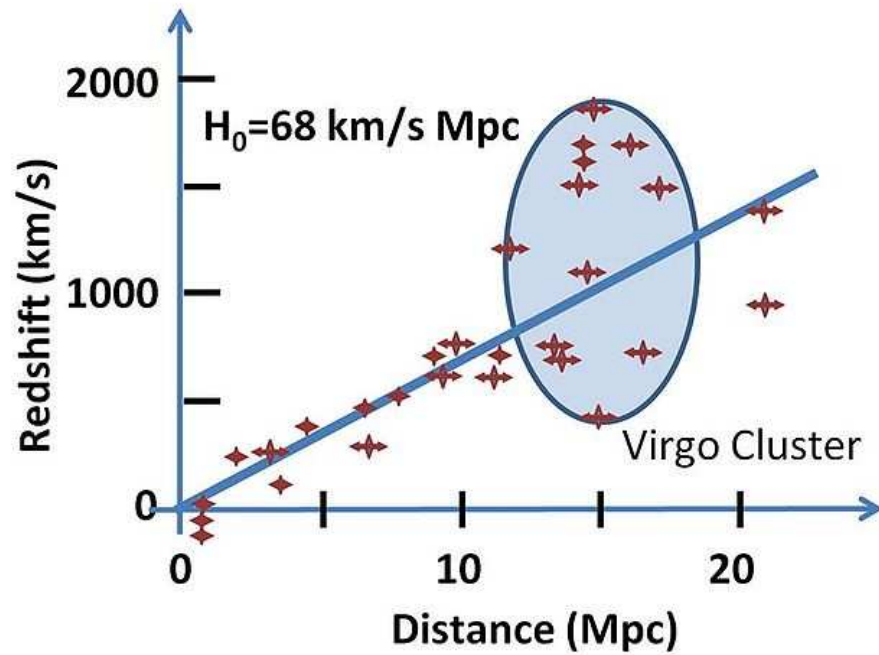
devant et

$$\lambda_R = V T_S + \lambda_S$$

derrière.

Décalage Doppler

LOI DE HUBBLE



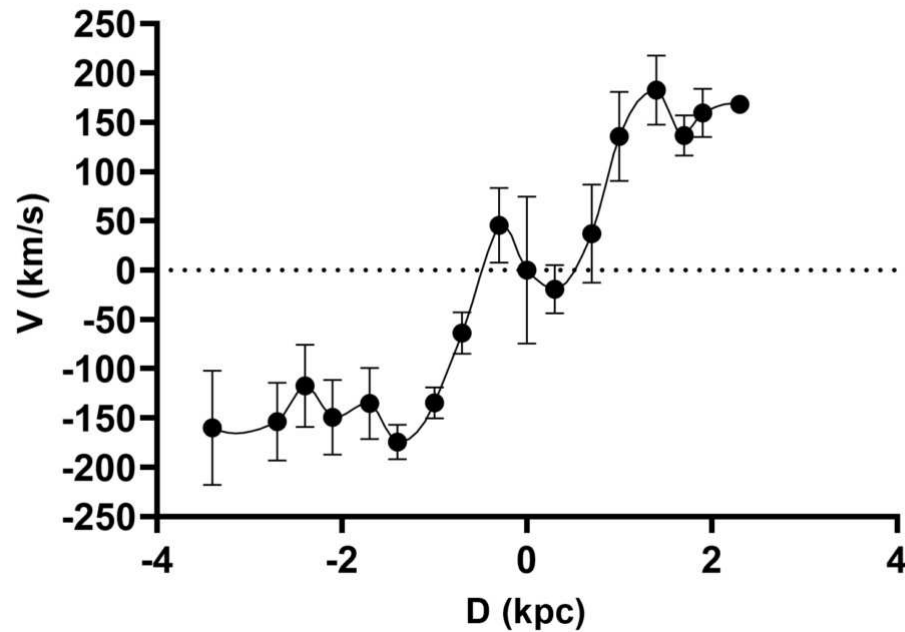
<https://earthsky.org/astronomy-essentials/what-is-a-redshift/>

Découverte de l'expansion de l'univers (Hubble, 1929)

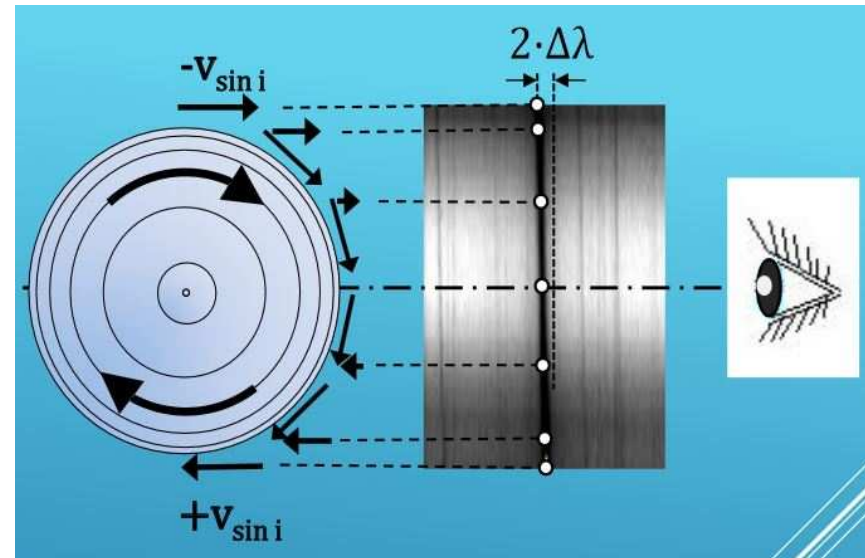
Décalage Doppler

ROTATION DES GALAXIES

Courbe de rotation de M77



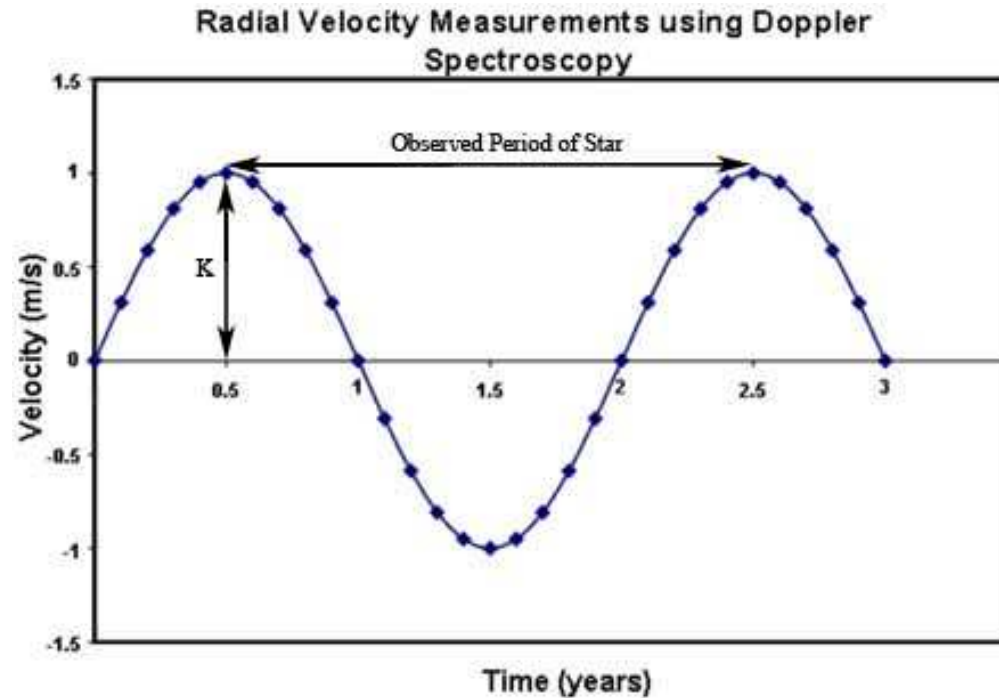
[https://www.spectro-
aras.com/forum/viewtopic.php?f=6&t=26](https://www.spectro-
aras.com/forum/viewtopic.php?f=6&t=26)
18



<https://www.webastro.net/forums/topic/153178-rotation-dune-galaxie-m66-au-pic-du-midi/>

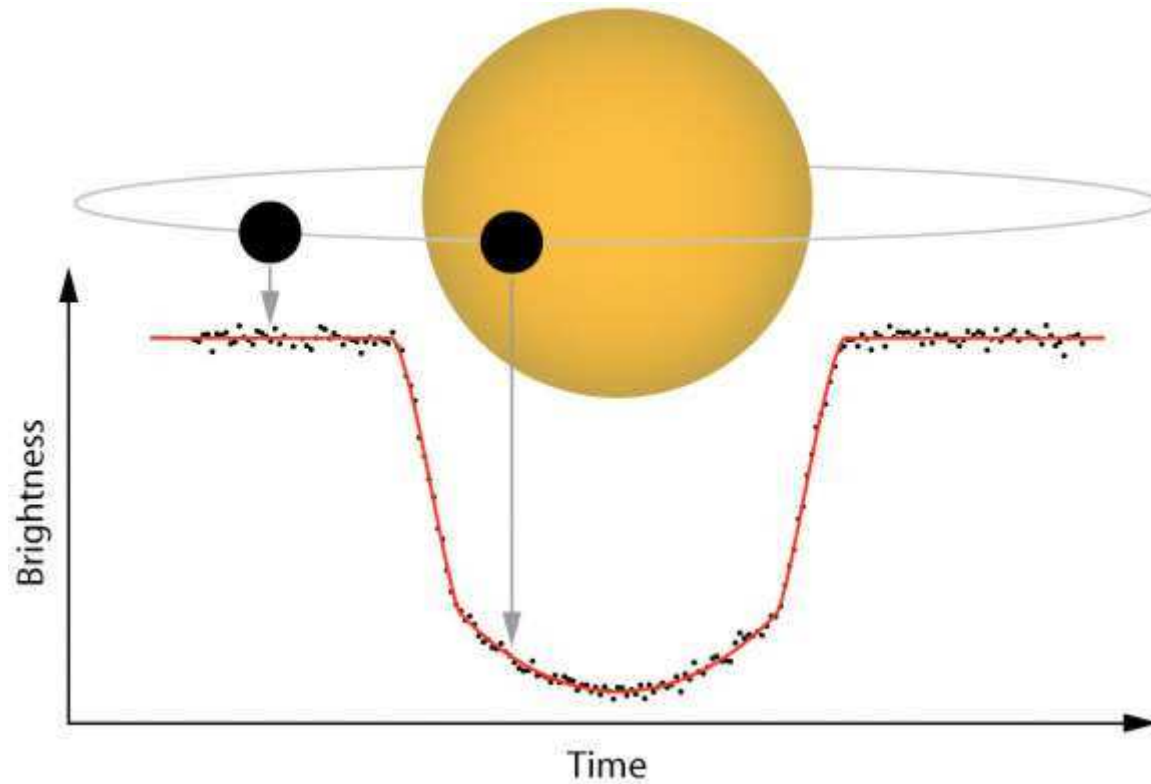
Décalage Doppler

IDENTIFIER UNE EXOPLANÈTE



La première exoplanète découverte, orbitant autour d'une étoile semblable au Soleil, 51 Pegasi b, fut détectée en octobre 1995 en utilisant la spectroscopie Doppler à l'Observatoire de Haute Provence (OHP) par les Suisses Michel Mayor et Didier Queloz (prix Nobel de physique 2019).

Transit



https://www.futura-sciences.com/sciences/actualites/exoplanetes-exoplanetes-deux-nouvelles-superterres-decouvertes-proximite-terre-17099172/?utm_source=nl_alerte&nl_optin=optin_alerte&utm_content=20220628&utm_campaign=general&utm_medium=email&xor=EPR-57-ALERTE-20220628&uid=%099c0e2fa8ae772a5f91f5ddf5c859611b