



ENPC-GCC Ambiances lumineuses

Module 1

Céline Villa

IFSTTAR - LEPSIS



Au sommaire du cours

- I. Notions fondamentales
- II. Eclairage naturel
- III. Eclairage artificiel (Module 2)

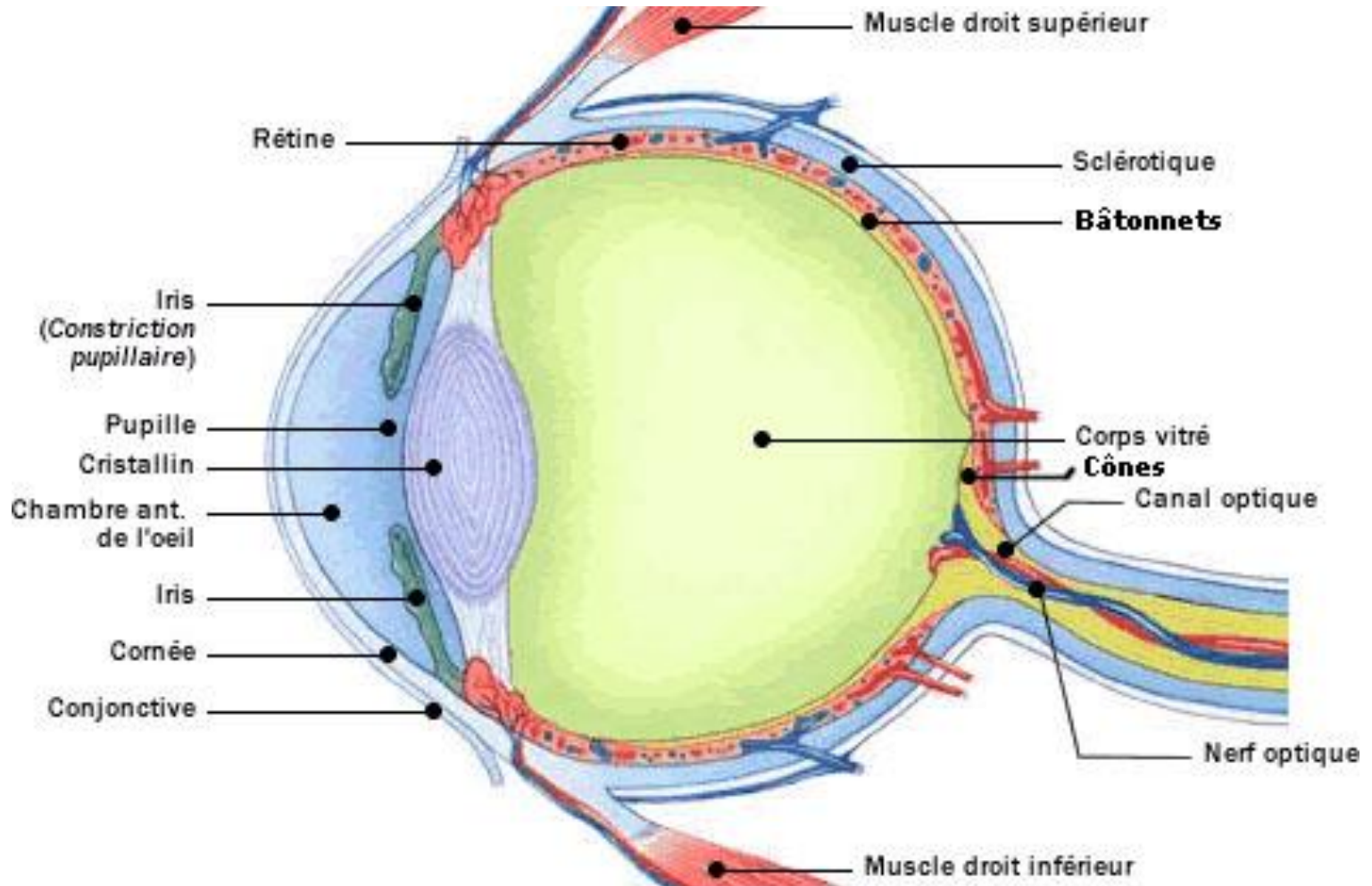
I. Notions fondamentales

1. Fonctionnement optique de l'œil
2. Grandeurs lumineuses
3. Calculs d'éclairements
4. Performance visuelle
5. La démarche projet

I.1 Fonctionnement optique de l'œil

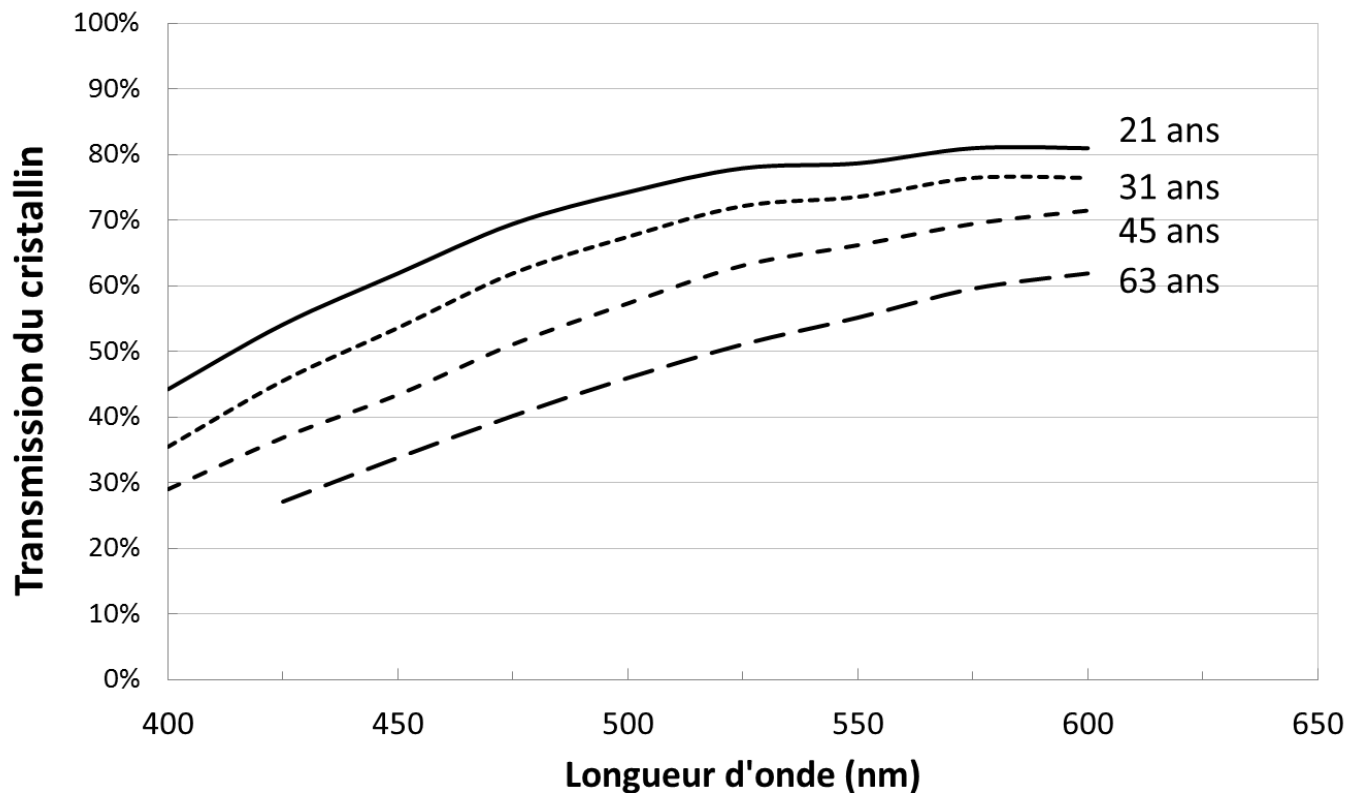


Fonctionnement optique de l'œil



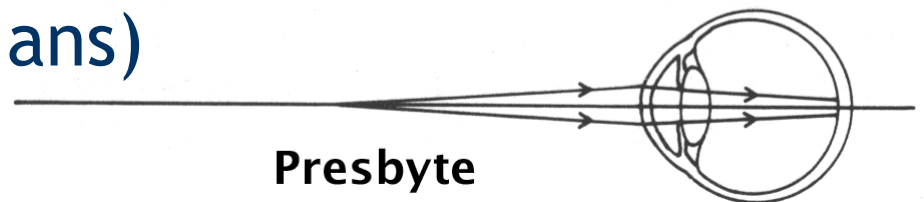
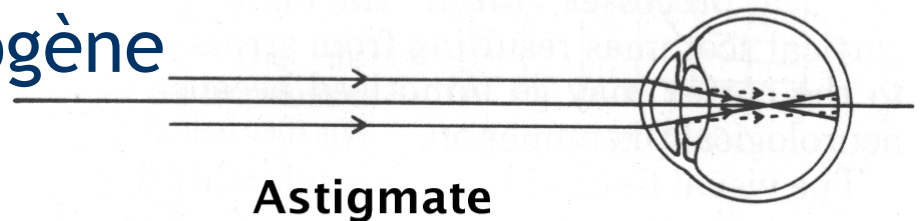
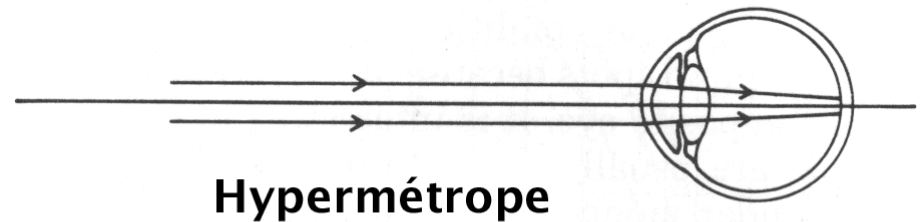
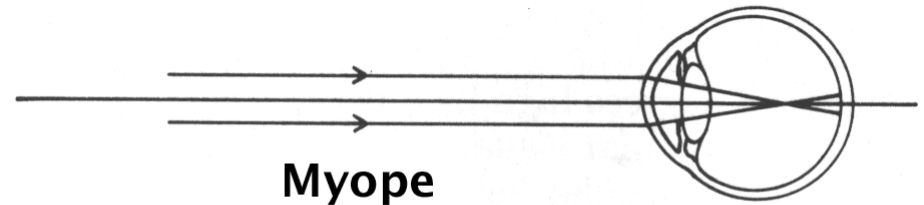
Transmission spectrale du cristallin

- Le cristallin transmet moins dans les bleus
- Le cristallin s'opacifie avec l'âge



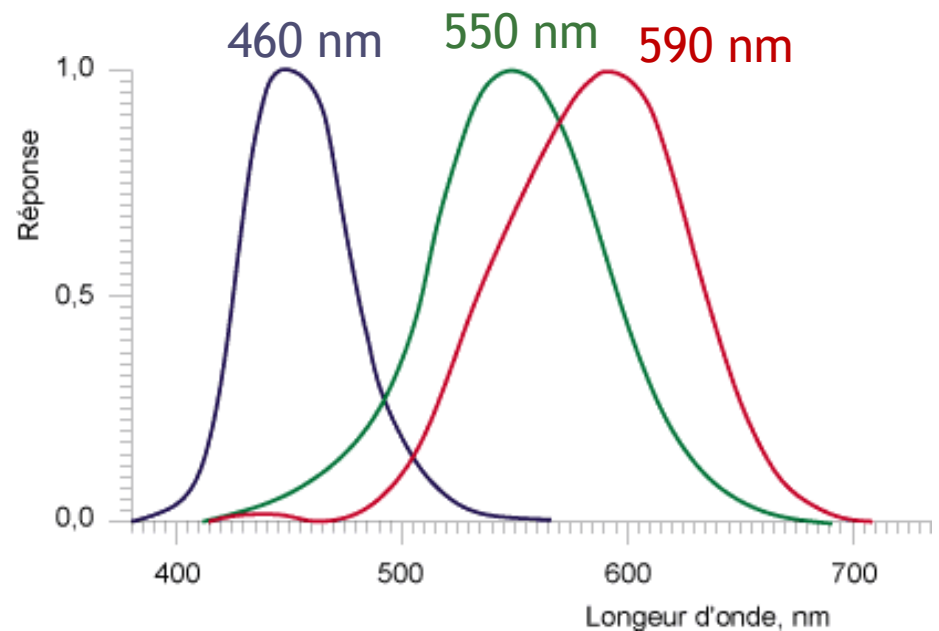
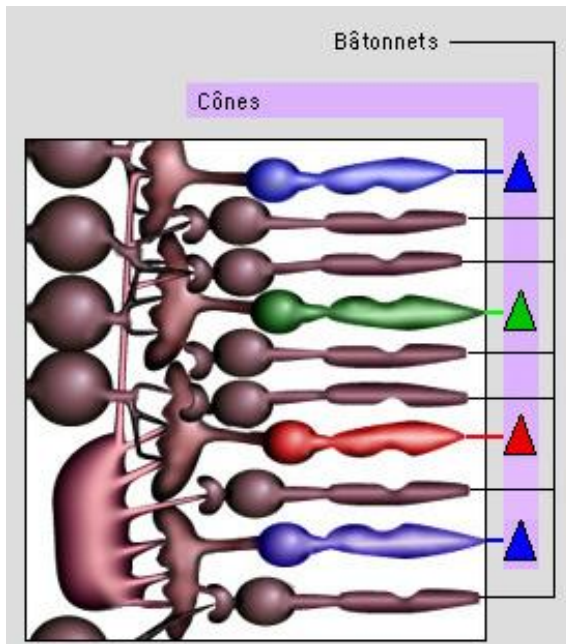
Problèmes de vue liés au cristallin

- Vue de loin
- Vue de près
- Courbure non homogène
- Vieillessement (>40 ans)



Les photo-récepteurs de la rétine

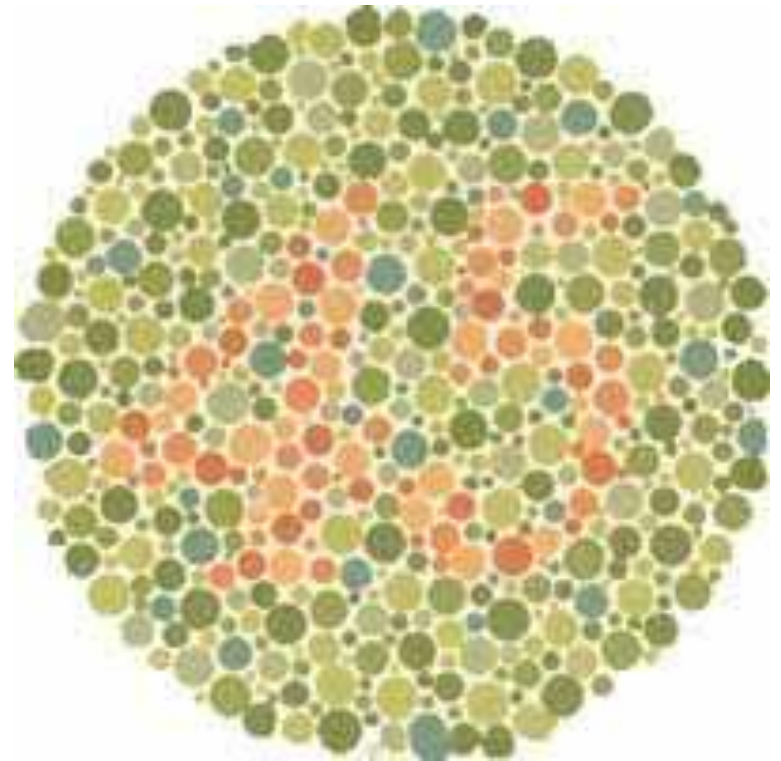
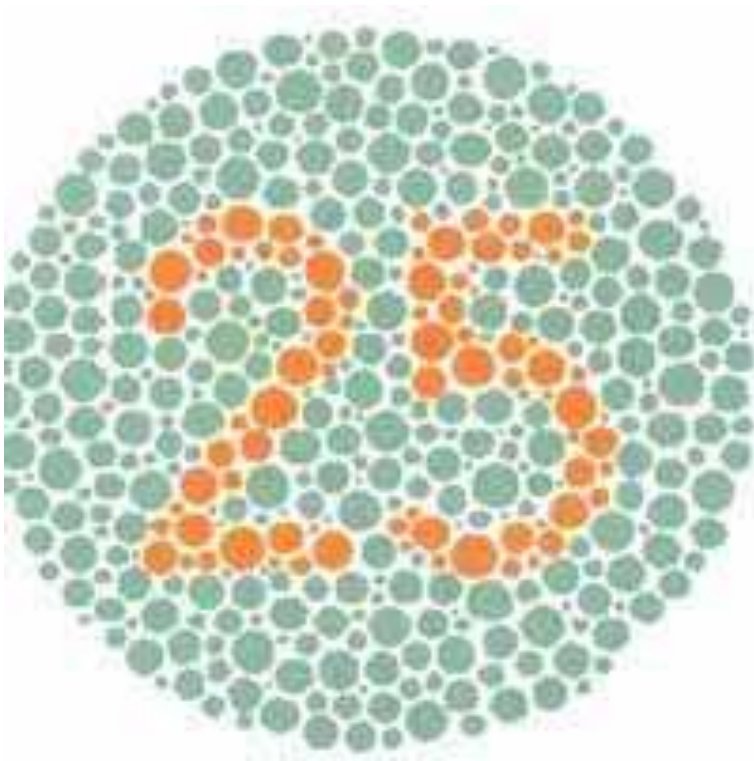
- Les bâtonnets (130M par œil) ne permettent pas de distinguer les couleurs. Répartis sur toute la rétine.
- Les cônes (6.5M par œil) sont équipés de filtres rouges, verts ou bleus. Regroupés à proximité de l'axe optique de l'œil.



Courbe spectrale des cônes

Problèmes de vue liés à la couleur

- Tests de Hishihara



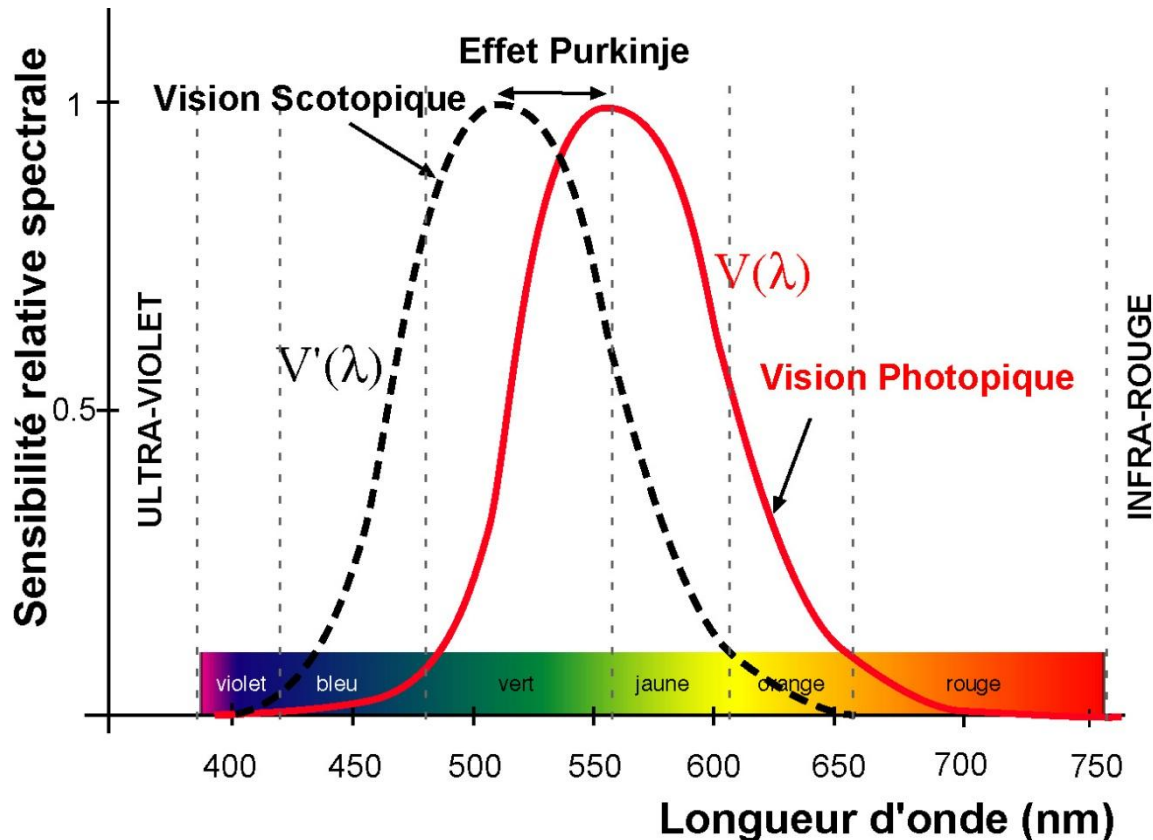
Problèmes de vue liés à la couleur

- Test de Farnsworth

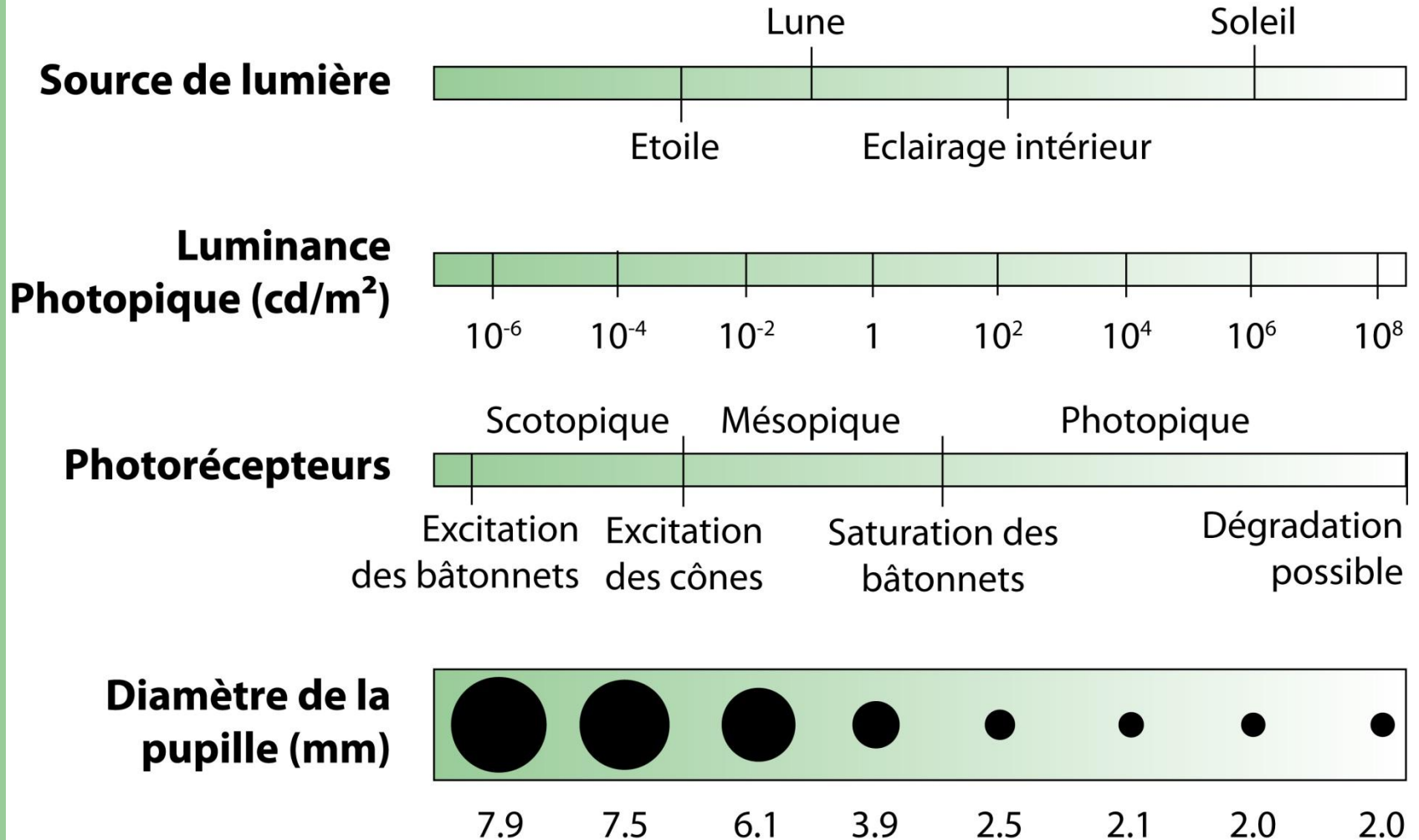


Sensibilité relative spectrale de l'œil

- $V(\lambda)$ normalisée par la CIE en 1931
- Domaine visible: 380 nm à 760 nm

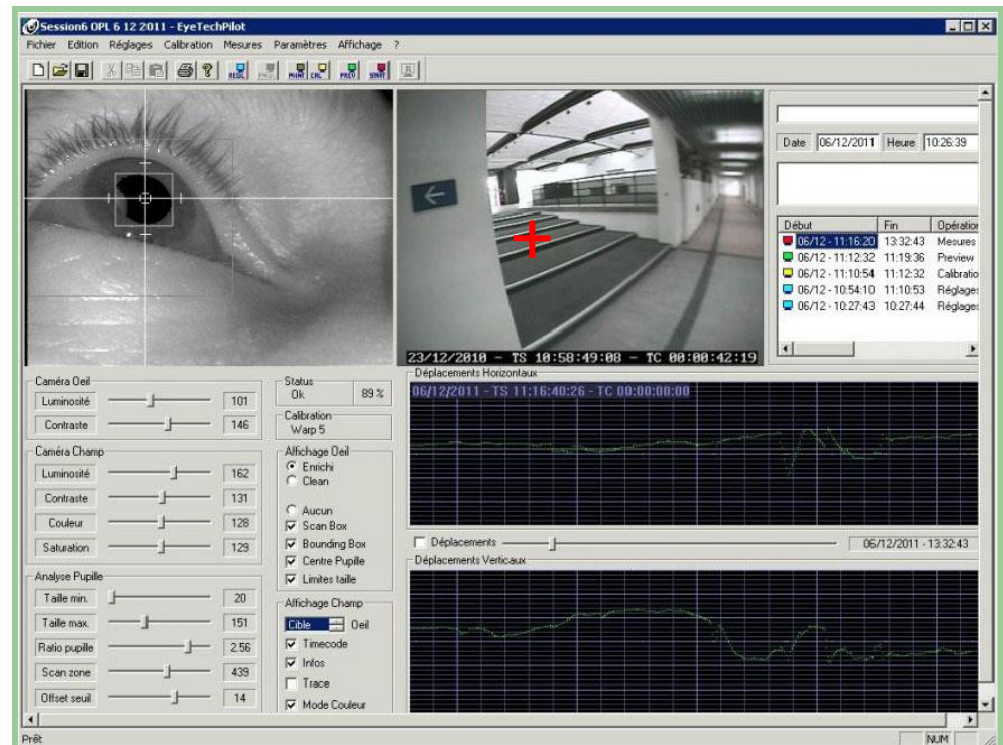


Fonctionnement du système visuel



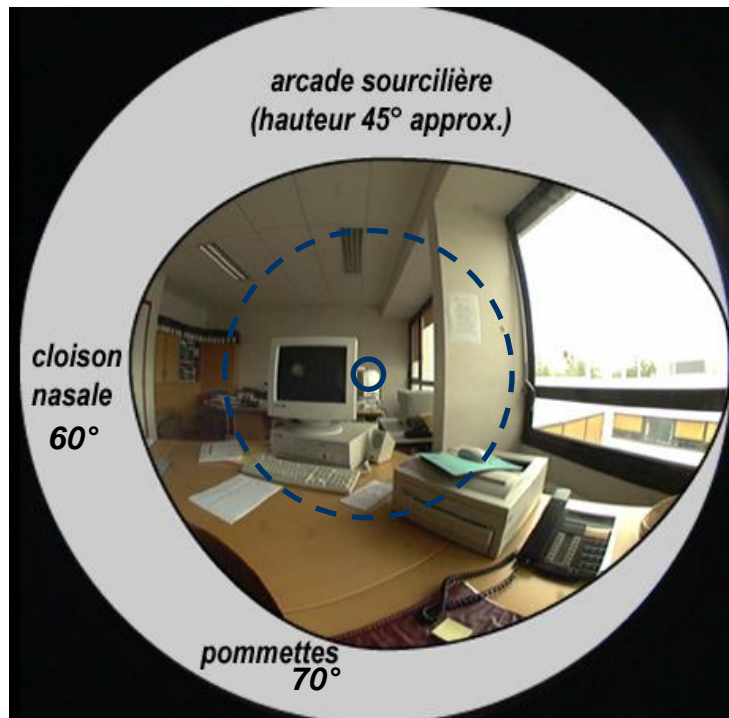
Mesure diamètre pupillaire & regard

- Système « eyetracker »

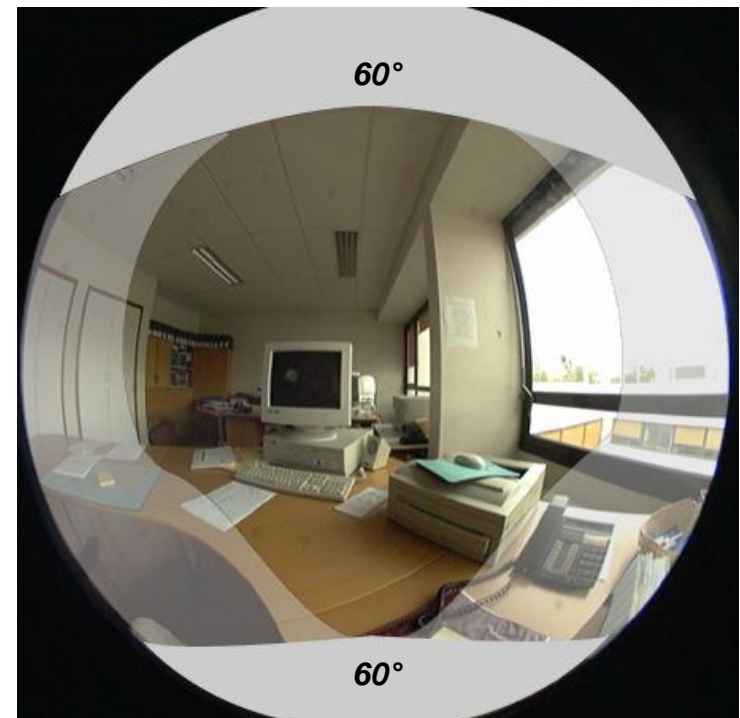


Champ visuel de l'homme

- Champ de perception distincte (0.5°), central (30°) et périphérique.

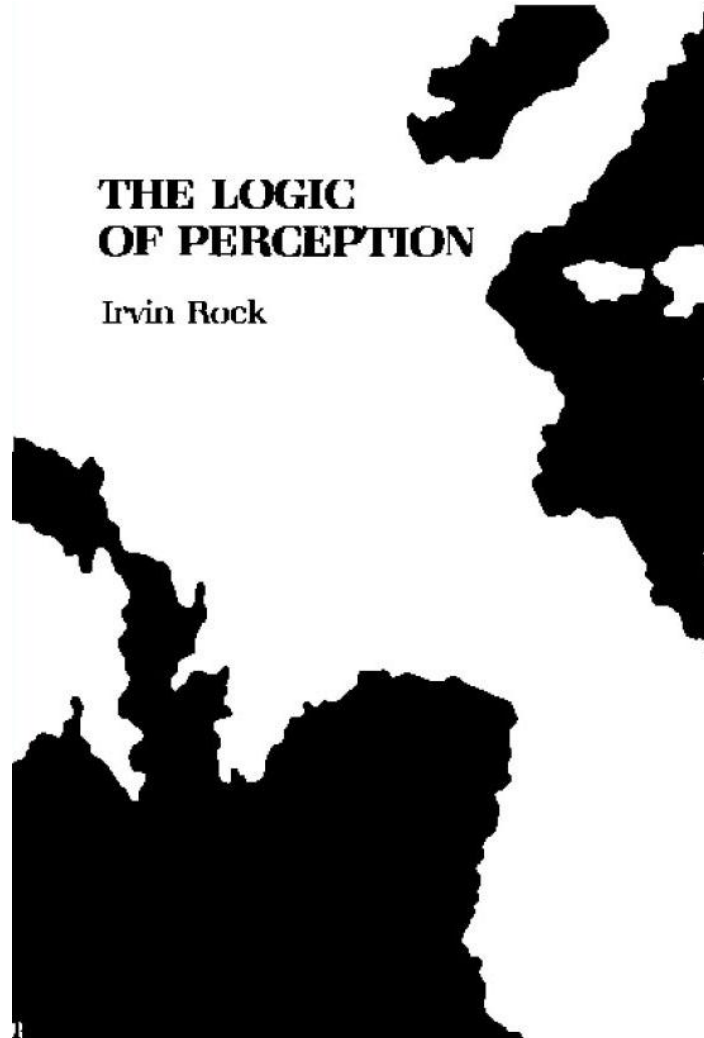


1 œil



2 yeux

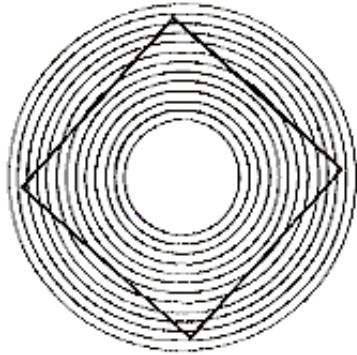
Le cerveau interprète l'image



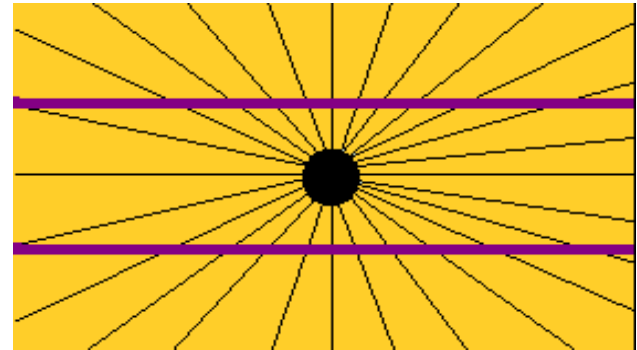
Le cerveau interprète l'image



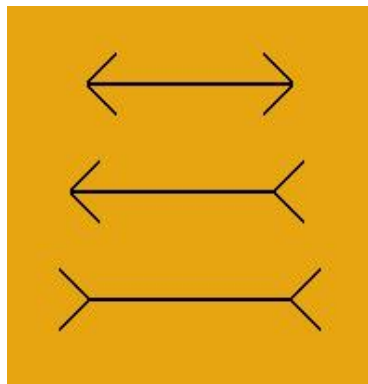
Le cerveau interprète l'image



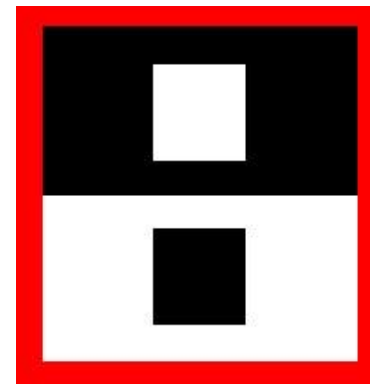
La forme est-elle un carré ?



Les droites sont-elles parallèles ?

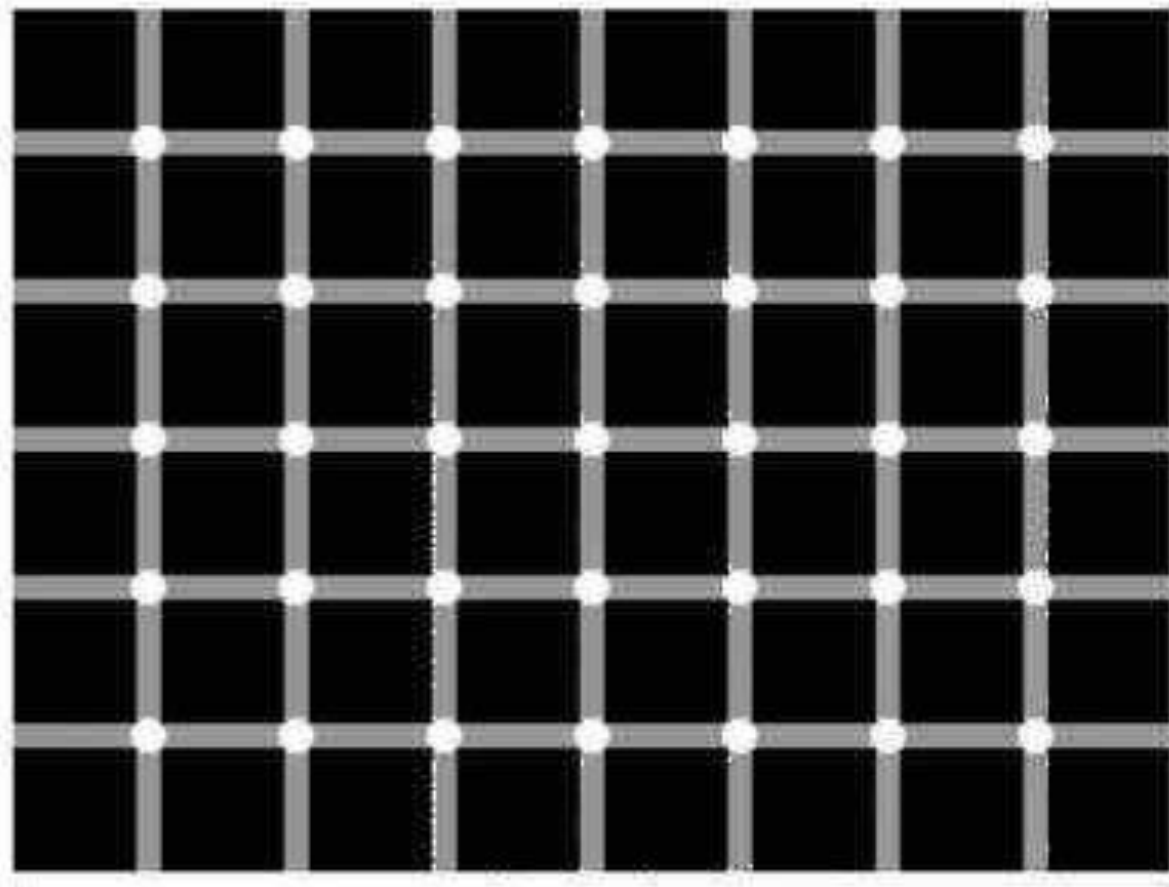


Les droites sont-elles de même longueur ?



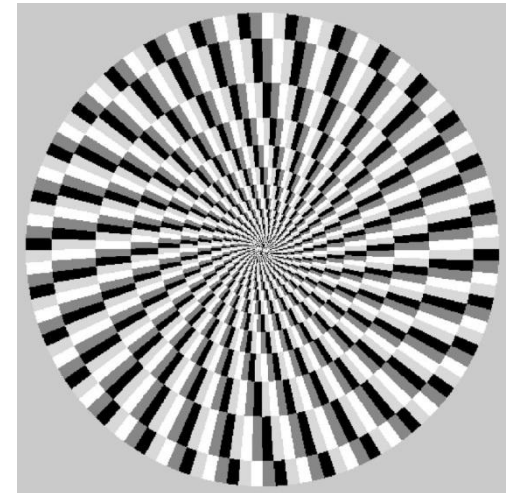
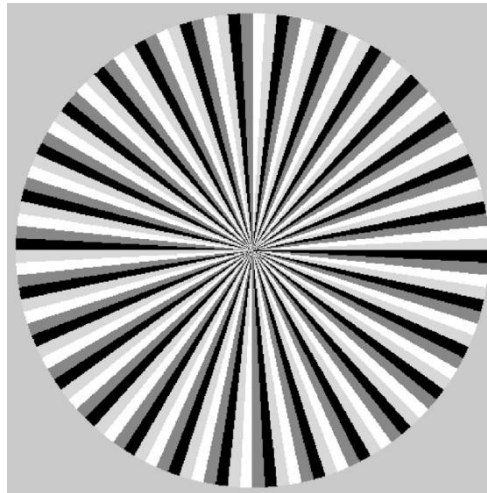
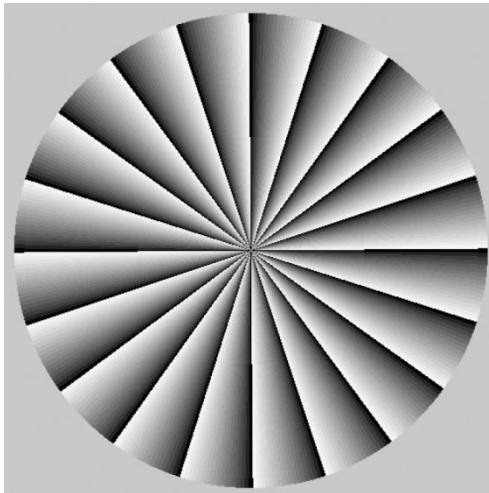
Les carrés sont-ils de même taille ?

L'œil se promène sur l'image

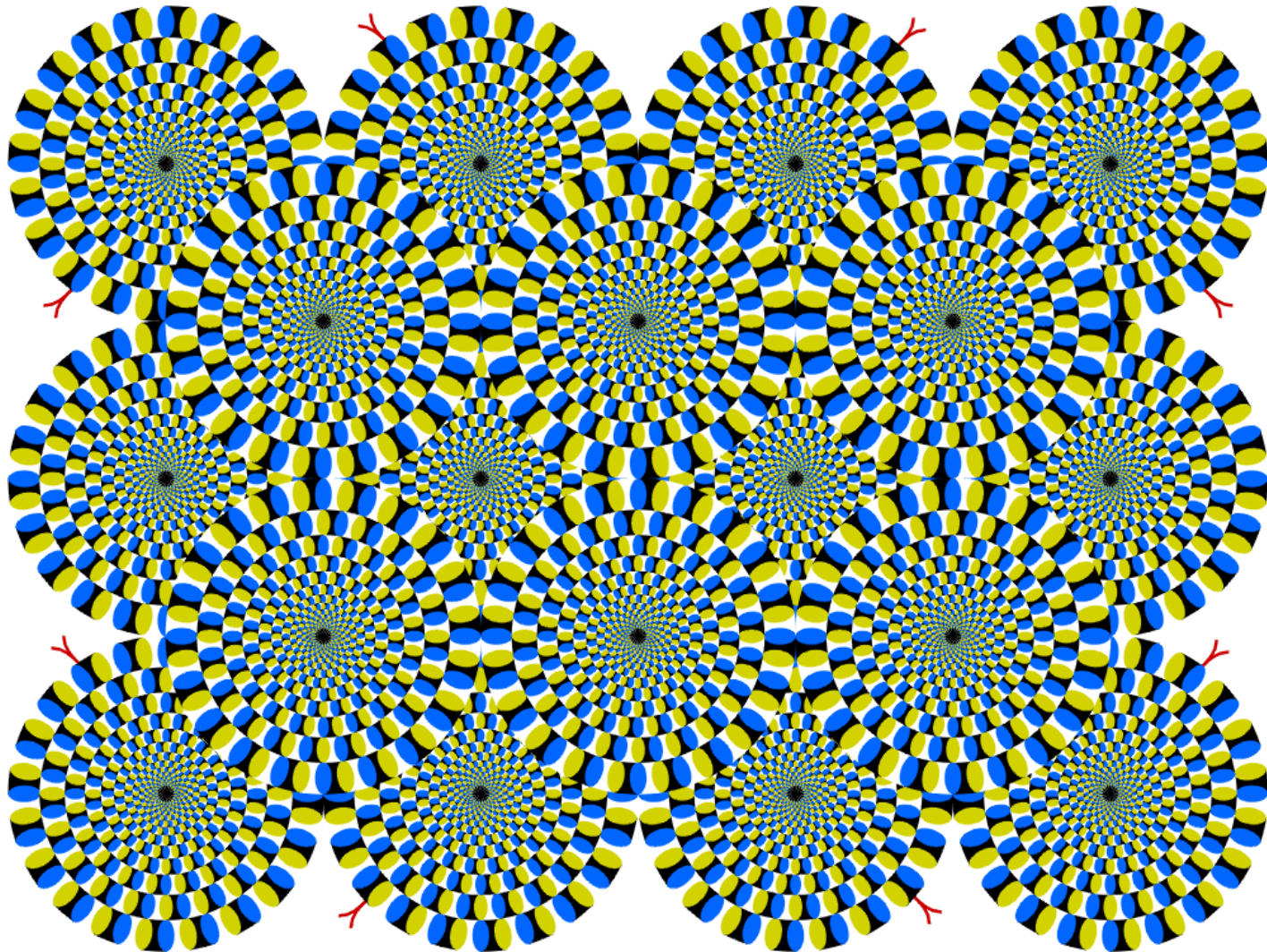


Illusion de mouvement en périphérie

- Variations de luminances par paliers
- Lignes fragmentées



Illusion de mouvement « Kitaoka » »



I.2 Grandeurs lumineuses

- Flux lumineux (lumen, lm)

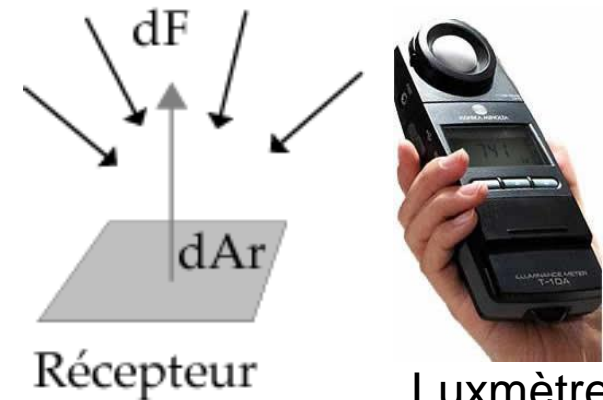
$$F = \int_{\text{visible}} K_m \cdot V(\lambda) \cdot \Phi_\lambda \text{ avec } K_m = 683 \text{ lm/w}$$

- Efficacité lumineuse (lm/W)

$$\eta = \frac{F}{\Phi}$$

- Eclairement lumineux (lux, lx)

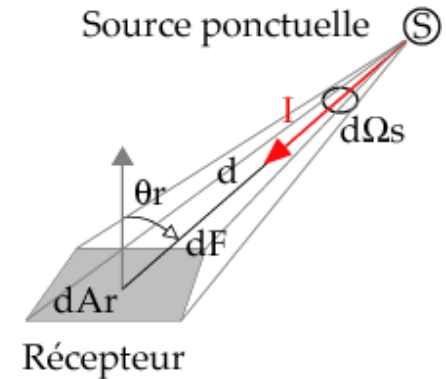
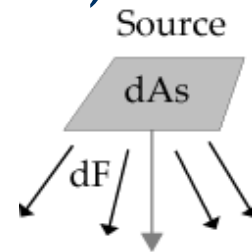
$$E = \frac{dF}{dA_r}$$



Grandeurs lumineuses

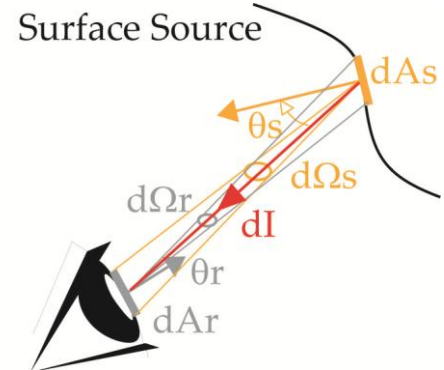
- Exitance lumineuse (lm/m^2)

$$M = \frac{dF}{dA_s}$$



- Intensité en candela (cd)

$$I = \frac{dF}{d\Omega_s} \text{ avec } d\Omega_s = \frac{dA_r \cos(\theta_r)}{d^2}$$



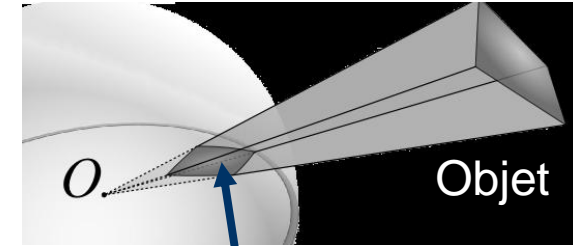
- Luminance en candela/ m^2 (cd/m^2)

$$L = \frac{dI}{dA_s \cos(\theta_s)} = \frac{d^2 F}{dA_s \cos(\theta_s) d\Omega_s} = \frac{d^2 F}{d\Omega_r dA_r \cos(\theta_r)}$$

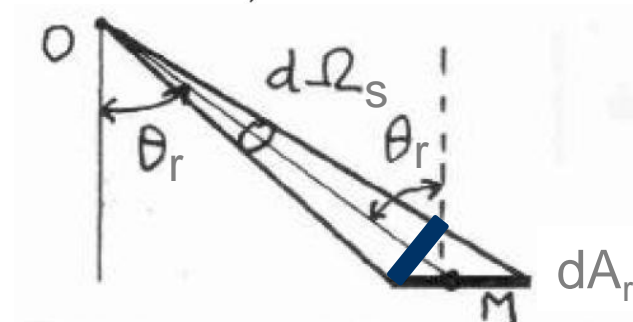
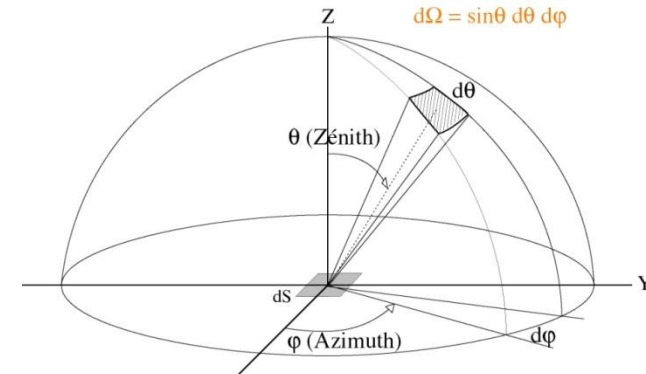
L'angle solide

- Définit une zone de l'espace
- Surface découpée sur une sphère de rayon 1 par le cône s'appuyant sur le contour de la surface définissant la zone
- Unité: le stéradian
- Varie de 0 à 4π (point) ou 2π (surface)

$$d\Omega_s = \frac{dA_r \cos(\theta_r)}{d^2}$$



Projection de surface S



Cas particuliers

- Source isotrope: intensité constante

$$dF = I d\Omega \Rightarrow F = \int I d\Omega = 4\pi I$$

- Source orthotrope: luminance constante

- Elle obéit à la loi de Lambert

$$M = \pi L = cte$$

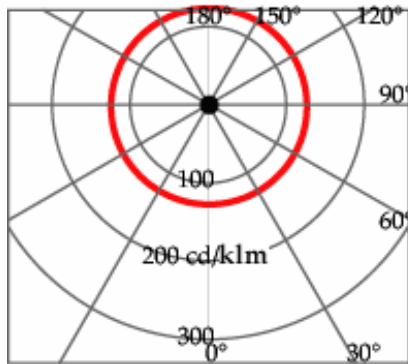
- Surface parfaitement diffusante (sans reflet)

- Détermination du facteur de réflexion

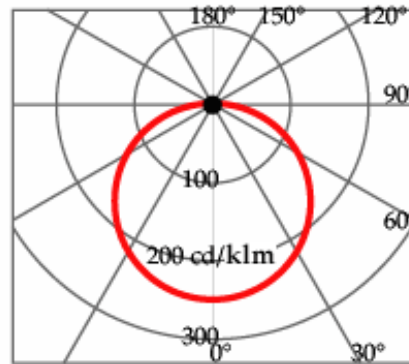
$$M = \pi L = \rho E \Rightarrow \rho = \frac{\pi L}{E}$$

Indicatrices des intensités

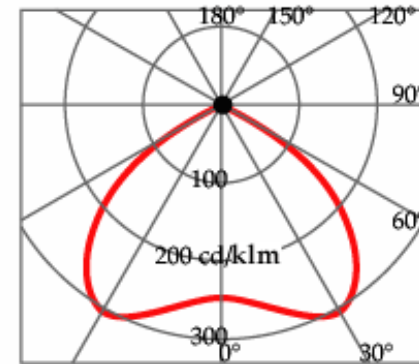
- Représentation graphique des valeurs de l'intensité dans un plan de l'espace



Source isotrope

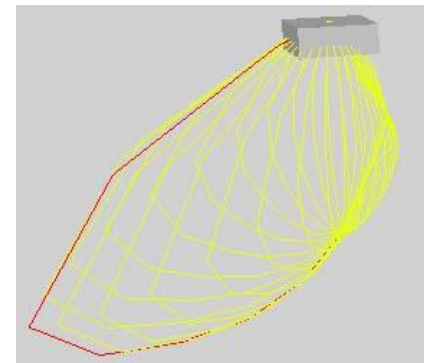


Source orthotrope



Luminaire bureau

- Caractérise la répartition spatiale du flux des luminaires



1.3 Eclairage source ponctuelle

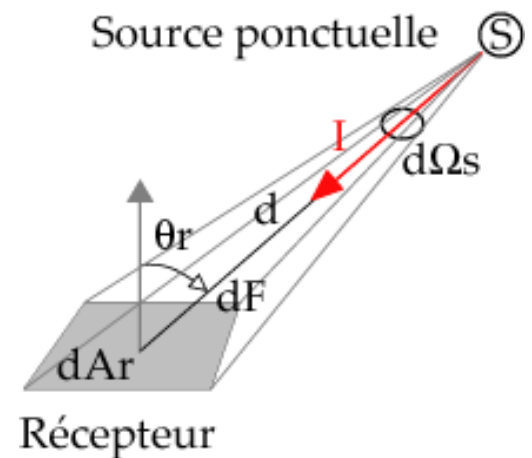
- Récepteur situé à une distance supérieure à 5 fois la plus grande dimension de la source

$$E = \frac{dF}{dA_r} = \frac{dF}{d\Omega_s} \frac{d\Omega_s}{dA_r} = I \frac{dA_r \cos(\theta_r)}{d^2 dA_r}$$

d distance source - surface

- Loi du cosinus

$$E = \frac{I \cos(\theta_r)}{d^2} \text{ (lx)}$$

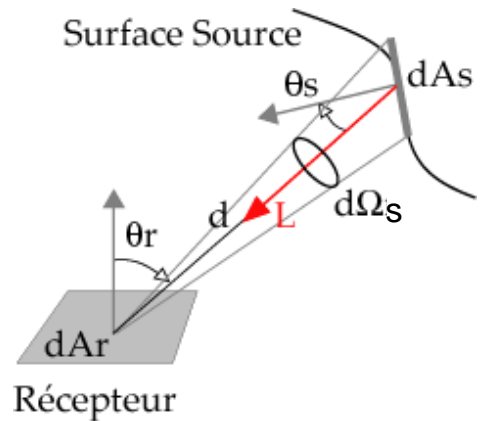


Eclairement source de grande dimension

- Source de luminance variable sur sa surface

$$dE = \frac{d^2F}{dA_r} = \frac{L dA_s \cos(\theta_s) \cancel{dA_r} \cos(\theta_r)}{\cancel{dA_r} d^2} = L \cos(\theta_r) d\Omega_s$$

$$E = \int_{\text{Source}} L \cos(\theta_r) d\Omega_s$$



- Source de luminance constante

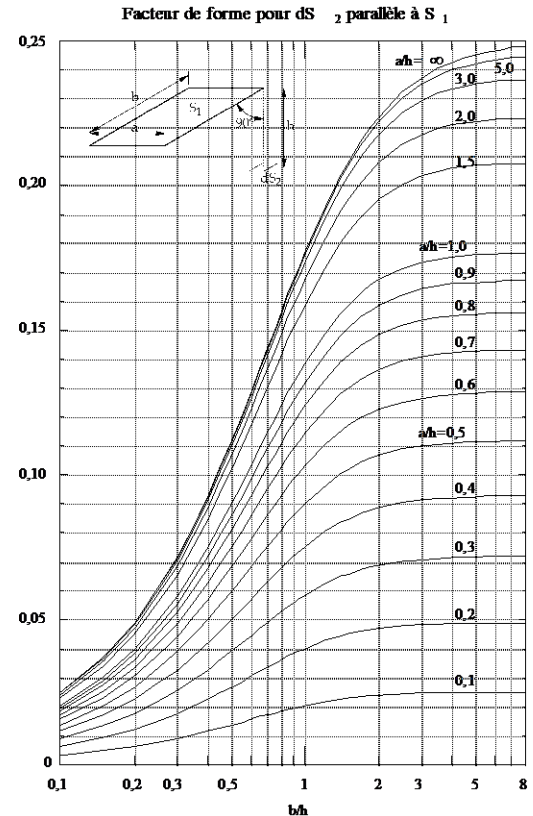
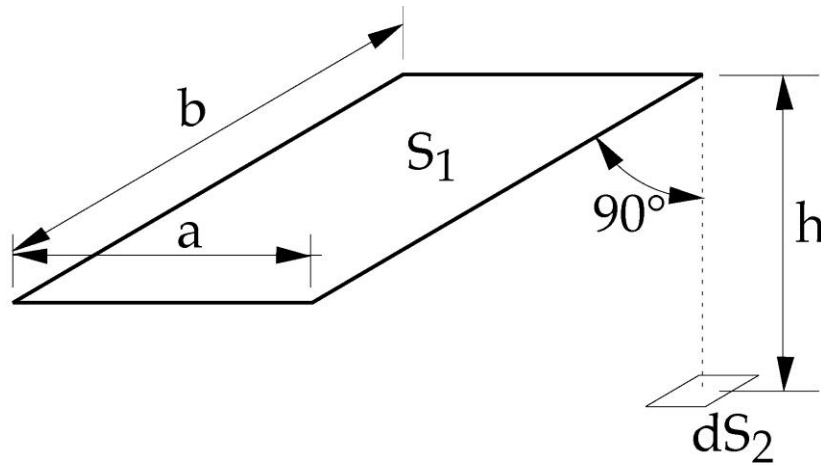
$$E = \frac{F_{s \rightarrow r}}{A_r} = \frac{F_{sr}}{A_r} F_s = \frac{F_{sr}}{A_r} F_s = \frac{F_{rs}}{A_s} F_s = F_{rs} M_s$$

$$E = \pi L_s F_{rs}$$

(Relation de réciprocité)

$$A_s * F_{sr} = A_r * F_{rs}$$

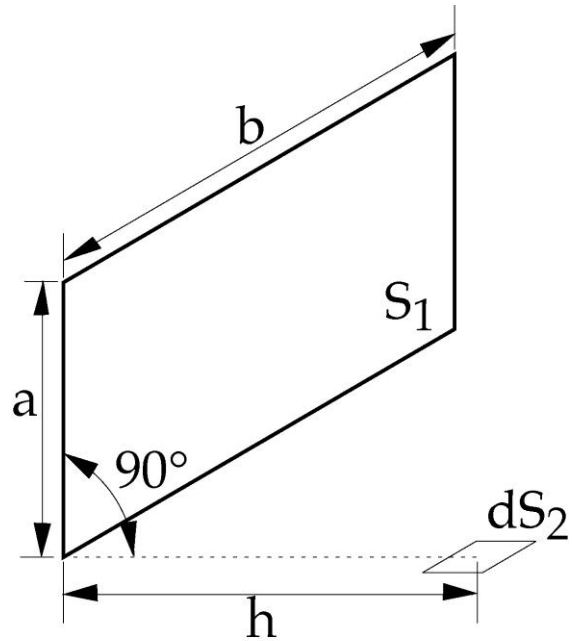
Facteur de forme pour $dS_2 \parallel$ à S_1



$$X = \frac{a}{h} \text{ et } Y = \frac{b}{h}$$

$$"F_{21}" = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{X}{\sqrt{1+X^2}} \arctan \frac{Y}{\sqrt{1+X^2}} + \frac{Y}{\sqrt{1+Y^2}} \arctan \frac{X}{\sqrt{1+Y^2}} \right)$$

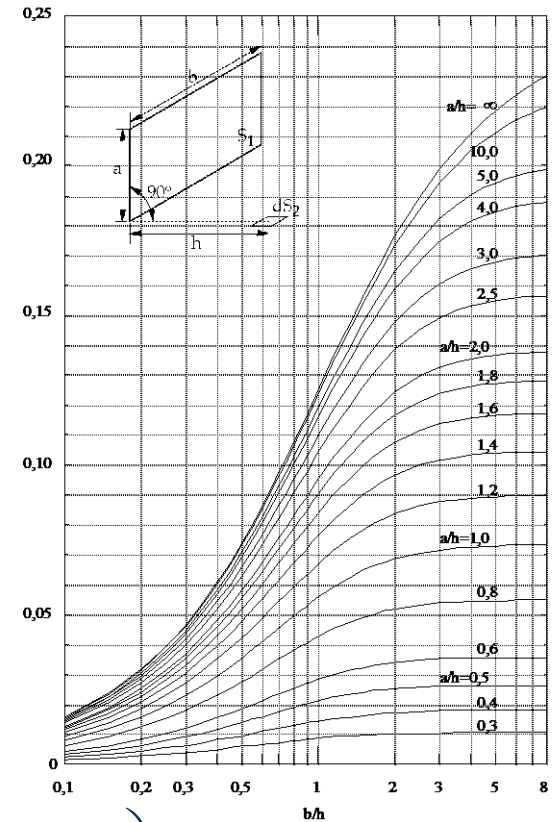
Facteur de forme pour $dS_2 \perp$ à S_1



$$X = \frac{a}{h} \text{ et } Y = \frac{b}{h}$$

$$"F_{21}" = \frac{1}{2\pi} \left(\arctan Y - \frac{1}{\sqrt{1+X^2}} \arctan \frac{Y}{\sqrt{1+X^2}} \right)$$

Facteur de forme pour dS_2 perpendiculaire à S_1

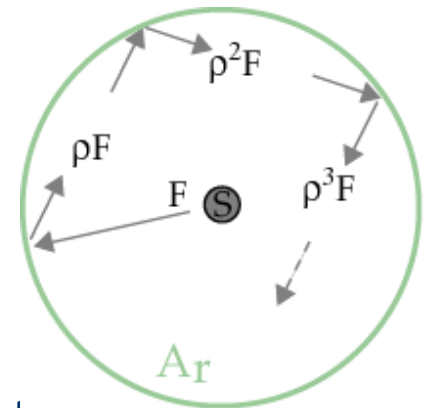


Eclairement dû aux réflexions multiples

- Flux réfléchi par les parois d'une cavité

$$F_{\rho} = \rho F + \rho^2 F + \rho^3 F + \dots$$

$$F_{\rho} = (1 + \rho + \rho^2 + \dots)\rho F = \frac{1}{1 - \rho} \rho F$$



- Eclairement résultant dit indirect

$$E_{\rho} = \frac{\rho}{1 - \rho} \frac{F}{A_r}$$

I.4 La performance visuelle

- Sensibilité au contraste
- Acuité visuelle
- Vitesse de lecture

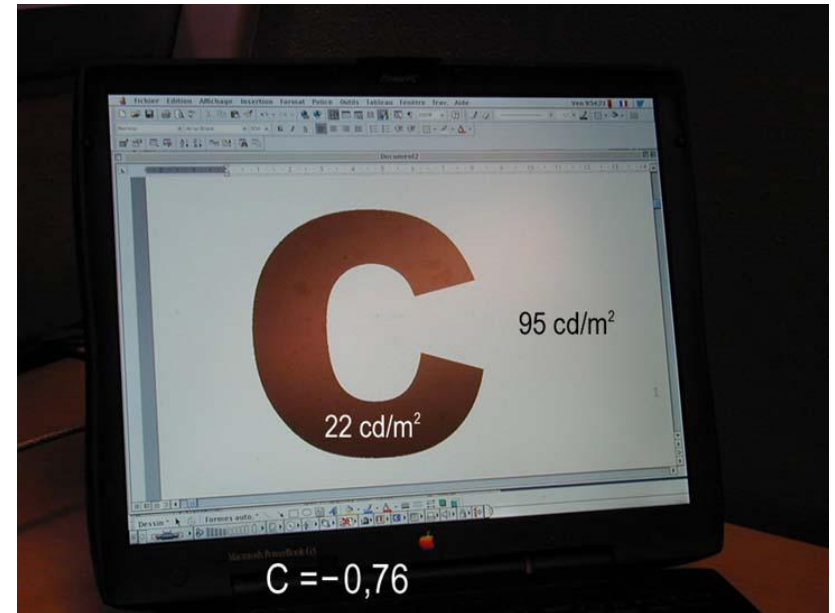
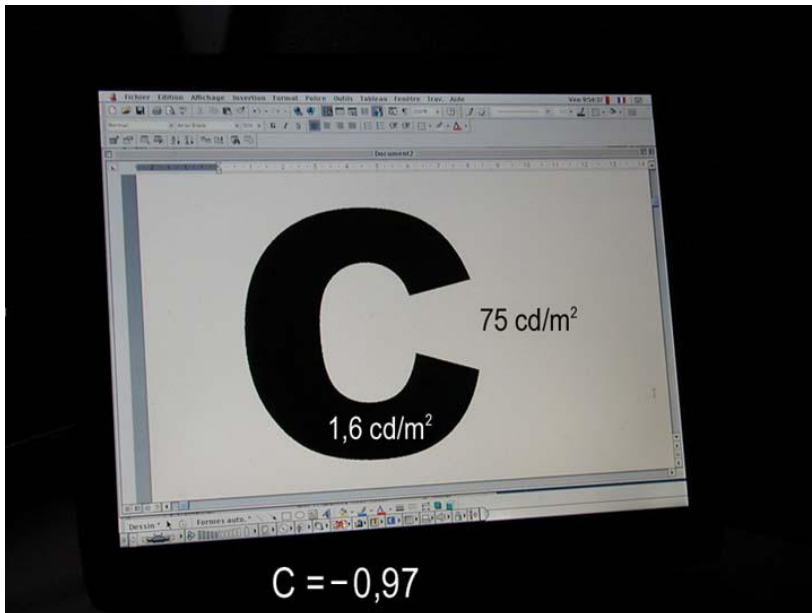
Sensibilité au contraste

Ce texte est observé dans des conditions de contraste maximal

Ce texte est observé dans des conditions de contraste réduit

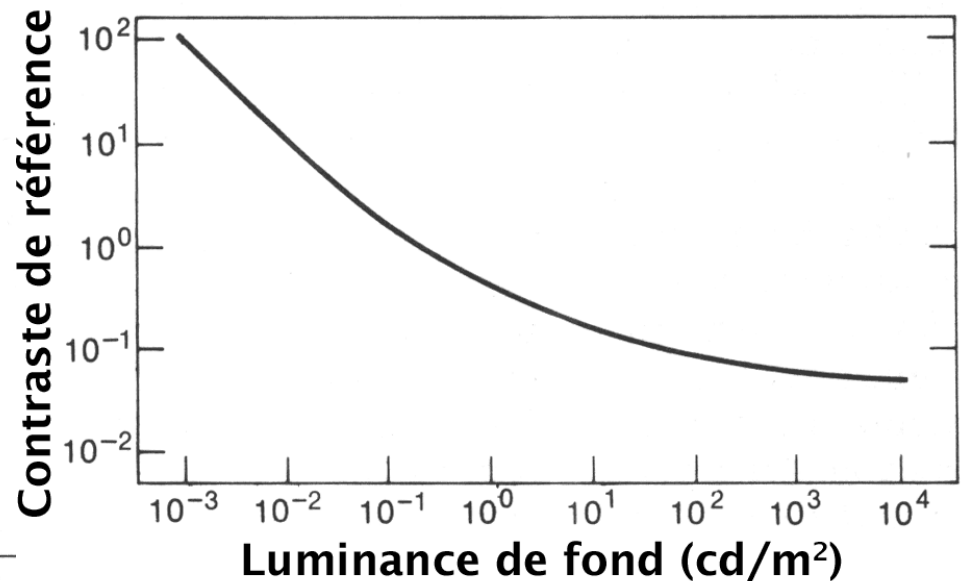
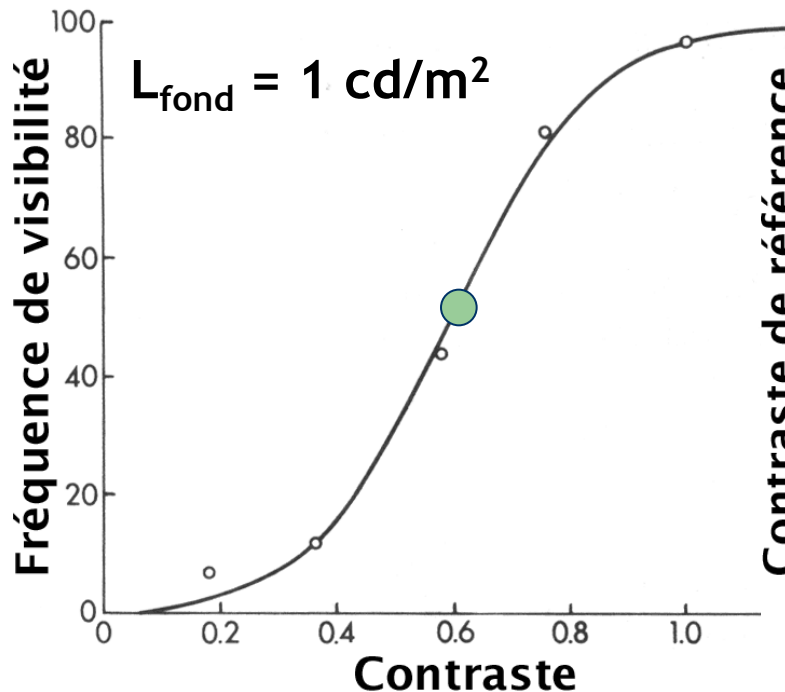
Calcul du contraste

$$C = \frac{L_{\text{objet}} - L_{\text{fond}}}{L_{\text{fond}}}$$



Valeurs du contraste nécessaires

- Varie avec l'observateur, contraste de référence : cible vue par 50% des gens
- Varie avec la luminance de fond



Acuité visuelle

- Capacité à discerner un détail critique
- Différents moyens de reconnaissance

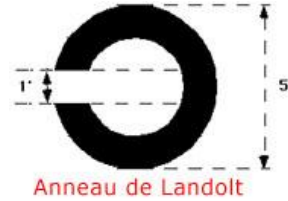
Lettres (1861)



E de Snellen

E de Raskin

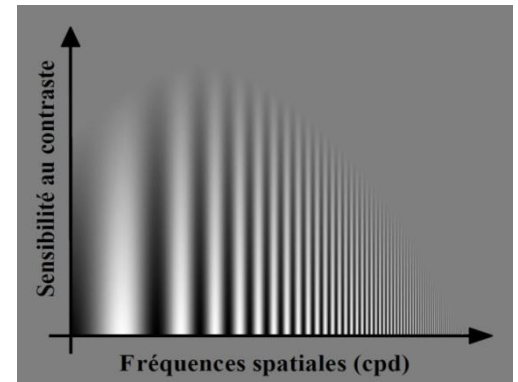
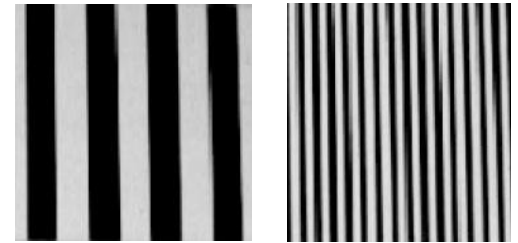
Anneaux (1888)



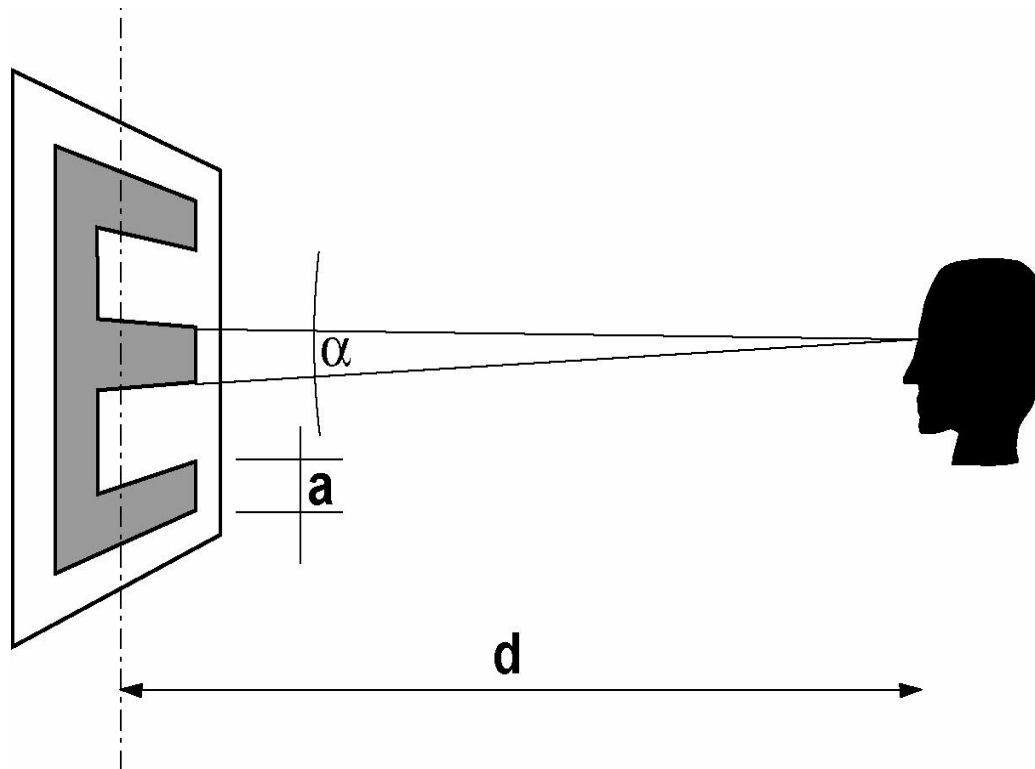
Anneau de Landolt



Réseaux (1952)



Calcul de l'acuité visuelle

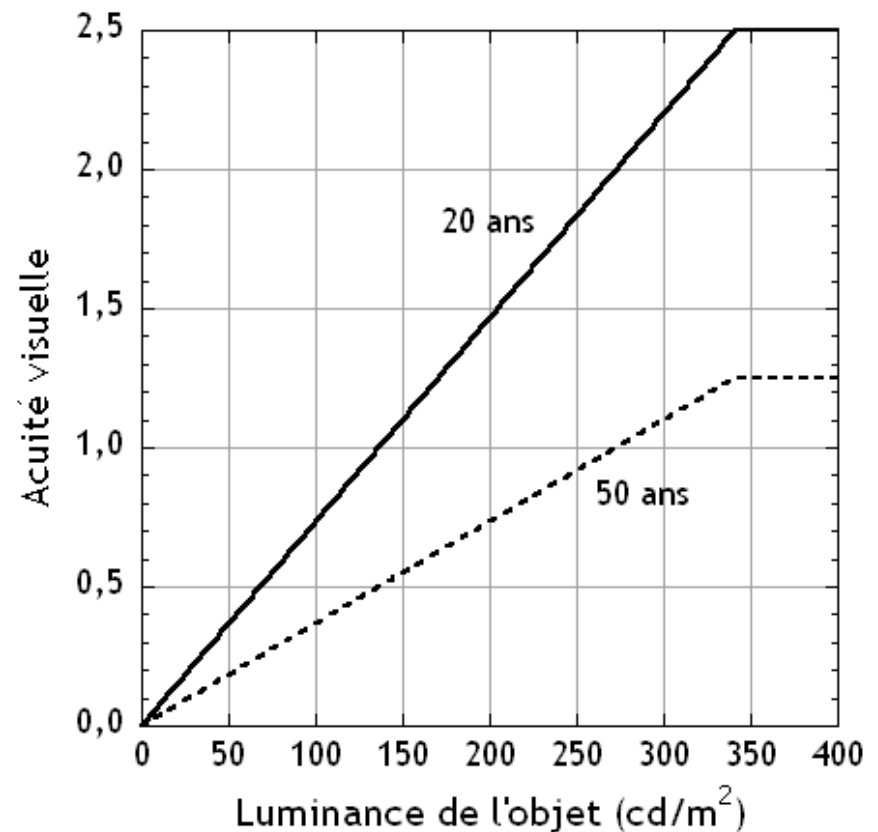


$$A = \frac{1}{\alpha} \text{ avec } \alpha = \frac{a}{d} \times \frac{180 \cdot 60}{\pi} \text{ (minutes d'arc)}$$

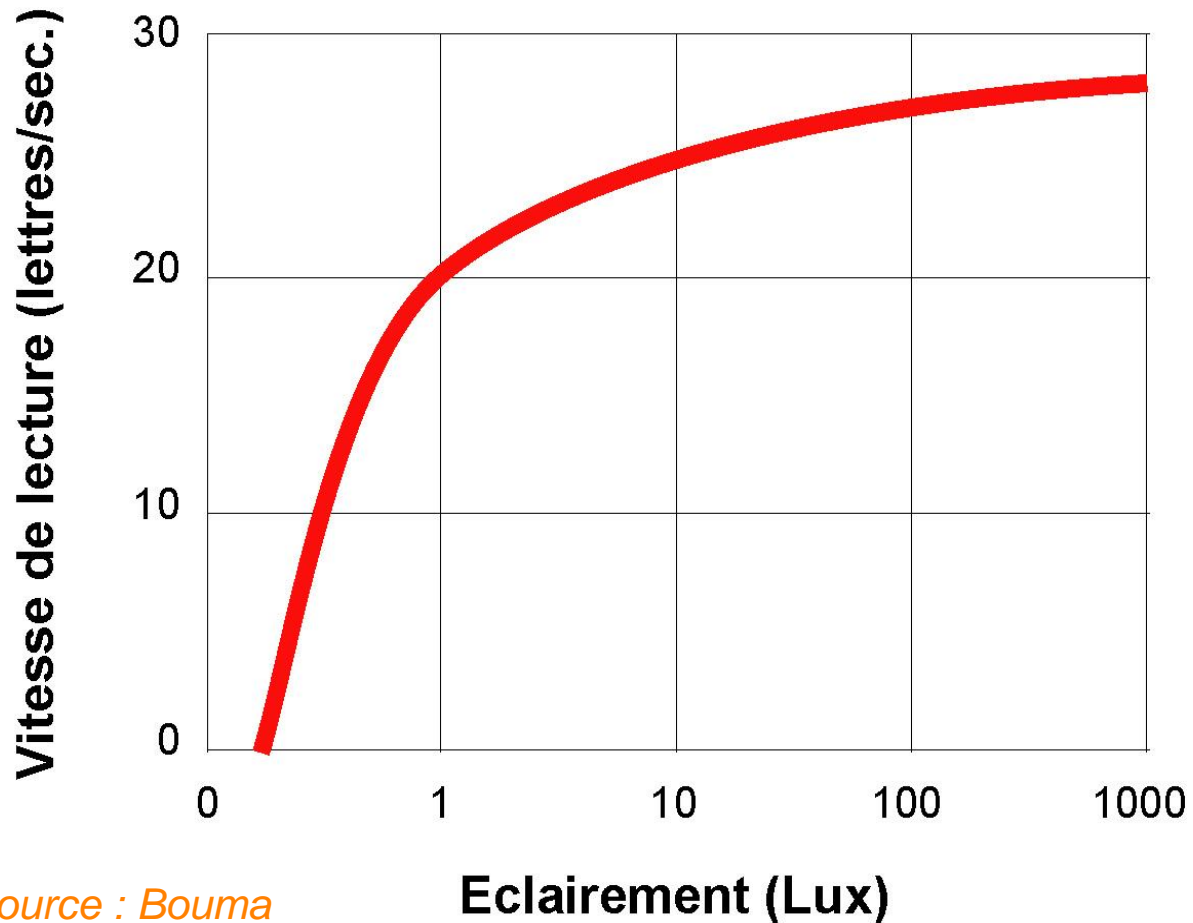
A exprimé en dixième ($\alpha = 1'$, $A = 10/10$)

Valeurs de l'acuité visuelle

- Dépend de la luminance de l'objet
- Dépend de l'âge



Vitesse de lecture



Source : Bouma

Eclairements recommandés

- Code du travail au 1^{er} Mai 2008
 - Livre II Dispositions applicables aux lieux de travail
 - Titre II Obligations de l'employeur
 - Chapitre III Eclairage, ambiance thermique
 - Articles R 4223-1 à 12

LOCAUX AFFECTES AU TRAVAIL et leurs dépendances	VALEURS MINIMALES d'éclairage sur le plan de travail ou le sol
Voies de circulation intérieur	40 lux
Escaliers et entrepôts	60 lux
Locaux de travail, vestiaires, sanitaires	120 lux
Locaux aveugles affectés à un travail permanent	200 lux

Textes réglementaires

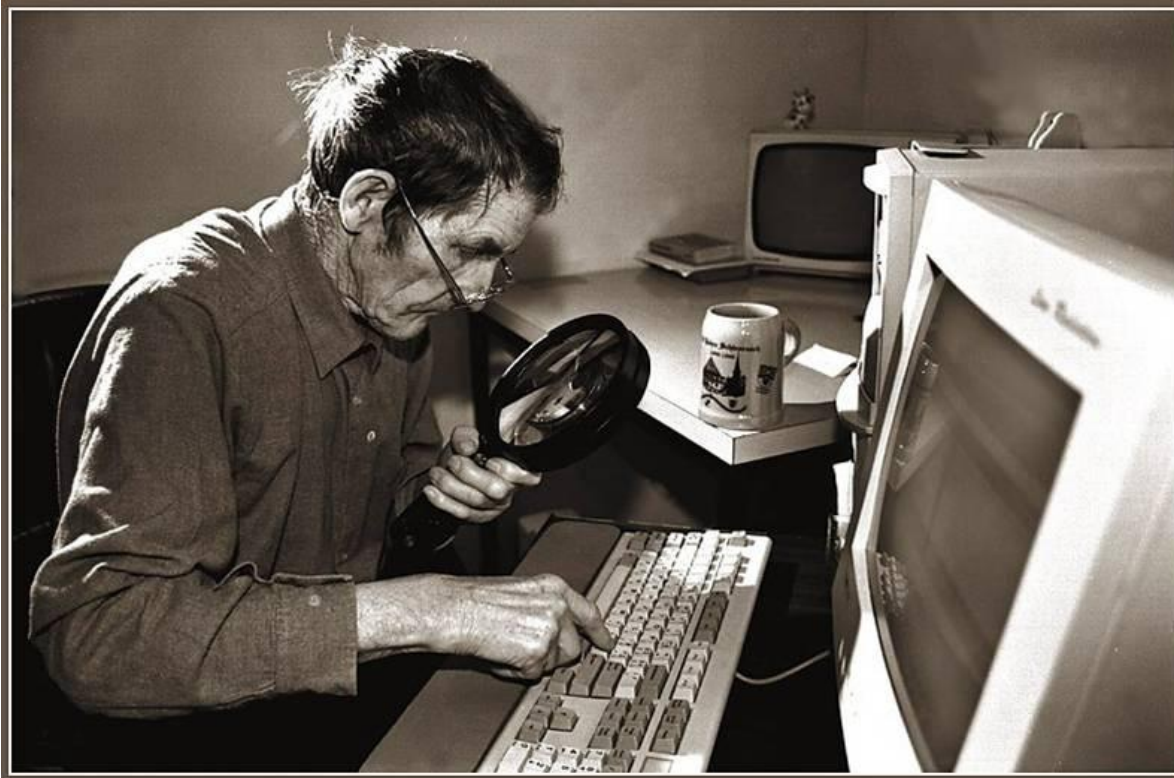
- Norme CIE S008:2001 / ISO 8995:2002 / NF12464
Eclairage des lieux de travail intérieur
 - Eclairement moyen E_m à maintenir sur la zone de travail
 - Valeur maximale de l'indice d'éblouissement UGR
 - Indice de rendu des couleurs Ra
 - Uniformité minimale ($E_{min}/E_{moy} > 0.7$)

Textes réglementaires

- Norme CIE S008:2001 / ISO 8995:2002 / NF12464
 - Tableau 5.3 Eclairage des bureaux

N° réf	Type d'intérieur, activité	E_m	UGR	Ra
3.1	Classement, transcription	300	19	80
3.2	Ecriture, dactylographie, lecture, traitement de données	500	19	80
3.3	Dessin industriel	750	16	80
3.4	Postes de travail sur ordinateur	500	19	80
3.5	Salles de conférence avec réunion	500	19	80
3.6	Réception	300	22	80
3.7	Archives	200	25	80

Niveaux +élevés pour les personnes âgées!



20 30 75 100 150 200 300 500 750 1000 1500 2000 3000 5000 lux



> 50 ans

Autres textes réglementaires

- Norme AFNOR d'ergonomie visuelle X35-103 révisée et disponible en 2013
(Adaptation des ambiances lumineuses des systèmes de travail aux caractéristiques psychophysiologiques des opérateurs en lumière naturelle et/ou en lumière artificielle)
- Norme AFNOR EN-14501 Décembre 2005
(Fermetures et stores - Confort thermique et lumineux - Caractérisation des performances et classification)

Autres publications

- Recommandations AFE
 - AFE = Association Française de l'Eclairage
 - Eclairage intérieur des lieux de travail
 - Eclairage des établissements de santé
 - Eclairage dans l'hôtellerie
 - Eclairage des installations sportives...
 - www.afe-eclairage.com.fr
 - www.lux-editions.fr



1.5 La démarche projet

1. Caractériser l'espace
 - Géométrie et ouvertures sur l'extérieur
 - Nature des revêtements
2. Caractériser les fonctions de l'espace
 - Quelles activités ? Pour qui ?
 - A quel moment du jour, de l'année ?
3. Etablir le cahier des charges
 - Chaque fonction a ses exigences
 - Recommandations AFE et normes
 - Eclairéments (performance) Luminances (confort)

La démarche projet

4. Elaborer des scénarii lumineux
 - Pour chaque fonction
 - Eclairage naturel et artificiel
5. Trouver les solutions techniques
 - Pour chaque scénario
 - Eclairage naturel : vitrages et stores
 - Eclairage artificiel : luminaires et lampes
 - Couplage éclairage naturel/artificiel
6. Chiffrer les coûts
 - Coût initial et coût de maintenance
 - Coût de l'énergie

II. Dimensionnement lumière naturelle

1. Les objectifs du dimensionnement
2. La caractérisation du climat lumineux
3. Le facteur de lumière du jour
4. Le diagramme d'autonomie

II.1 Objectifs du dimensionnement

- Eclairer naturellement un bâtiment, c'est:
 - Définir la taille, la position et le vitrage
 - Définir les occultations et systèmes de contrôle
 - Maîtriser la lumière en quantité et en qualité
 - Réduire l'utilisation de l'éclairage artificiel
- La lumière naturelle est dynamique !

13:45



14:00



14:15



14:30



14:45



15:00



15:15



15:30



15:45



16:00



16:15



16:30



16:45



17:00



Il faut donc...

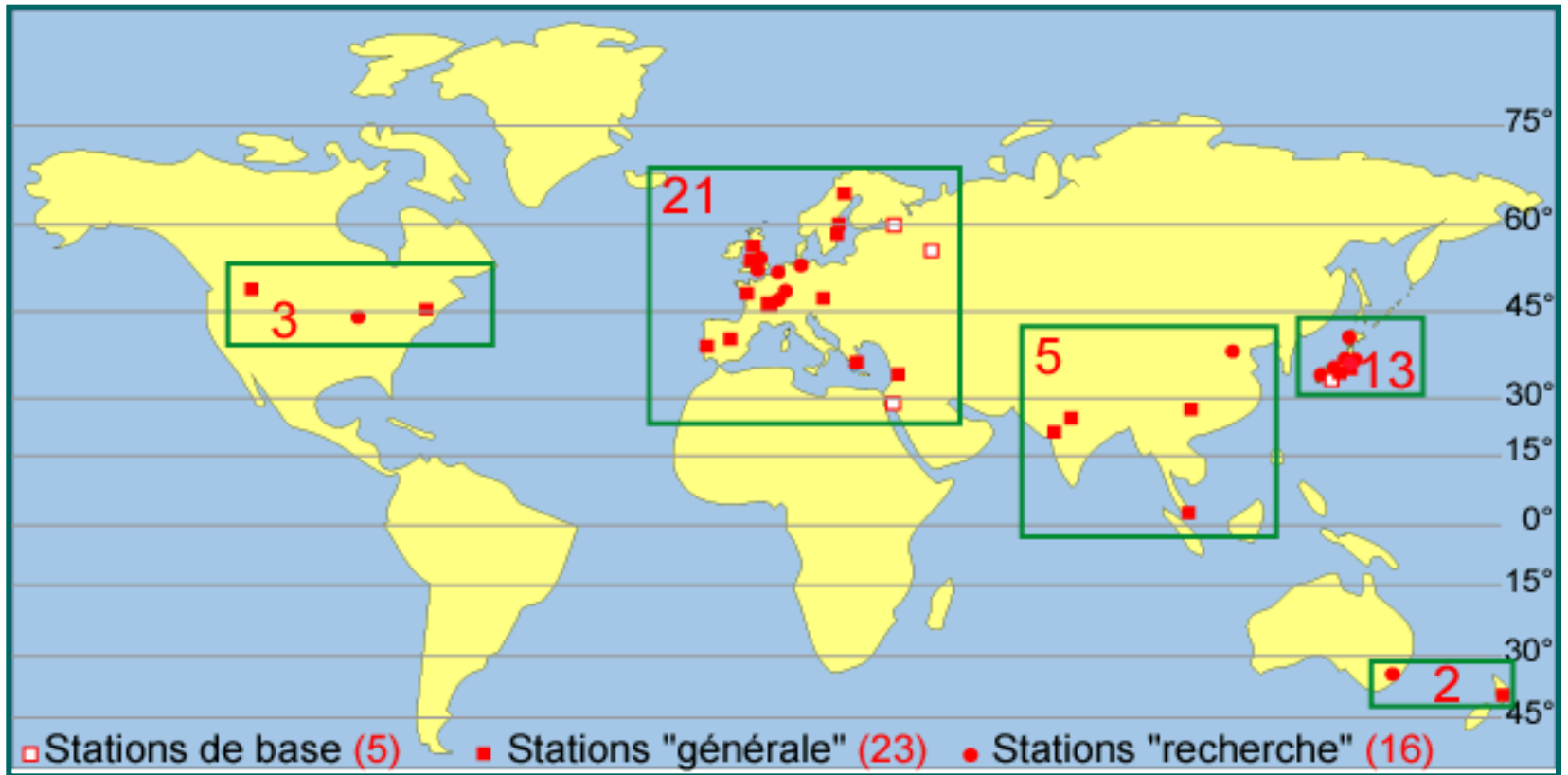
- Pouvoir caractériser le climat lumineux pour le lieu considéré
- Disposer d'outils de conception intégrant la dynamique du climat
- Comprendre les besoins des usagers

- Les outils simples n'intègrent pas la dynamique !
- Recherches et développements en cours

II.2 Caractérisation du climat lumineux

- Mesures au sol: réseau CIE-IDMP
 - IDMP : International Daylight Measurement Programme
 - Mesures toutes les minutes
 - Eclairements lumineux horizontaux et verticaux
 - Eclairements énergétiques (efficacité lumineuse)
 - Luminances de ciel (stations type «recherche»)
 - Photographies du ciel

Stations CIE-IDMP depuis 1991



En France : Nantes (CSTB), Vaulx-en-Velin (ENTPE)

Station IDMP-ENTPE de Vaulx-en-Velin



Vue Ouest de la station



Energétique diffus

Energétique
direct normal
+ Spectre

Luminance du zénith

Lumineux global

Energétique global

Vertical nord

Vertical global ouest

Vue Est de la station



Vertical est

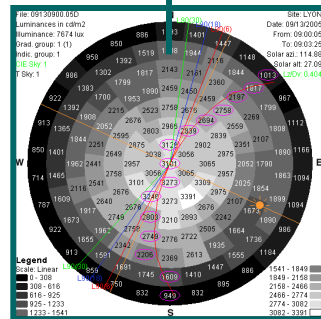
Lumineux diffus

Spectres

UV A et B

Vertical sud

Scanner de ciel



http://idmp.entpe.fr/vaulx/mesfr.htm

Récupérer les mesures mois par mois

Choisissez un jour... - Mozi...

Station IDMP: Vaulx-en-Velin, France

Station Mesures Etudes Liens

Mesures Journalières

Vous pouvez visualiser les mesures journalières de la station depuis le 1er Janvier 2004. La représentation des données d'aujourd'hui est actualisée toute heure pleine.

Aujourd'hui
Hier
Avant-hier
Autres jours depuis le 1er Janvier 2004

Vous trouverez dans cette page des informations pour mieux comprendre ces graphes.

Fichiers de données

Nos mesures sont disponibles pour une année entière ou mois par mois, à partir de 1992. Il suffit de cliquer sur l'année ou sur un carré de mois dans le tableau ci-dessous. Un carré absent veut tout simplement dire que les données ne sont pas disponibles pour le mois en question. Les mesures sont disponibles dans une archive ZIP. Le fichier est au format texte lisible avec MS Excel (voir un exemple). Dans le cas des archives mensuelles, en plus du fichier de mesures, vous trouverez des représentations graphiques des mesures au format PDF (voir un exemple).

Année	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aou	Sep	Oct	Nov	Dec
1992												
1993												
1994												
1995												
1996												
1997												
1998												
1999												
2000												
2001												
2002												
2003												
2004												
2005												
2006												
2007												
2008												
2009												
2010												
2011												
2012												
2013												

Visualiser les mesures d'un jour

Station IDMP: Vaulx-en-Velin, France

18 Février, 2014

Lever du soleil : 7h35
Coucher du soleil : 18h13
Durée du jour : 10h38mn
Fraction d'ensoleillement : 6%

Type de ciel approximatif

Trajectoire du soleil

Eclairement Lumineux Horizontal Global/Diffus
Eclairement Énergétique Horizontal Global/Diffus
Eclairement Énergétique Horizontal Direct

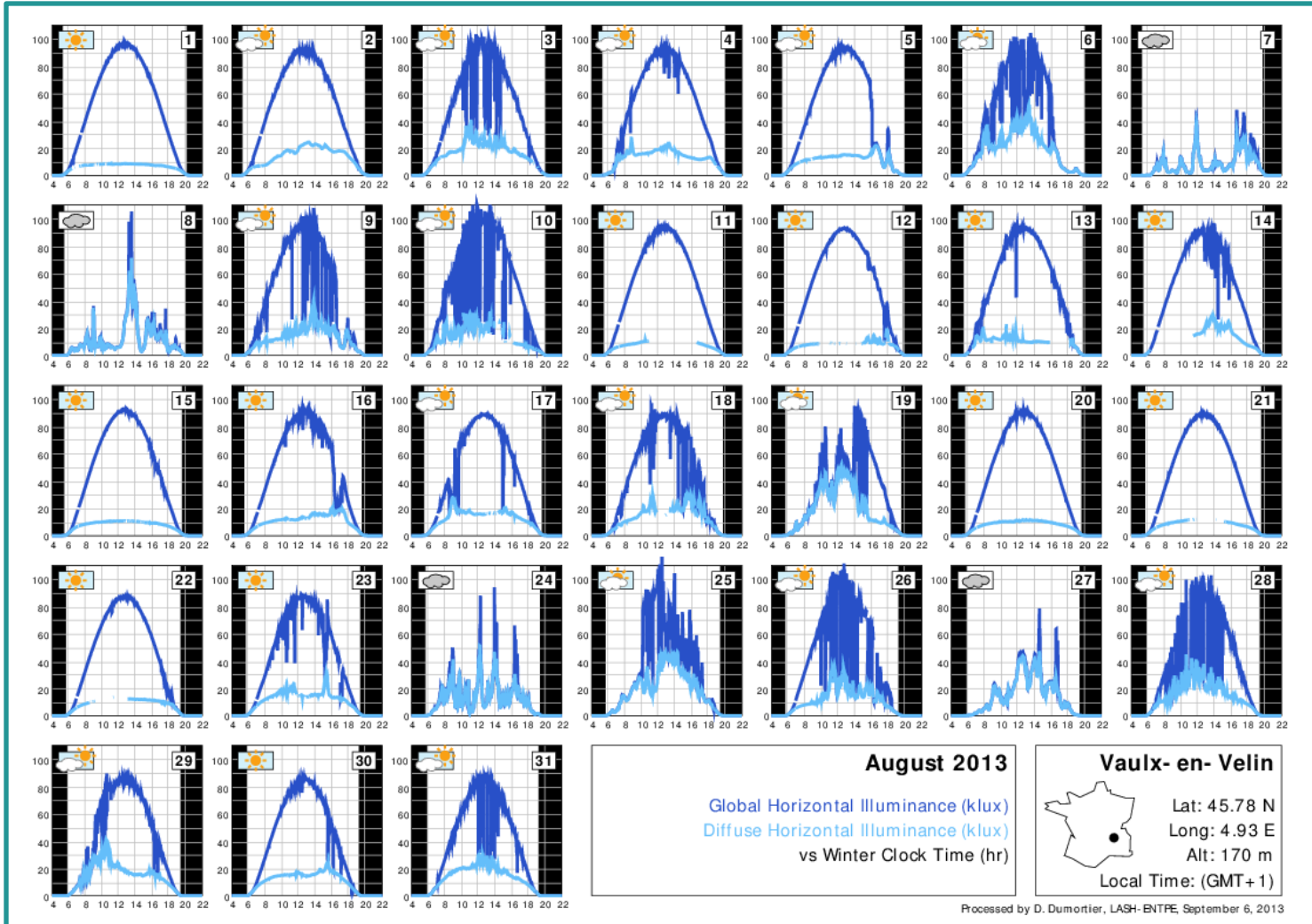
Eclairement Lumineux Horizontal Global Sud/Nord
Eclairement Lumineux Vertical Global Est/Ouest
Luminance du Zénith

Ultraviolet B: 280-315 nm
Ultraviolet A: 315-400 nm
Indice UV

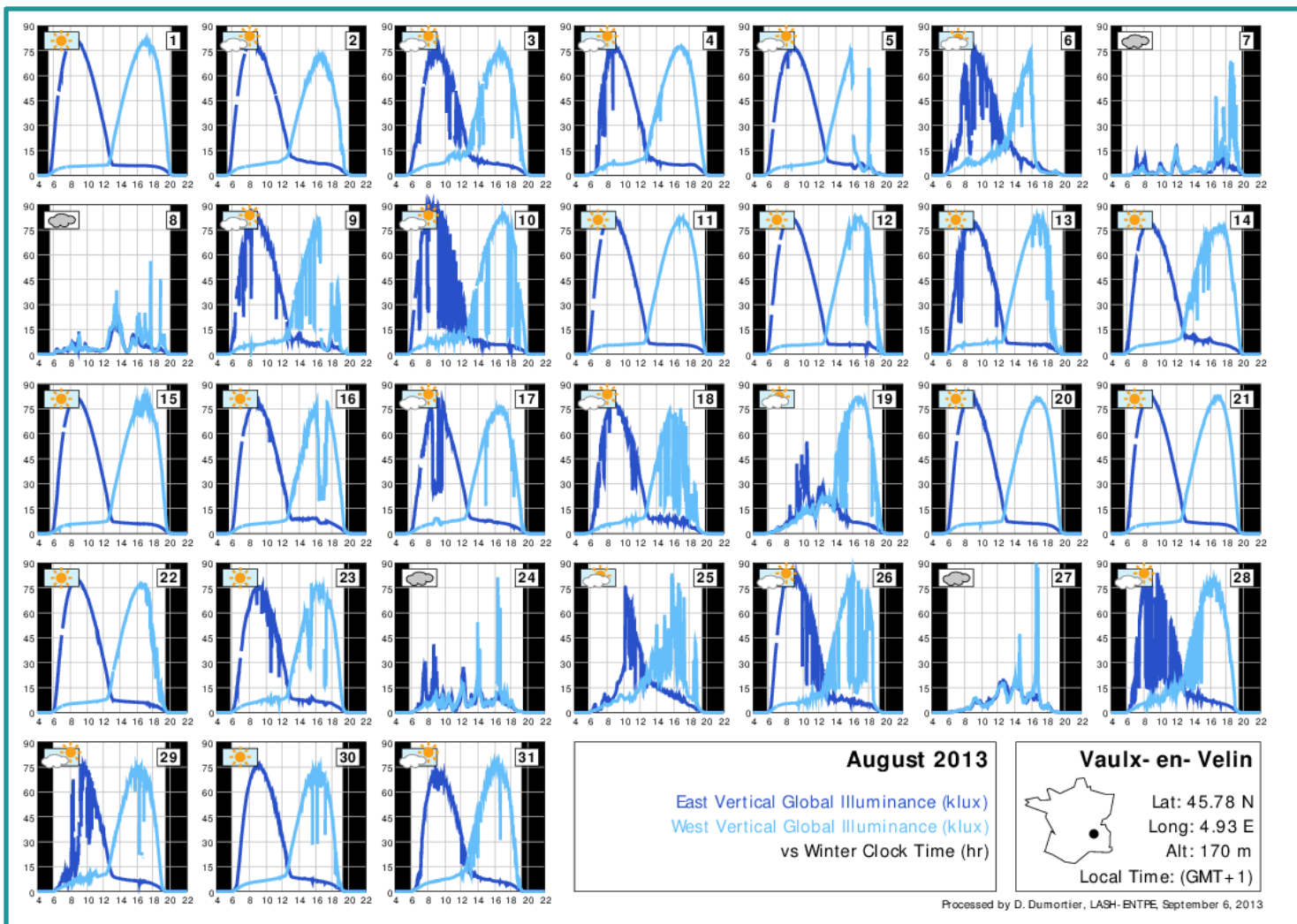
Température de l'air
Humidité Relative
Rose des Vents

Nous écrire Copyright©ENTPE

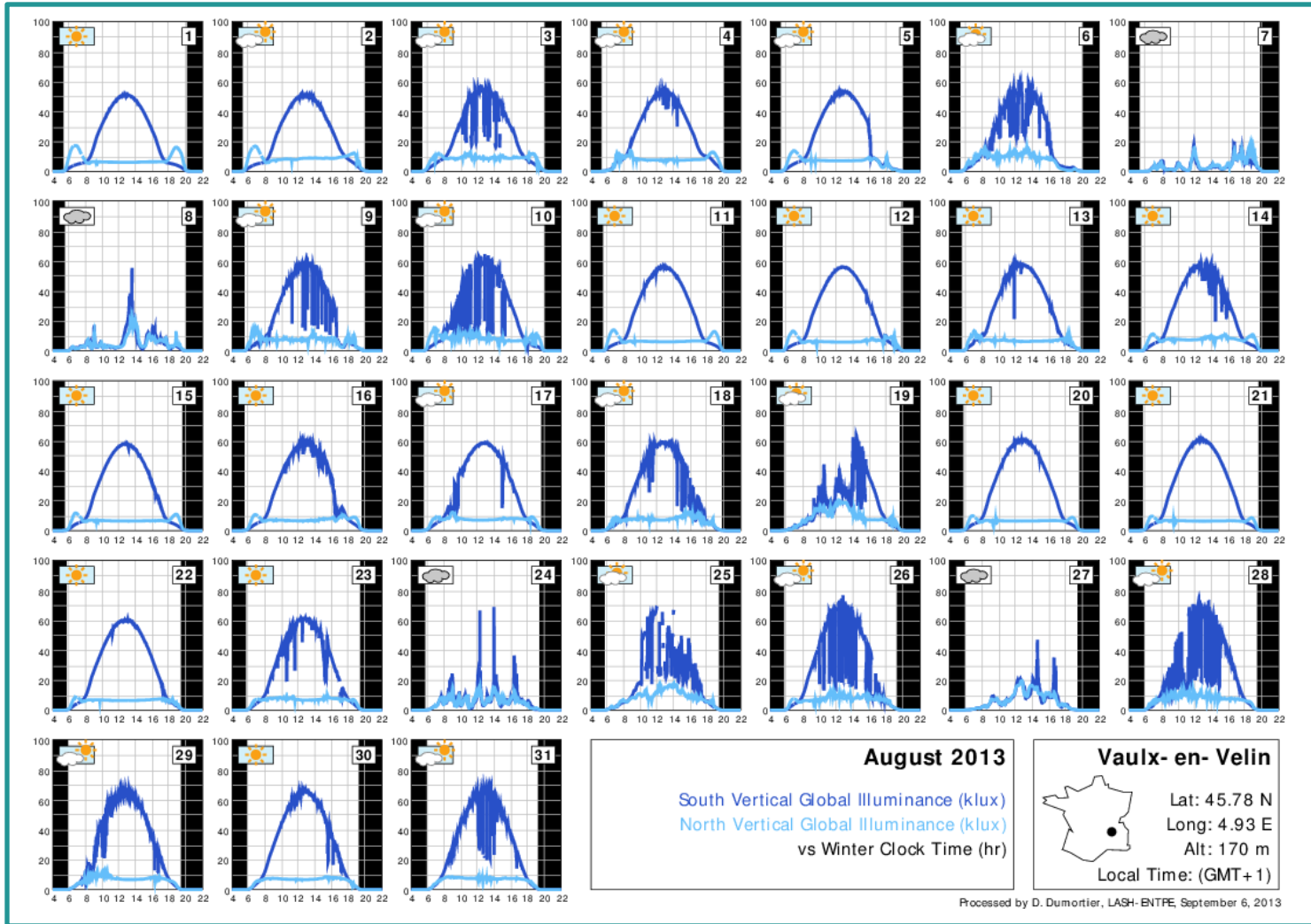
Eclairements horizontaux en Août



Eclairements verticaux E+O en Août



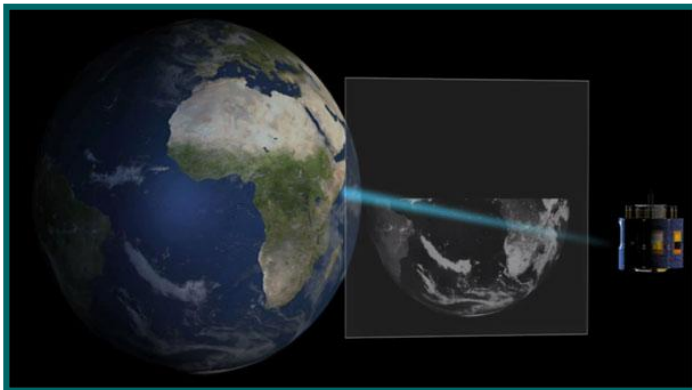
Eclairements verticaux N+S en Août



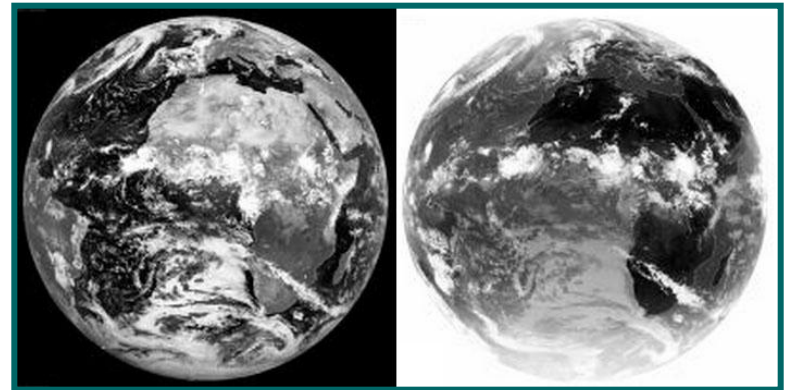
Caractérisation du climat lumineux

- Traitement d'images satellites

- Les satellites en orbite géostationnaire à 36000 km de la terre, synchrones avec sa rotation
- Des satellites météorologiques tels que METEOSAT (Europe), GOES (USA)...
- Images de la terre toutes les 15 ou 30 mn
- Résolution spatiale de 2 à 5 km



Meteosat



Visible

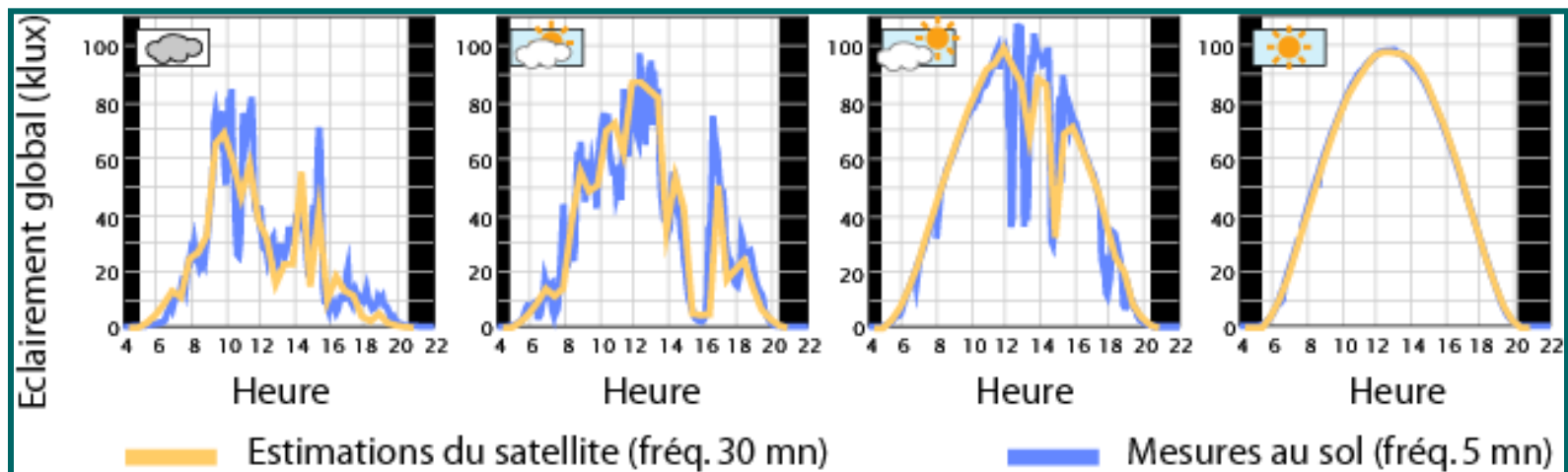
Infrarouge

Utilisation des images METEOSAT

- Principe

- Le radiomètre mesure le rayonnement solaire réfléchi par les nuages ou le sol
- Pixel lumineux = nuages
- Dynamique bien respectée

Visible



Serveur www.satel-light.com

5 ans de données ½ horaires de 1996 à 2000, 20000 utilisateurs

S@tel-Light Zone : F From : Sunrise To : Sunset Clock Time, 1996 to 2000
 Jan Feb Mar Apr May Jun Jul Aug Sep Oct Nov Dec All Year
 Information : Frequency of Sunny Skies
 10 20 30 40 50 60 70 % Date : 09/02/03
 www.satel-light.com

The Satel-Light Starter
 Wednesday, February 2, 2011

News
 A total of five years of half hour values are available: 1996-2000. There are many maps, not just for solar radiation or daylight, for temperature too!
 Tell us your needs! Fill the IEA 36 questionnaire. Your answers will help improving SATEL-LIGHT and developing new services.
 Do not forget that you have to login if you want information from the site! If you are a new comer, you will first have to register.

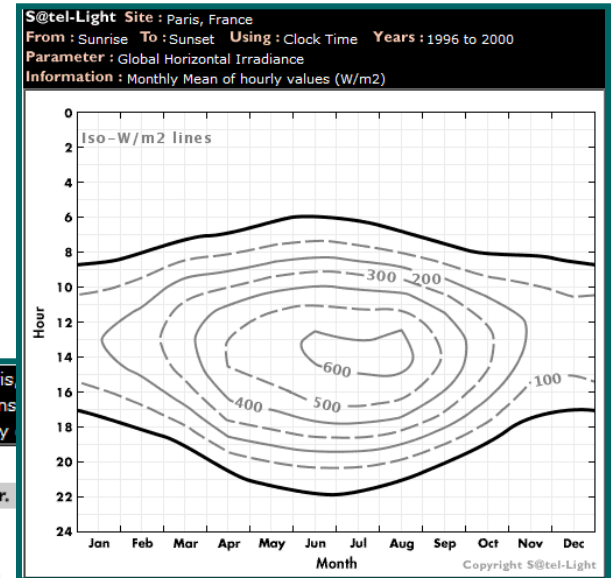
The Quiz
 10 Questions on the Sun and on SateL-Light. Challenge yourself, over and over, the quiz is never the same!

The Map of the week
 The map of the week is in the "pixels" mode. It shows the frequency of sunny skies over France, for the whole year.

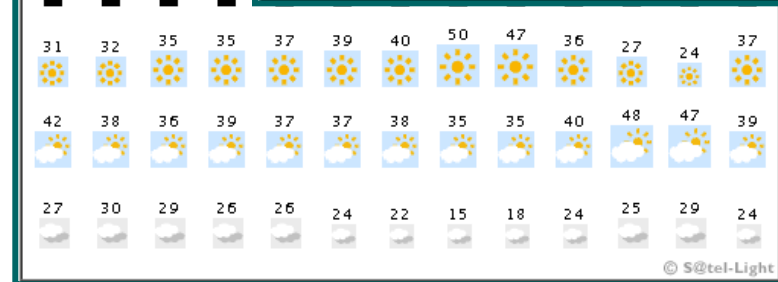
To see it at its best! In the Work User Report

Paris
 0 : Paris
 0 : Sunny frequency
 Apr.

Diagrammes



Cartes



Modélisation des ciels

- Source de grandes dimensions

$$E_P = \int_{\Omega} L d\Omega \cos \theta$$

- Objectif : connaître les variations de L
- Ciel uniforme
- Ciel couvert normalisé CIE en 1955
- Ciel clair normalisé CIE en 1973
- Ciel général normalisé CIE en 2003

Ciel uniforme



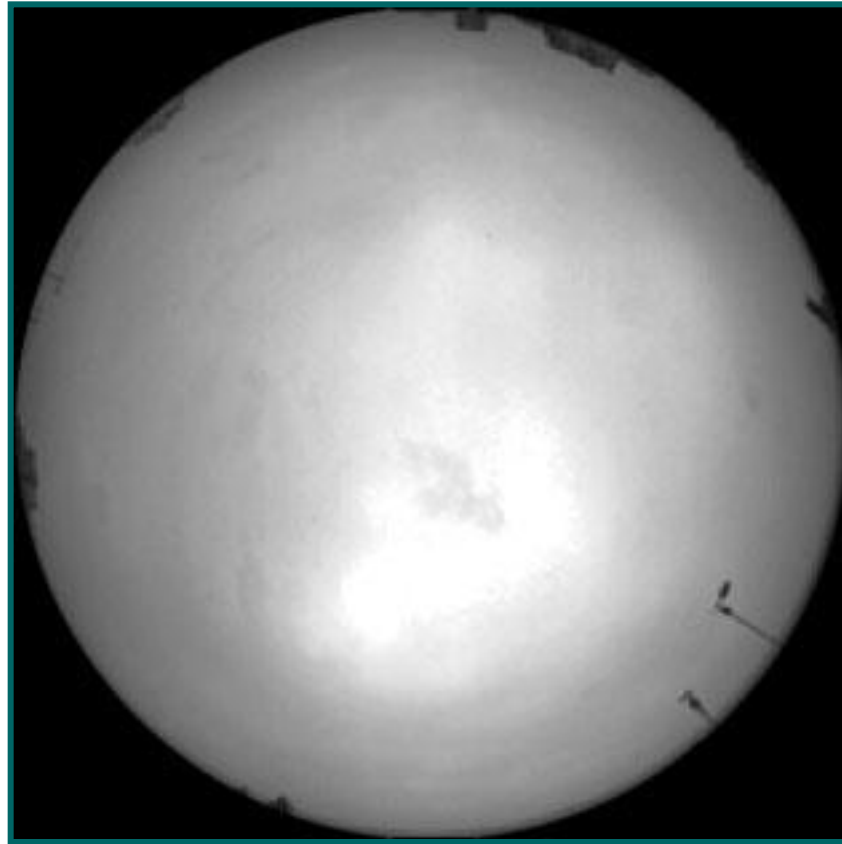
Ciel couvert



Ciel clair

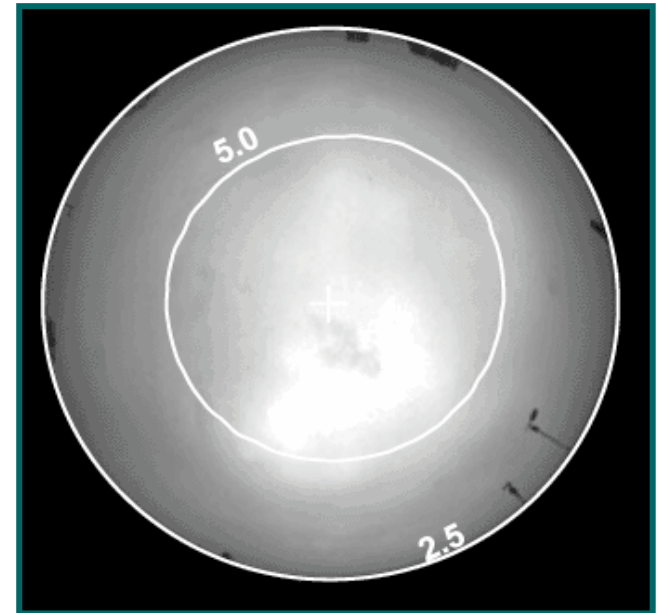
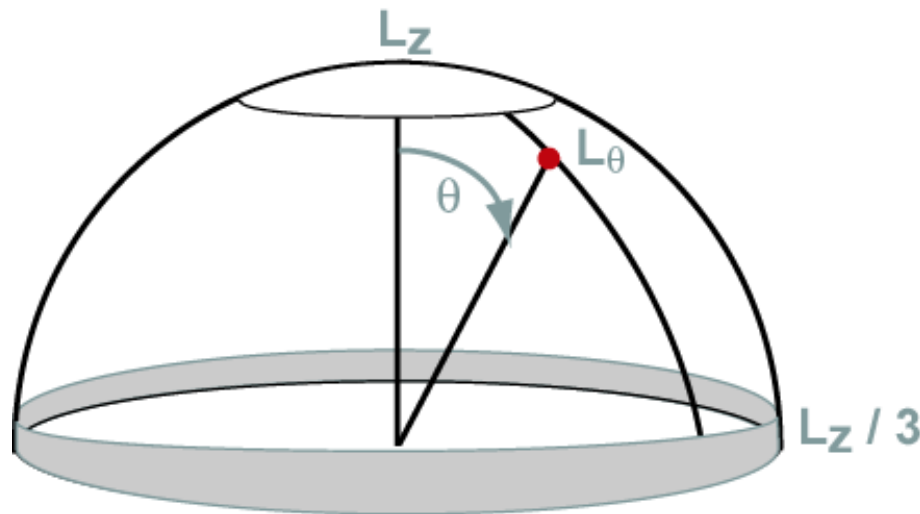


Modélisation d'un ciel couvert



Modèle de ciel couvert standard CIE

Ciel Couvert

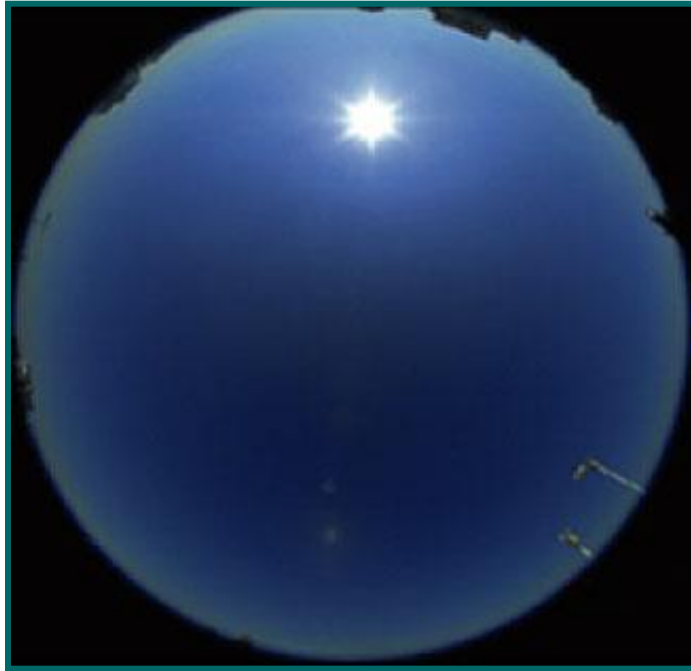


$$L_{\theta}/L_z = (1 + 2\cos\theta) / 3$$

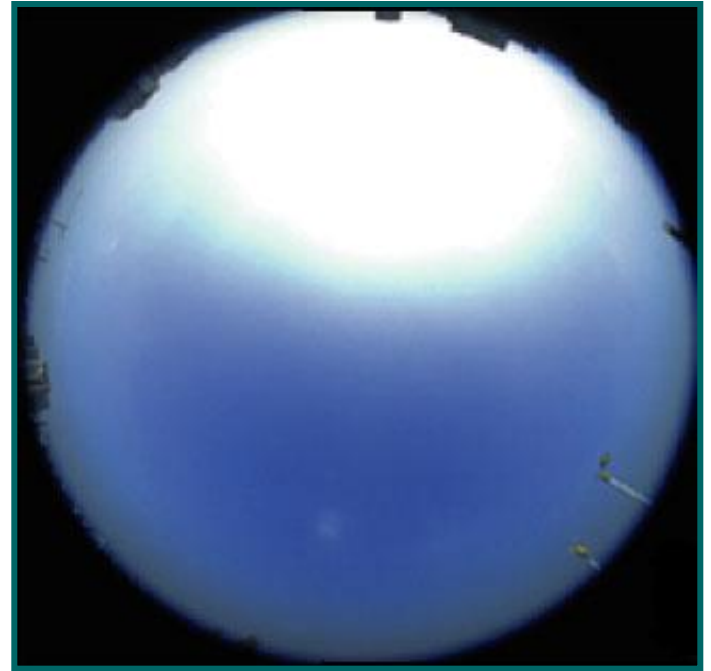
$$E = 7\pi L_z / 9$$

Pas de notion d'orientation !

Modélisation d'un ciel clair

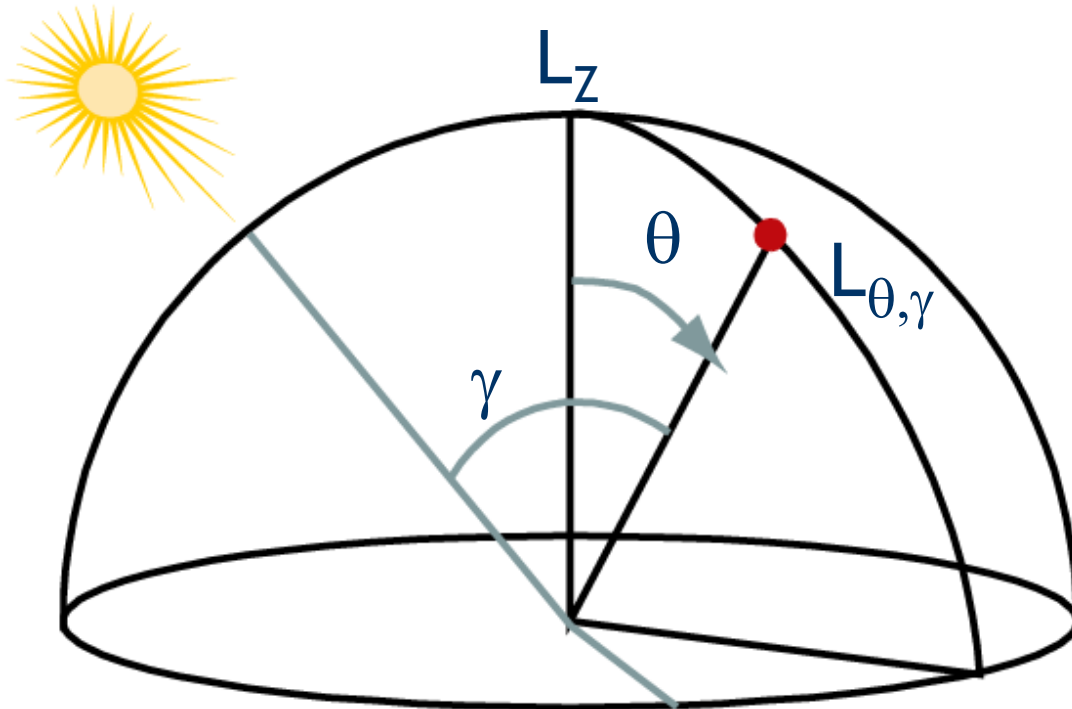


Trouble faible



Trouble élevé

Modèle de ciel clair standard CIE



	Rural	Urbain
a	0,91	0,86
b	10	16
c	0,45	0,3
d	0,32	0,32

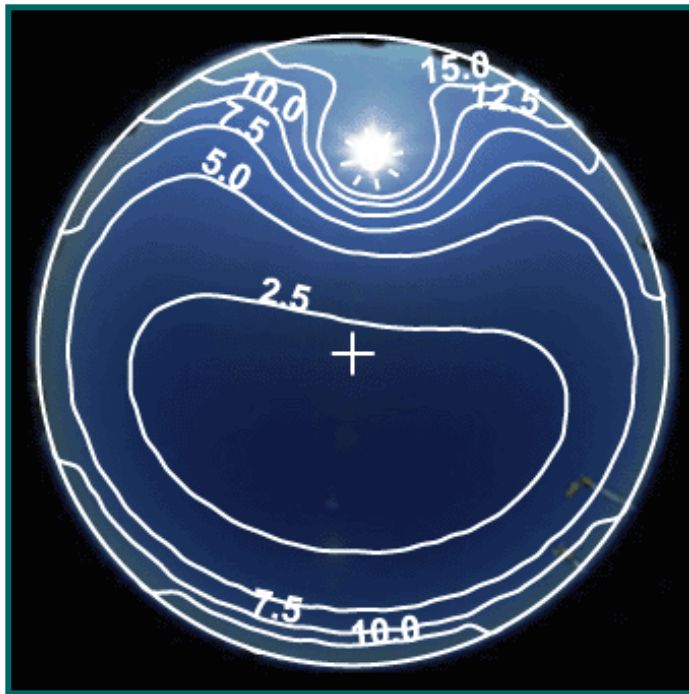
$$L_{\theta, \gamma} / L_z = (a + b \exp(-3\gamma) + c \cos^2 \gamma) [1 - \exp(-d / \cos \theta)]$$

Mie

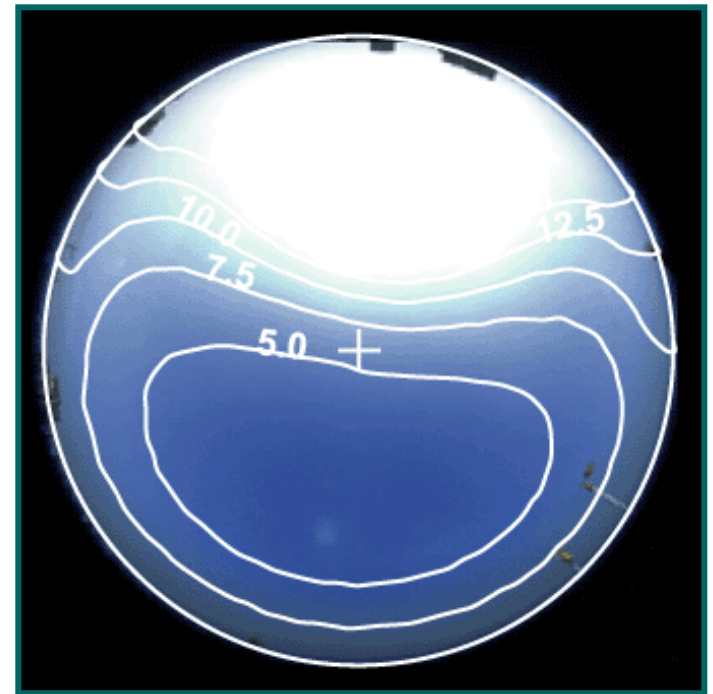
Rayleigh

Chemin optique

Modèle de ciel clair standard CIE



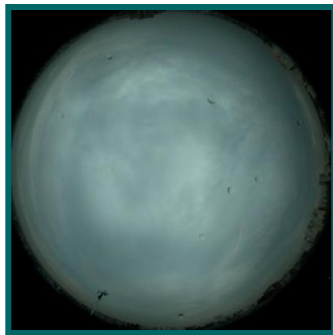
Trouble faible



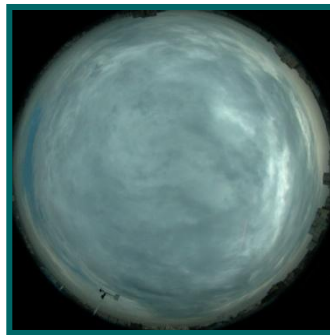
Trouble élevé

Ciel général CIE standard S11/2003

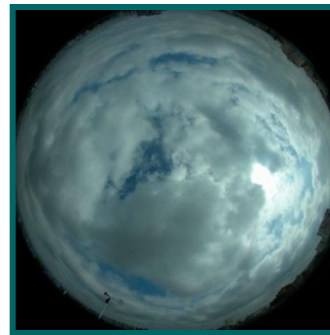
- Formulation mathématique identique à celle des ciels clairs
- 15 types: du ciel couvert au ciel clair



Type 1, I.1



Type 4, II.2

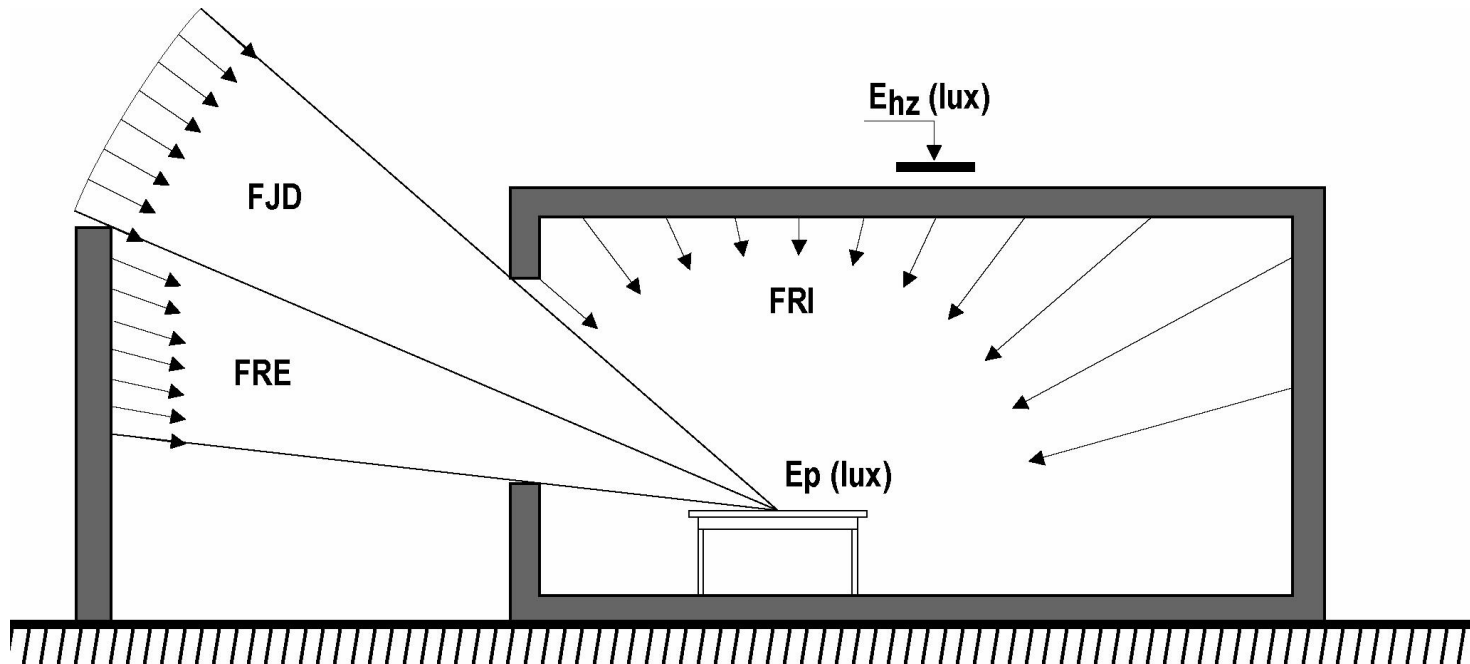


Type 7, III.3



Type 12, V.4

II.3 Le facteur de lumière du jour FJ



$$FJ = E_p / E_{hz} (\%) = FJD + FRE + FRI$$

FJD Composante Directe

FRI Composante Réfléchie Interne

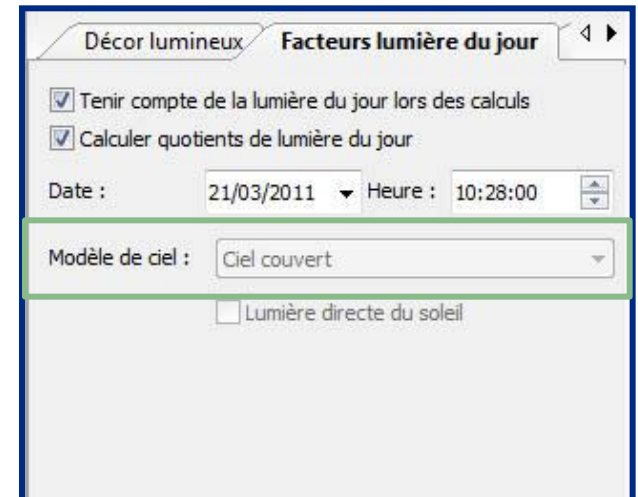
FRE Composante Réfléchie Externe

E_{hz} Eclairage Extérieur sans soleil

Le facteur de lumière du jour FJ dépend

- Du type de ciel
 - Face au nord d'un ciel clair (4%)
 - Face à un ciel couvert (5%)
 - Face à un ciel uniforme (6%)
 - Face au sud d'un ciel clair (21%)
 - **Le ciel couvert est la référence !**

Logiciel Dialux



- De la fenêtre: taille, position, vitrage...
- Des caractéristiques photométriques des parois
- De la position du point dans la pièce

Valeurs du facteur de lumière du jour

Facteur de lumière du jour sur un plan horizontal	En %	< 1%	1...2%	2...4%	4...7%	7...12%	> 12%
		Très faible	Faible	Modéré	Moyen	Elevé	Très élevé
	Zone intéressée	Dans la zone éloignée des fenêtres, distance entre 3 et 4 fois la hauteur de la fenêtre			A proximité des fenêtres ou sous des lanternaux		
Impression de clarté		Sombre et peu éclairé		Peu éclairé à clair		Clair à très clair	
Impression visuelle du local		Cette zone		semble être séparée		de cette zone	
Ambiance		Local semble être séparé de l'extérieur (chambre, foyer)			Local s'ouvre vers l'extérieur (local de travail)		

Valeurs souhaitables

Facteurs de correction du FJ

- Facteur de transmission du vitrage propre
- Correction due à l'empoussièrement réduisant le facteur de transmission du vitrage (*facteur de pollution sous DIALUX*)
 - Campagne + activité propre : 0.9
 - Campagne + activité poussiéreuse : 0.7
 - Ville + activité propre : 0.8
 - Ville + activité poussiéreuse : 0.6
- Correction due à la présence des menuiseries des fenêtres réduisant la surface de vitrage (*facteur d'échelle sous DIALUX*)
 - Menuiserie fixe métal : 0.9 ou PVC/bois : 0.85
 - Menuiserie à battants métal : 0.8 ou PVC/bois : 0.60

Logiciel Dialux

The screenshot shows the 'Facteurs lumière du jour' (Daylight factors) window in the Dialux software. It contains several input fields with dropdown menus and numerical values:

- Facteur de transmission:** 'Verre type : [dropdown] 90 %' (highlighted with a yellow box)
- Facteur de pollution:** 'Zone rurale (faible) [dropdown] 0.90' (highlighted with a green box)
- Facteur d'échelle:** 'Fenêtre en plastique (à battants) [dropdown] 0.60' (highlighted with a yellow box)
- Facteur de réduction correspondant à une incidence non perpendiculaire :** 0.80

Yellow lines connect the text in the list to the corresponding fields in the software interface.

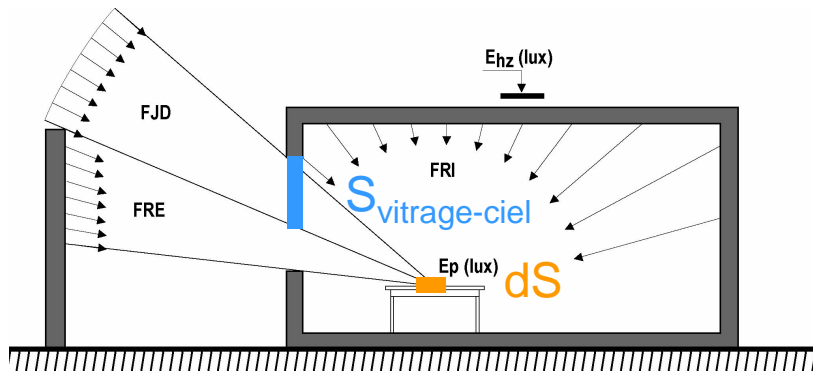
Calcul simplifié du FJ

- Le ciel est supposé uniforme
- Le vitrage est supposé parfaitement diffusant
- Les matériaux de la pièce sont supposés parfaitement diffusants
- L_v constant permet d'utiliser les facteurs de forme

$$M_v = \tau_v E_v = \pi L_v$$

$$E_{dS} = \pi L_v "F_{dS-v}"$$

Calcul de FJD par ciel uniforme



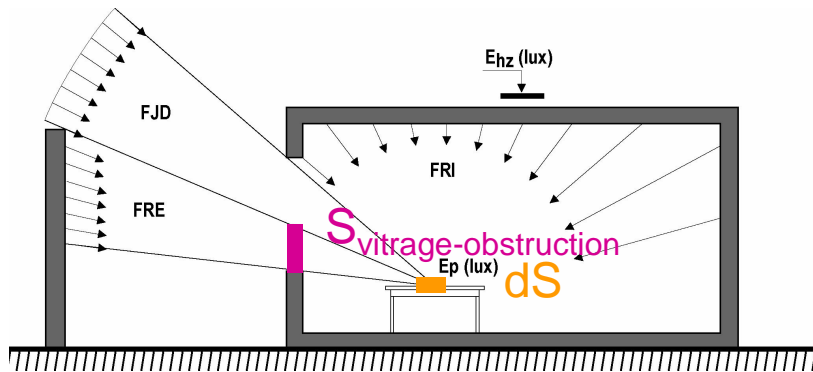
$$FJD = \frac{E_{\text{vitrage-ciel}}}{E_{\text{horiz-ext}}}$$

$$E_{\text{vitrage-ciel}} = \pi L_{\text{vitrage-ciel}} "F_{dS-S_{\text{vitrage-ciel}}}"$$

$$E_{\text{vitrage-ciel}} = \tau_{\text{vitrage}} \pi L_{\text{ciel}} "F_{dS-S_{\text{vitrage-ciel}}}"$$

$$FJD = \frac{\tau_{\text{vitrage}} \pi L_{\text{ciel}} "F_{dS-S_{\text{vitrage-ciel}}}" }{\pi L_{\text{ciel}}} = \tau_{\text{vitrage}} "F_{dS-S_{\text{vitrage-ciel}}}"$$

Calcul de FRE par ciel uniforme



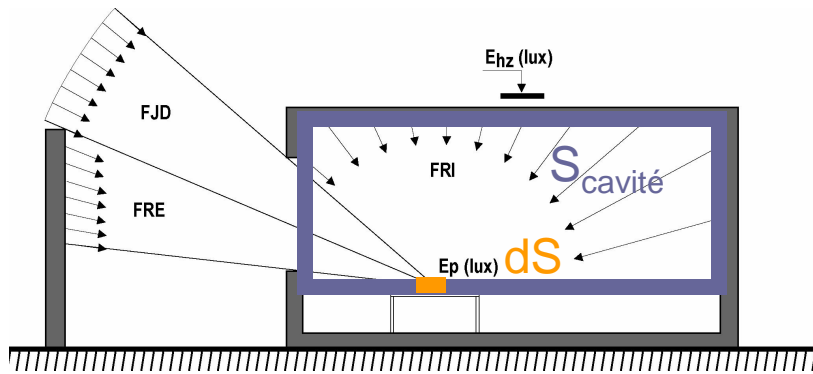
$$FRE = \frac{E_{\text{vitrage-obstruction}}}{E_{\text{horiz-ext}}}$$

$$E_{\text{vitrage-obstruction}} = \tau_{\text{vitrage}} \pi L_{\text{obstruction}} "F_{dS-S_{\text{vitrage-obstruction}}}"$$

$$M_{\text{obstruction}} = \pi L_{\text{obstruction}} = \rho_{\text{obstruction}} E_{\text{vert-ext}} = \rho_{\text{obstruction}} \frac{\pi L_{\text{ciel}}}{2}$$

$$FRE = \frac{\tau_{\text{vitrage}} \pi L_{\text{obstruction}} "F_{dS-S_{\text{vitrage-obstruction}}}" }{\pi L_{\text{ciel}}} = \tau_{\text{vitrage}} \frac{\rho_{\text{obstruction}}}{2} "F_{dS-S_{\text{vitrage-obstruction}}}"$$

Calcul de FRI par ciel uniforme



$$FRI = \frac{E_{\rho}}{E_{horiz-ext}}$$

$$E_{\rho} = \frac{F_{\rho}}{S_{cavité}} = \frac{\bar{\rho} F_{vitrage}}{(1 - \bar{\rho}) S_{cavité}}$$

$$F_{vitrage} = \tau_{vitrage} S_{vitrage} E_{vert-ext} = \tau_{vitrage} S_{vitrage} \frac{\pi L_{ciel}}{2}$$

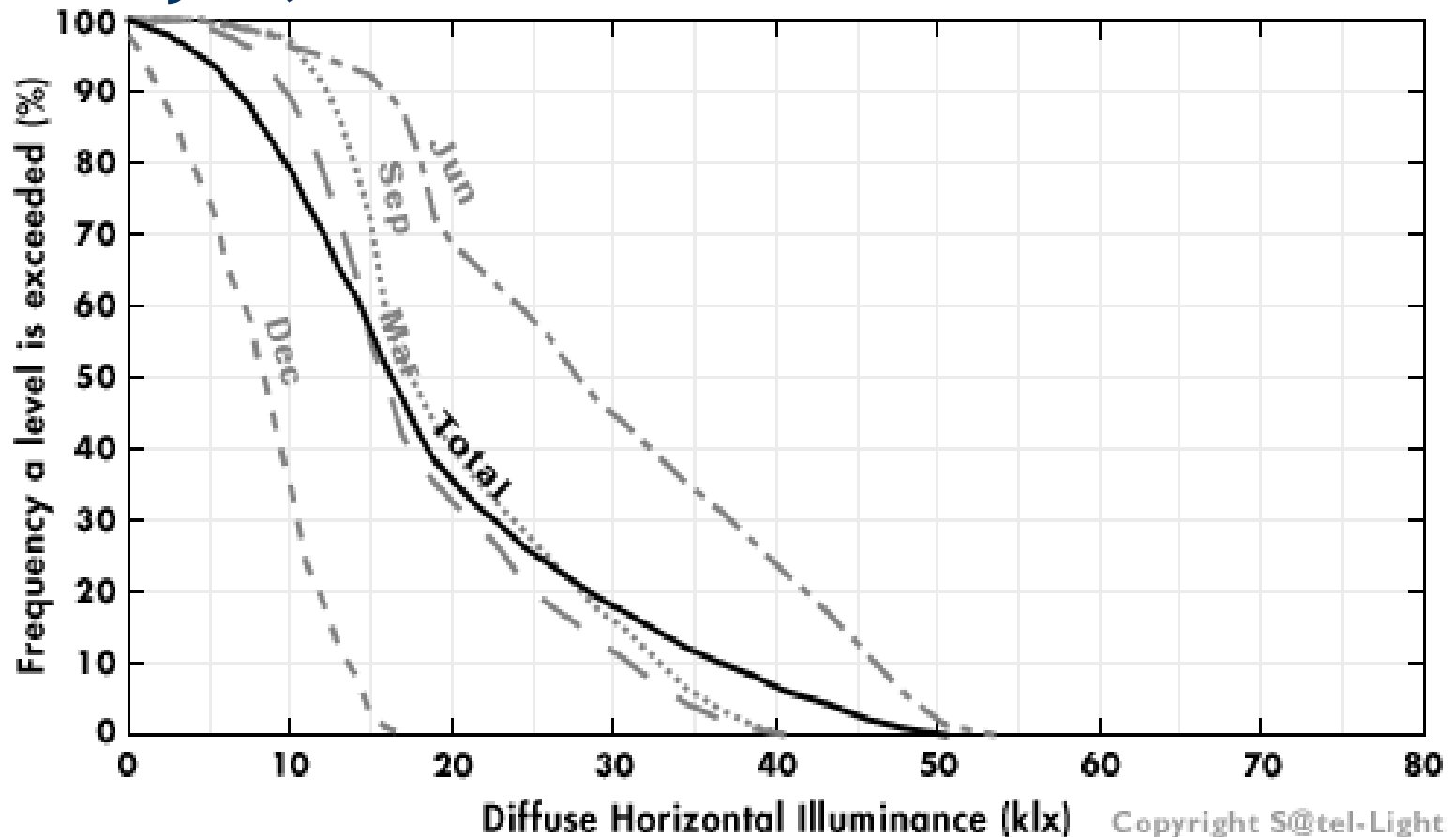
$$FRI = \frac{\bar{\rho}}{(1 - \bar{\rho}) S_{cavité} \pi L_{ciel}} \tau_{vitrage} S_{vitrage} \frac{\pi L_{ciel}}{2} = \frac{\bar{\rho} \tau_{vitrage} S_{vitrage}}{2(1 - \bar{\rho}) S_{cavité}}$$

Outils de calcul du FJ

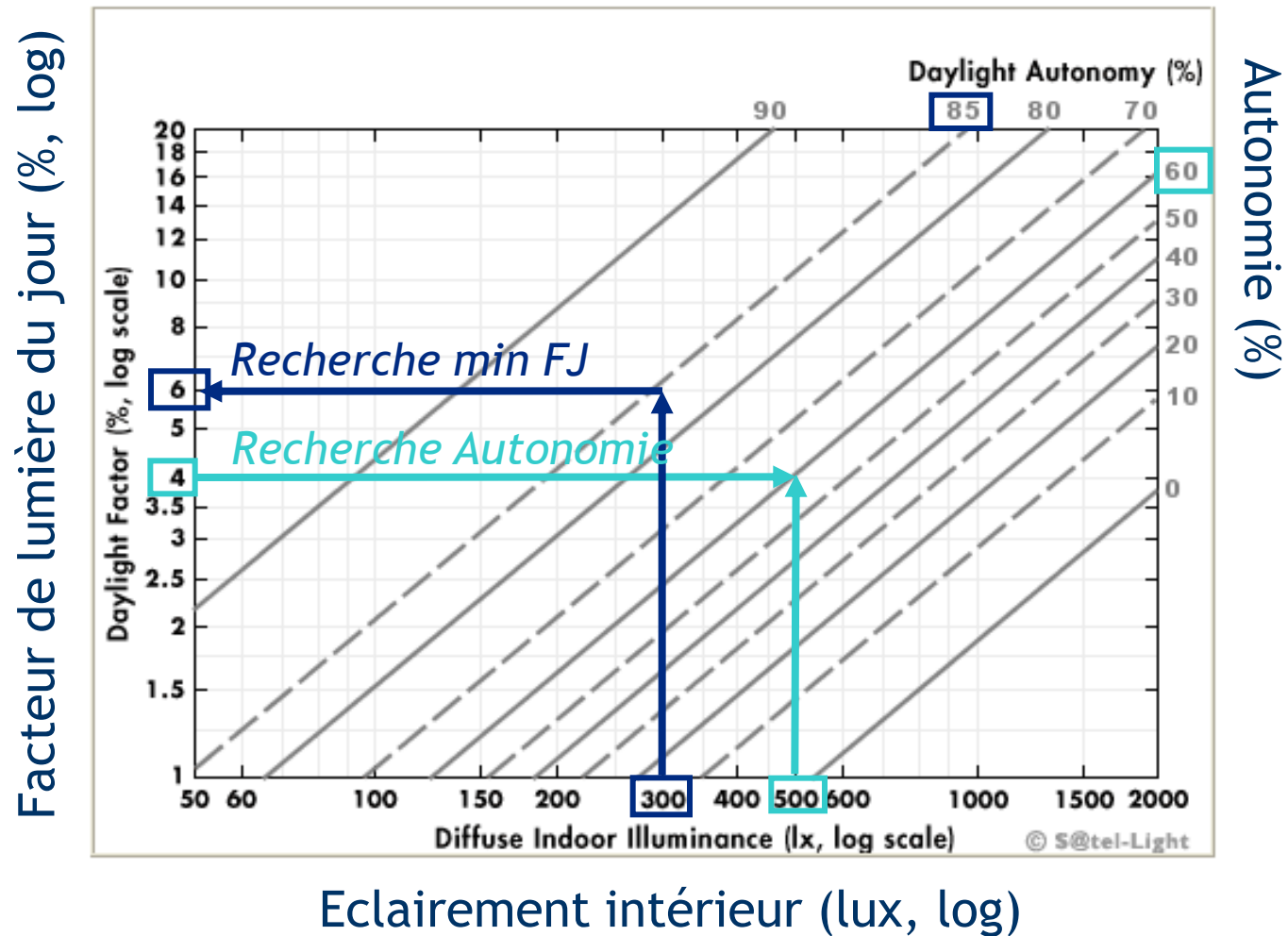
- DIALUX (www.dialux.com)
- DIAL+Lighting (www.estia.ch)
- Daylight Visualizer (viz.velux.com)
- ReluxPro (www.relux.biz)
- Autodesk ECOTECH Analysis (www.autodesk.fr)
- AGI32 (www.agi32.com)

II.4 Climat: analyse fréquentielle de E_{ext}

Lyon, de 8h à 18h



FJ/climat: le diagramme d'autonomie



FJ/climat: le diagramme d'autonomie

- Basés sur les niveaux d'éclairement extérieur horizontal diffus dépassés un % de temps

$$E_{extdiffus}(60\%) = 12500 \text{ lux} \text{ donc } FJ(60\%) = E_{int} / 12500$$

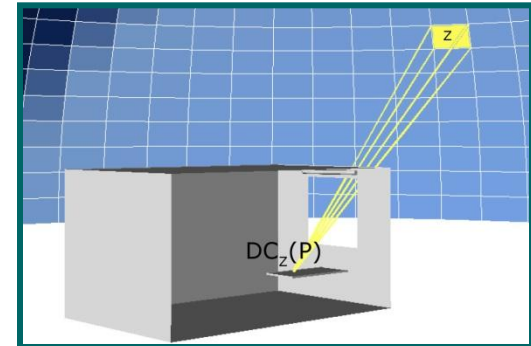
$$\text{Pour } E_{int} = 500 \text{ lux, } FJ(60\%) = 500 / 12500 = 0.04$$

- Dépendent du lieu et de la période considérée
 - Bureaux : 9h à 17h
 - Gares/Aéroports : lever au coucher du soleil
- Disponibles sur www.satel-light.com

Amélioration de la prise en compte du ciel

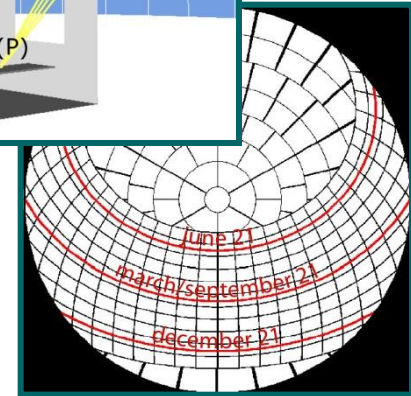
- Le FJ est limité !

- Seul le ciel couvert est pris en compte
- Pas de prise en compte du soleil
- Couplage difficile avec le climat
- Approche « a minima » de la disponibilité



- Autre approche : les Daylight Coefficients (DCs)

- Décrivent l'influence de zones du ciel dans la pièce
- Reposent sur un découpage optimal de la voûte céleste
- Permettent de prendre en compte tous les types de ciel
- Couplage facile avec le climat via les modèles de luminances
- Calculs plus longs : les DCs varient de 100 à plusieurs milliers...



Vers des outils de calcul climatiques...

- A la manière des logiciels de thermique, on pourra :
 - Calculer les éclairagements dans la pièce à chaque instant
 - Evaluer le confort visuel de l'occupant
 - Décider de la stratégie de contrôle des stores
 - Evaluer les économies liées au contrôle de l'éclairage artificiel
- Outils en phase de recherche/développement
 - Daysim (Harvard University/Etats-Unis)
 - LightSolve (MIT+LESO-EPFL/Suisse)
 - Phanie-2010 (CSTB/France)