

Université Joseph Fourier, Grenoble – 2014/2015  
L2 PHY236 et GEL23b – option Énergétique

Johann Collot - collot@in2p3.fr

Barbara Comis - barbara.comis@lpsc.in2p3.fr

Monique Giroud - monique.giroud@ujf-grenoble.fr

Stéphane Grenier - stephane.grenier@grenoble.cnrs.fr

4. Énergie : Énergies Renouvelables déconcentrées  
Le Retour du Soleil et du Vent

## 2. Remarques préliminaires

Le vent, l'eau et la biomasse ont été - jusqu'à la fin du XVIII<sup>ème</sup> siècle - les sources d'énergie principales de l'humanité, à un point tel que nous avons failli y perdre notre forêt...

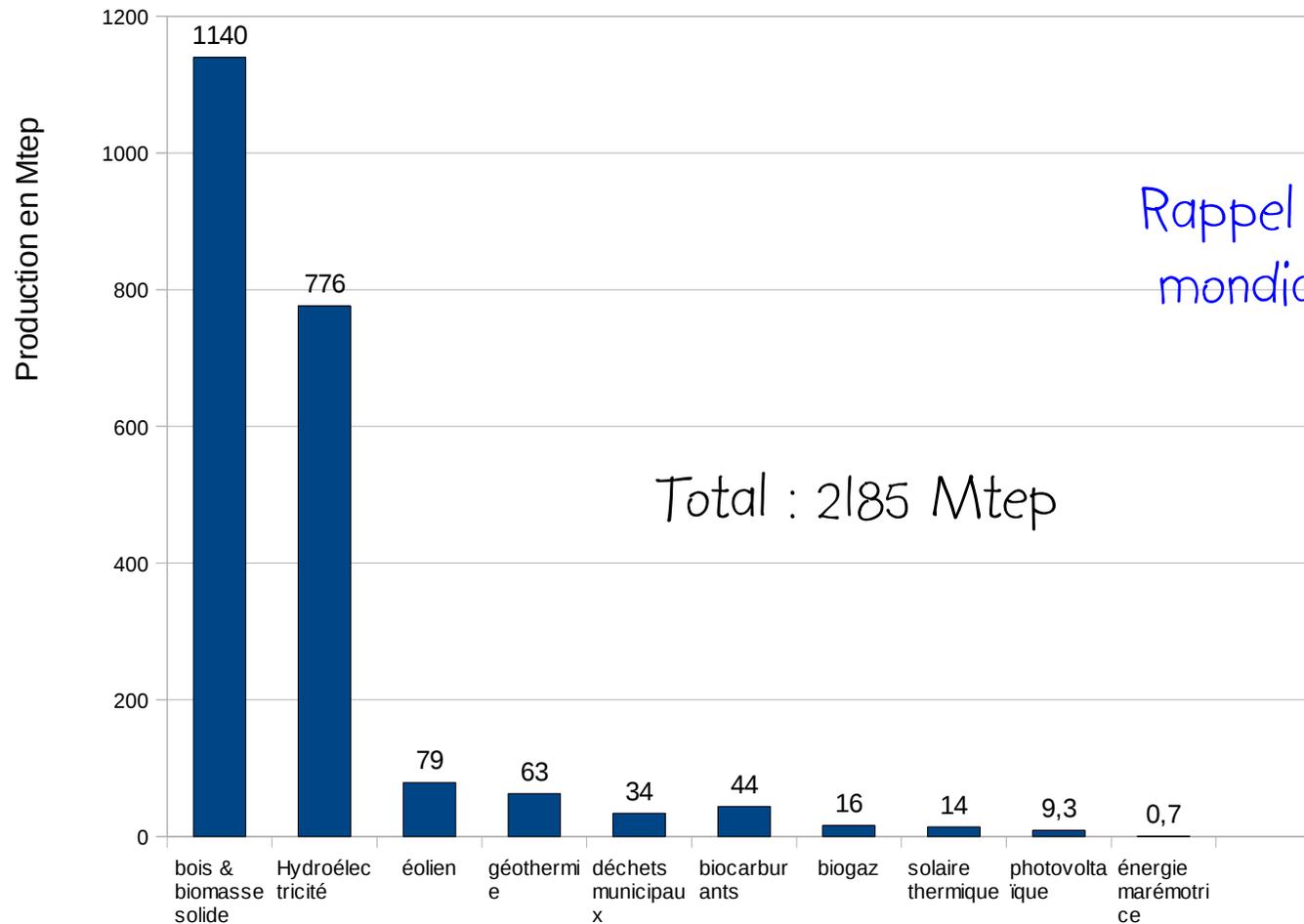
Mises à part les marées, toute source d'énergie renouvelable est abondée par le soleil, notre seul réel apport énergétique extraterrestre.

L'irradiance solaire (la constante solaire) est de  $1368 \text{ W m}^{-2}$ , ce qui correspond à une puissance totale radiée sur le globe terrestre de 175 000 TW soit

11 000 fois la puissance mondiale moyenne consommée, mais :

- 30% du total sont réfléchis dans l'espace par l'atmosphère ;
- 45% sont convertis en chaleur ;
- et les 25% restants alimentent l'évaporation de l'eau (22%), les vents (2%), la photosynthèse (0,06%)...

### 3. Contributions des énergies renouvelables



Rappel : Consommation mondiale d'énergie : ~13 GTep

Total : 2185 Mtep

Contributions à la production mondiale d'énergie renouvelable en 2010

Le total des énergies renouvelables représente un peu plus de 16% de la conso mondiale, mais il est très largement dominé par la biomasse et l'hydroélectricité. Les énergies renouvelables déconcentrées contribuent à environ 2% du total. Cependant, elles sont en hausse régulière.

## 4. Énergie solaire : données sur l'irradiance

Elle varie considérablement selon :

- l'heure et le jour ;
- la couverture nuageuse ;
- la latitude ;
- la turbidité de l'atmosphère (teneur en poussières qui la troublent) ;
- l'orientation et l'inclinaison du plan irradié.

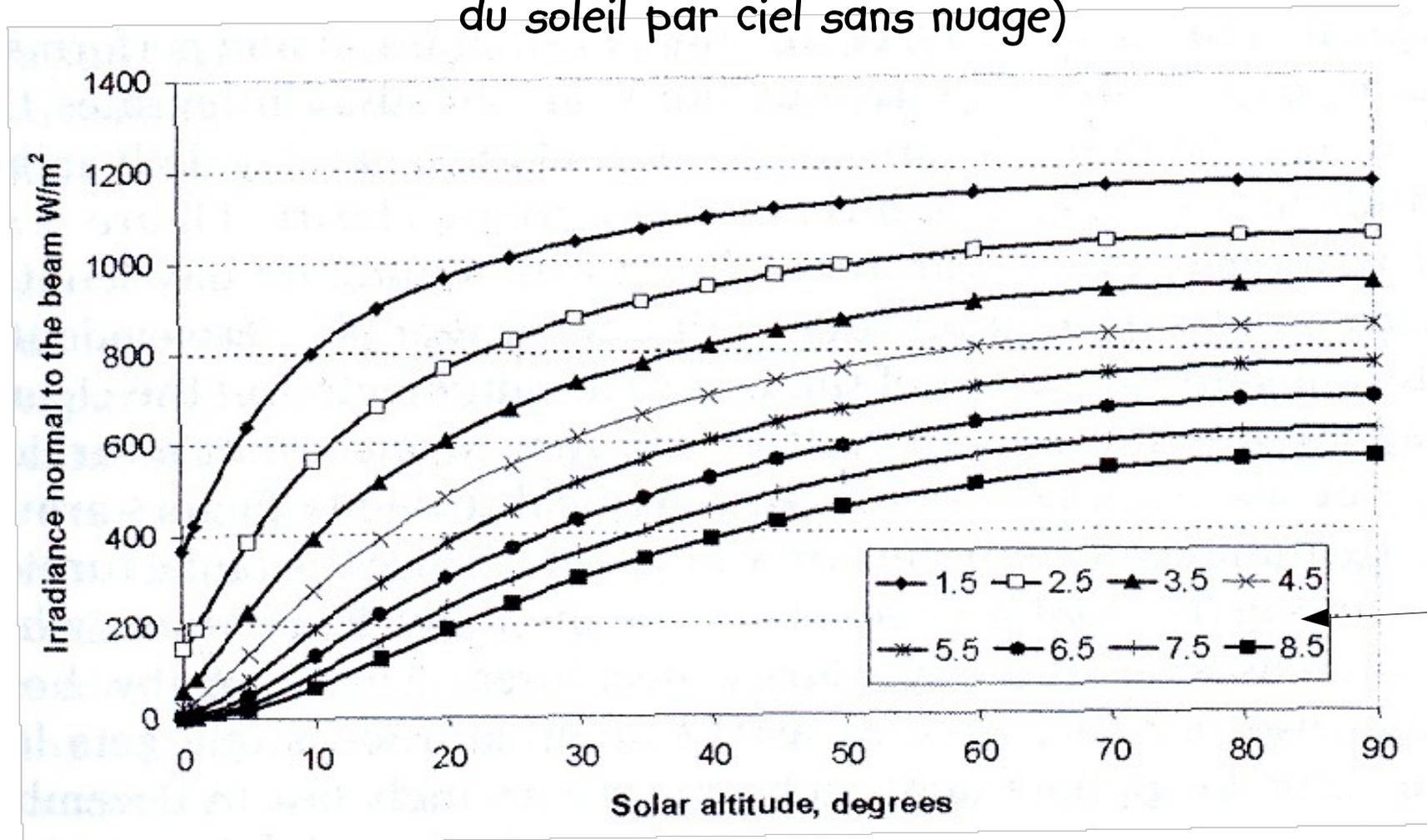
En bref, il est très difficile d'être très précis sur les prédictions d'irradiance solaire. C'est une énergie intermittente qui requiert un stockage local ou global sur un réseau.

En moyenne sur une année, l'irradiance solaire est d'environ :

- 6 kWh/m<sup>2</sup>/jour dans les déserts tropicaux ;
- 1 kWh/m<sup>2</sup>/jour dans les régions polaires ;
- de 3 à 5 kWh/m<sup>2</sup>/jour en France (nord-sud).

Exercice : Calculez la surface nécessaire de panneaux photovoltaïques pour produire l'équivalent de la consommation annuelle énergétique française (270 Mtep) avec un rendement photovoltaïque de 10%.

5. Énergie solaire : irradiance directe au niveau de la mer  
(surface perpendiculaire à la direction de visée  
du soleil par ciel sans nuage)



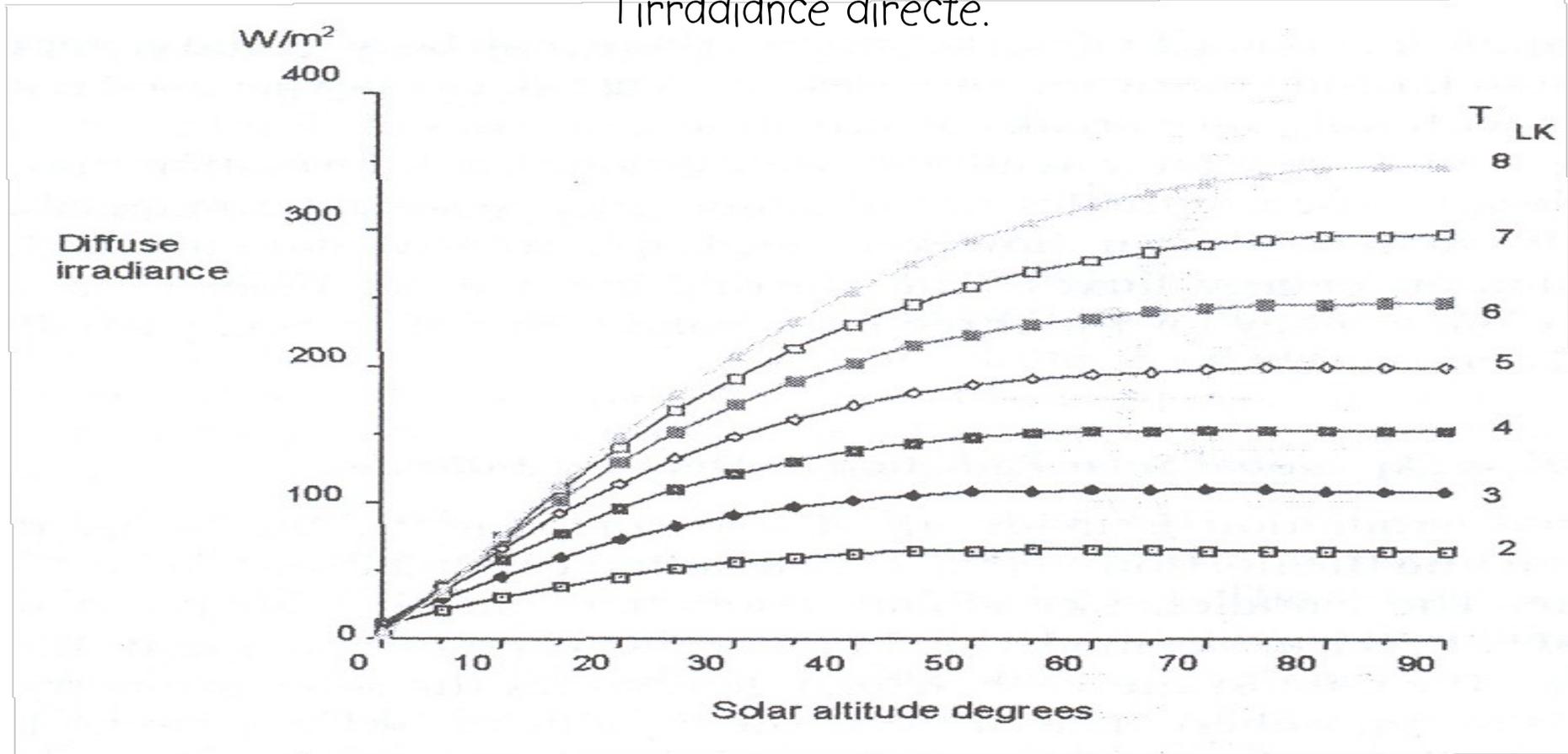
Indice de turbidité de Linke de l'atmosphère

Altitude solaire : angle entre l'horizontale et la direction de visée du soleil

## 6. Énergie solaire : irradiances diffuse

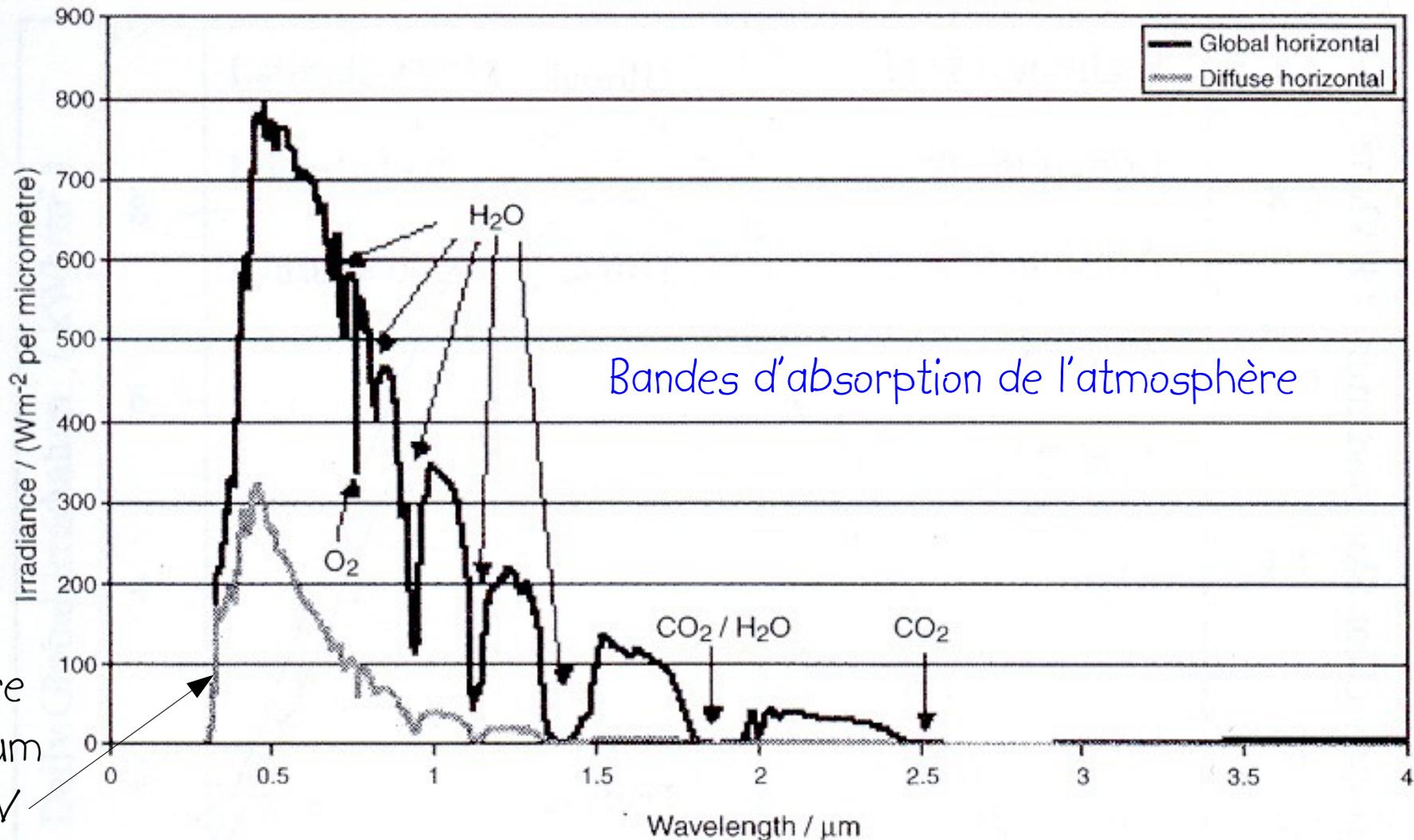
Il existe une *irradiance directe* et une *irradiance diffuse* (lumière solaire diffusée par l'atmosphère)

La turbidité accroît l'irradiance diffuse et réduit l'irradiance directe.



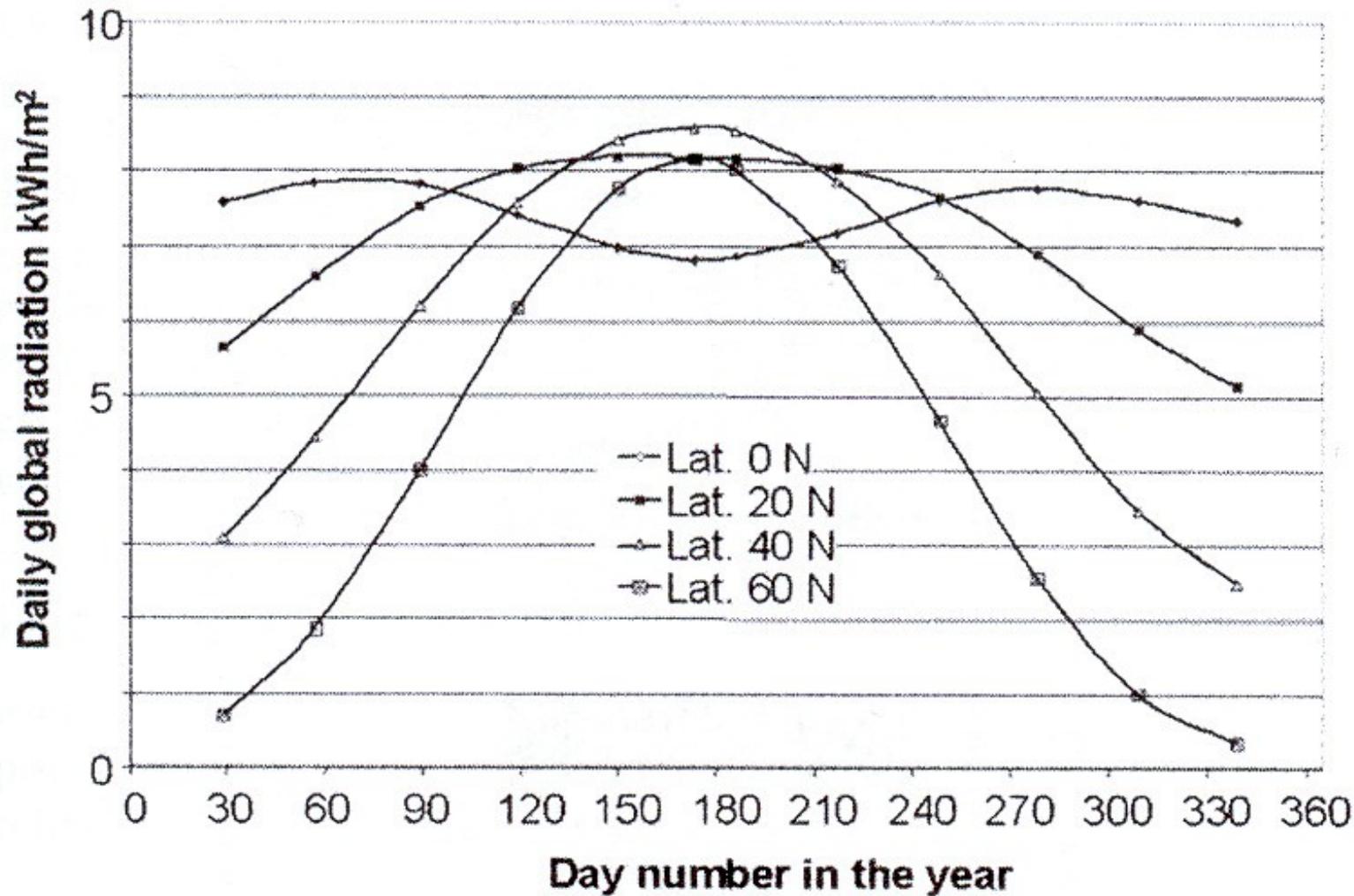
Sur une surface horizontale et sous un ciel sans nuage.

## 7. Énergie solaire : spectre solaire



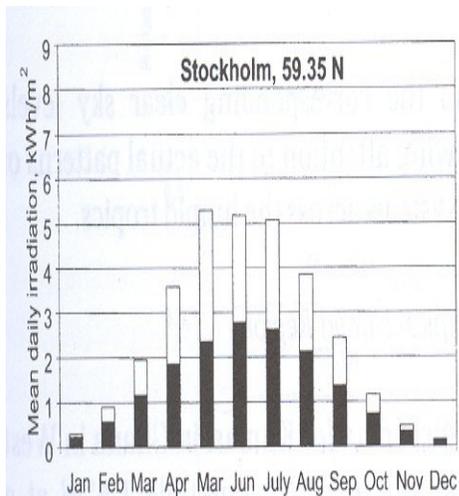
Sur une surface horizontale, une altitude solaire de  $30^\circ$  et sous un ciel sans nuage.

## 8. Énergie solaire : irradiation journalière dans l'hémisphère nord

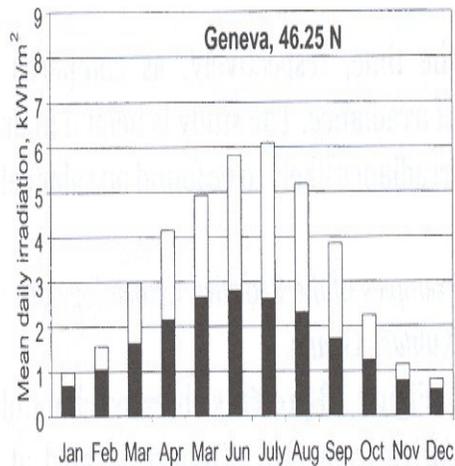


Sur une surface horizontale et une turbidité de 3,5 (valeur moyenne) par ciel découvert.

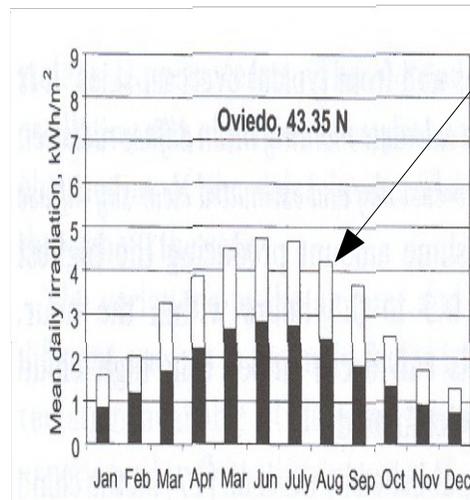
# 9. Énergie solaire : irradiations journalières pour 6 villes



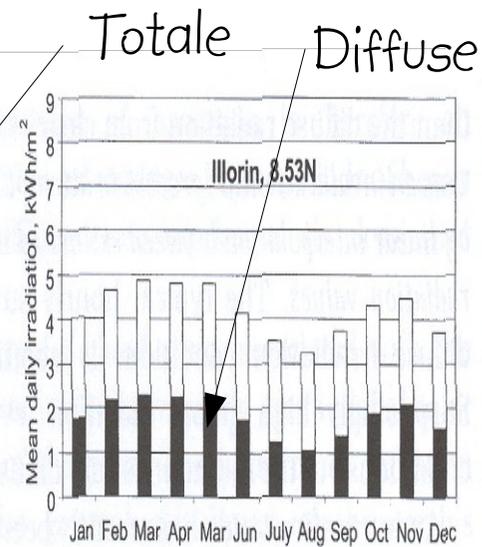
(a)



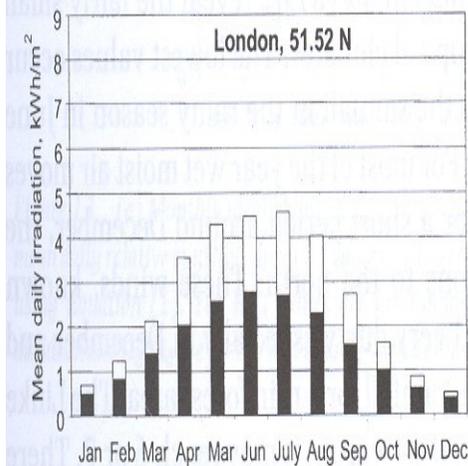
(c)



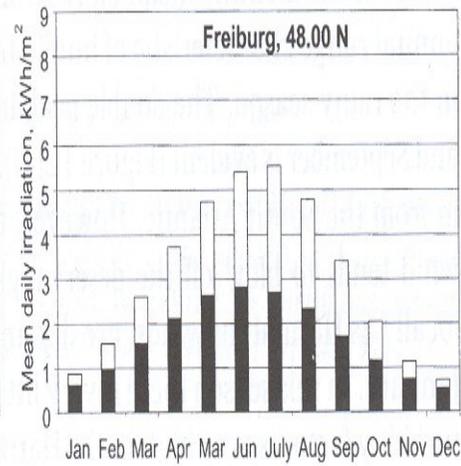
(e)



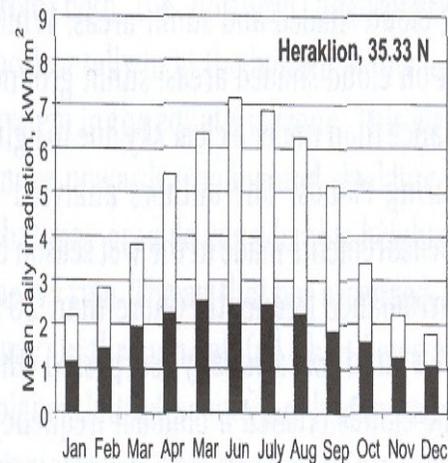
région  
tropicale humide



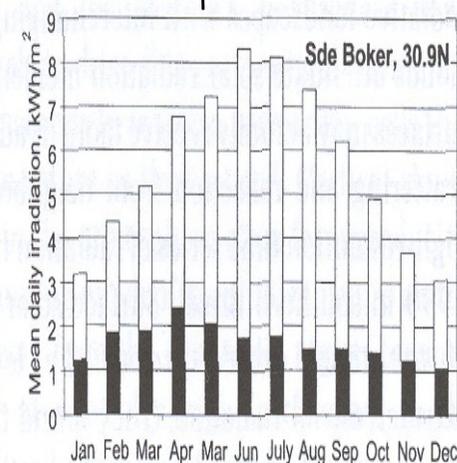
(b)



(d)



(f)



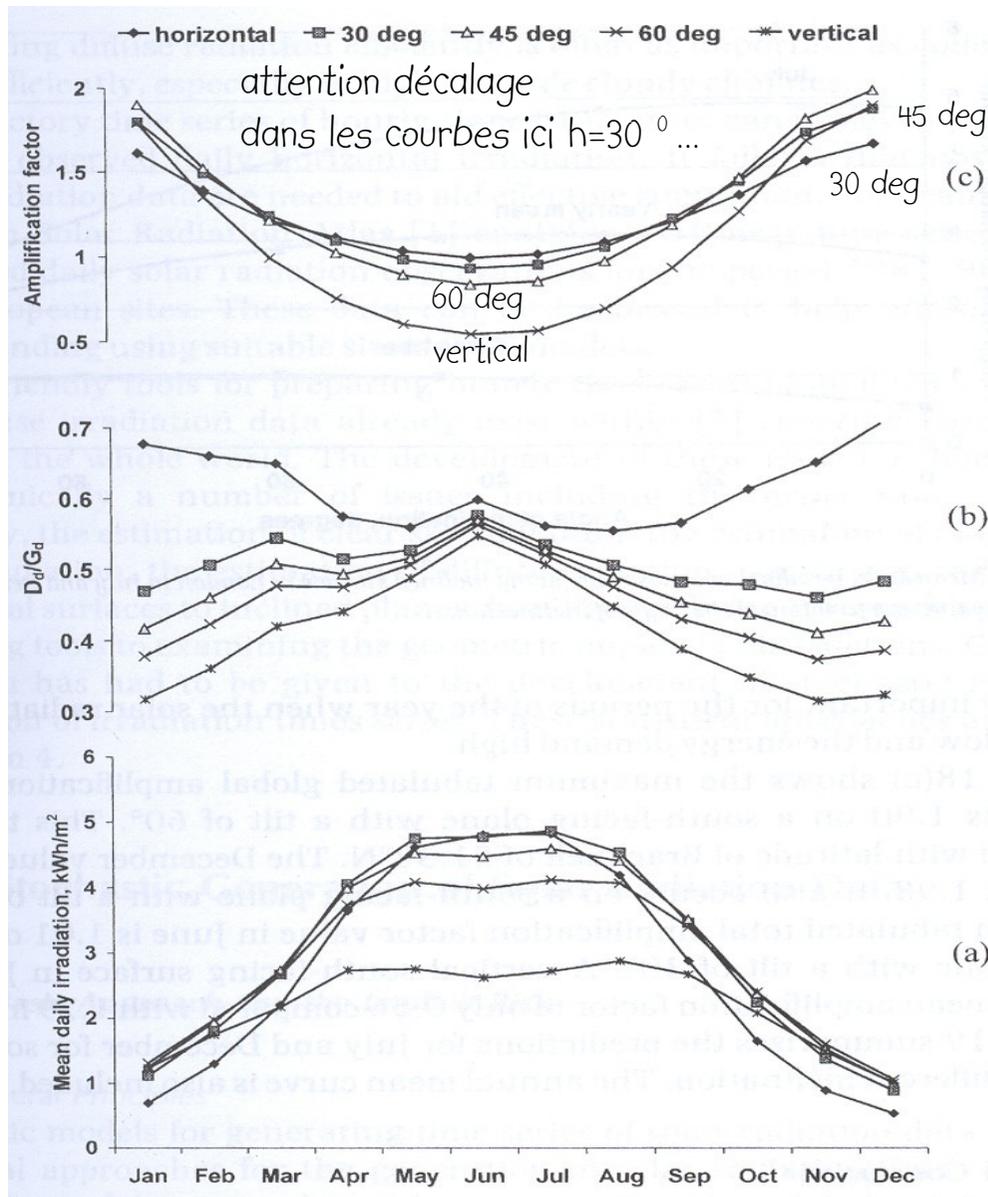
(h)

Désert

Sur une surface horizontale

# 10. Énergie solaire : effet de l'inclinaison sur l'irradiation

Pour Londres



facteur d'amplification / irradiation horizontale

irradiation diffuse / irradiation totale

irradiation en fonction de l'angle d'inclinaison

Un angle d'inclinaison permet de réduire la variation été-hiver. En général, on adopte un angle qui est égal à la latitude.

## II. Énergie solaire : production d'énergie primaire terrestre

Rendement théorique de Carnot : ici la source chaude est le soleil (5780 K) et la source froide est l'atmosphère ( $\sim 15^\circ\text{C}$ ), le rendement théorique maximal est alors :  $1 - T_f / T_c = 95\%$  ! En pratique nous n'en sommes pas là, (40-60% Th. , 4-40% PV) mais Carnot n'interdit pas de réaliser des progrès !

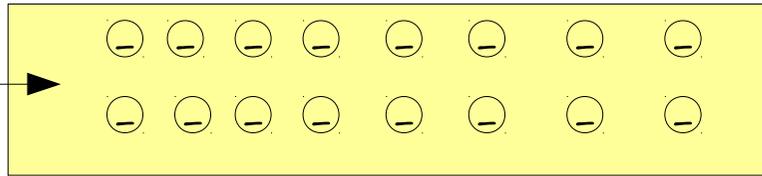
Selon que l'on produit de la chaleur ou de l'électricité, on distingue le **solaire thermique** ou **thermodynamique** (si la chaleur est utilisée pour produire de l'électricité ou une autre forme d'énergie convertible) et le **solaire photovoltaïque** (production directe d'électricité).

## 12. Effet photovoltaïque

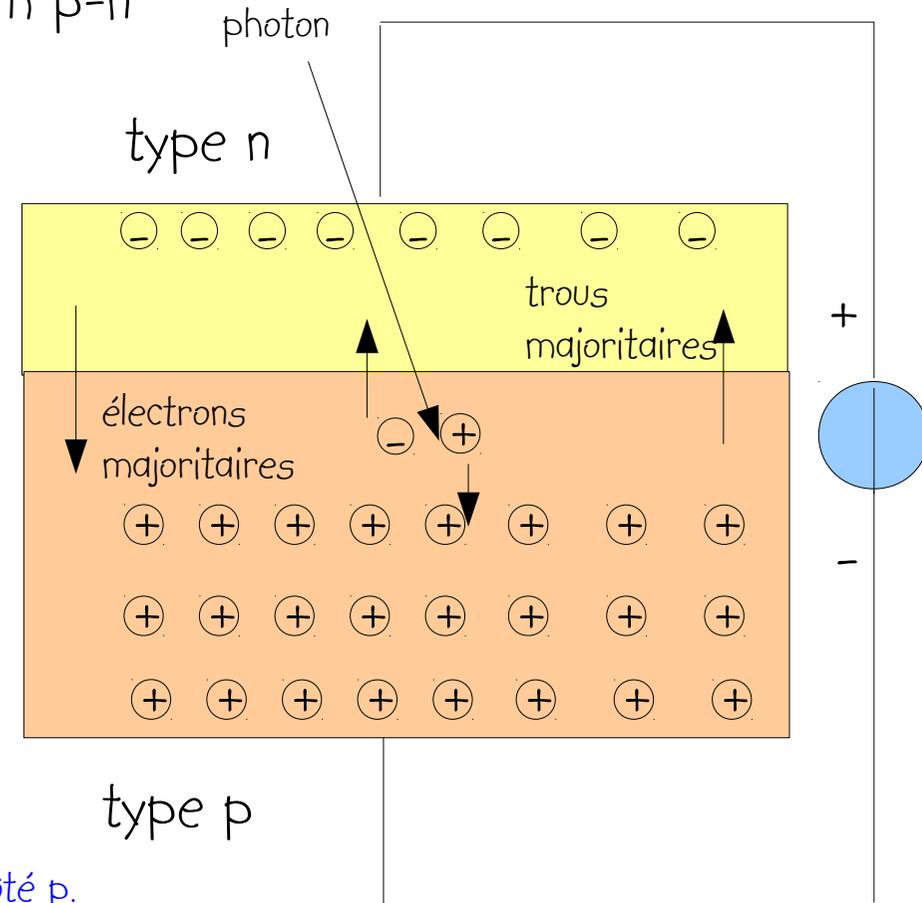
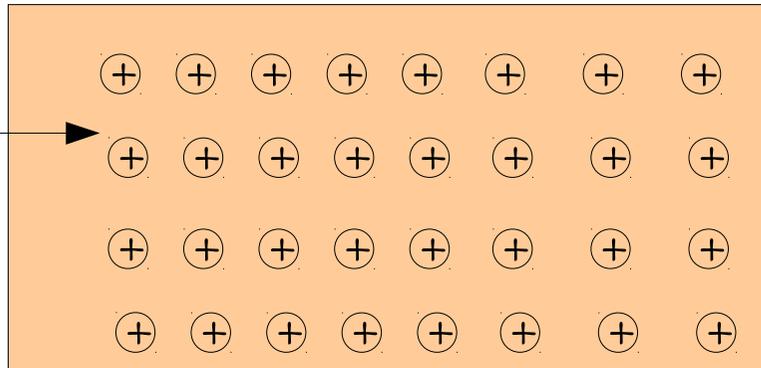
Découvert en 1839 par Antoine Becquerel l'arrière grand père d'Henri qui a mis en évidence la radioactivité ! Les premières applications sont apparues au début du XX<sup>ème</sup> siècle pour la photographie et bien plus tard (1960) pour l'alimentation des satellites, pour des montres, des calculettes, des sites autonomes...

Effet photovoltaïque dans une diode en silicium p-n

Silicium de type n,  
possède une petite  
concentration  
d'électrons libres.  
Dopage avec du  
phosphore.

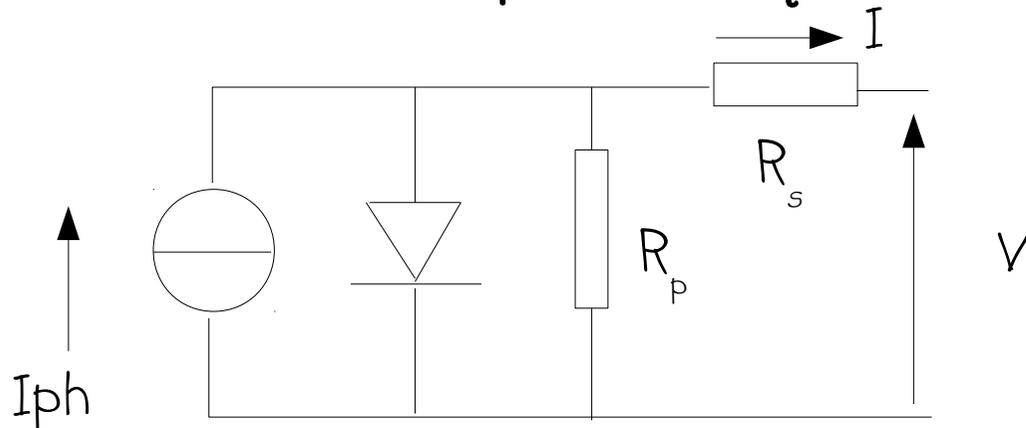


Silicium de type p,  
possède une petite  
concentration  
de trous (sites mobiles  
accepteurs d'électrons  
libres) . Dopage avec  
du bore.



Un photon ayant une énergie de plus de 1,1 (1,7) eV est converti dans le silicium cristallin (amorphe) en une paire électron-trou. L'électron est attiré par le potentiel positif du côté n alors que le trou migre vers le côté p.

### 13. Effet photovoltaïque : Caractéristiques électrocinétiques



La caractéristique courant-tension de la cellule est donnée par :

$$I = I_{ph} - I_0 \left( \exp\left(\frac{e(V + I R_s)}{n_{id} k T}\right) - 1 \right) - \frac{V + I R_s}{R_p}$$

Courant photo-induit proportionnel à l'irradiance  
 Courant de saturation de la cellule  
 charge de l'électron  
 température de la cellule en K  
 constante de Boltzmann :  $1,381 \cdot 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$   
 facteur empirique (sans unité) idéalement égal à 1

## 14. Effet photovoltaïque : Caractéristiques électrocinétiques

Si  $R_s$  est très petite et  $R_p$  très grande, l'expression précédente peut alors s'écrire :

$$I = I_{ph} - I_0 \left( \exp\left(\frac{V}{V_0}\right) - 1 \right) \quad \text{avec :} \quad V_0 = \frac{n_{id} k T}{e}$$

Un montage en série de  $s$  cellules identiques (avec  $R_s$  très petite et  $R_p$  très grande) est traversé par le même courant  $I$ , mais  $V$  est  $s$  fois plus grand, ce qui conduit à multiplier par  $s$  également  $V_0$  :

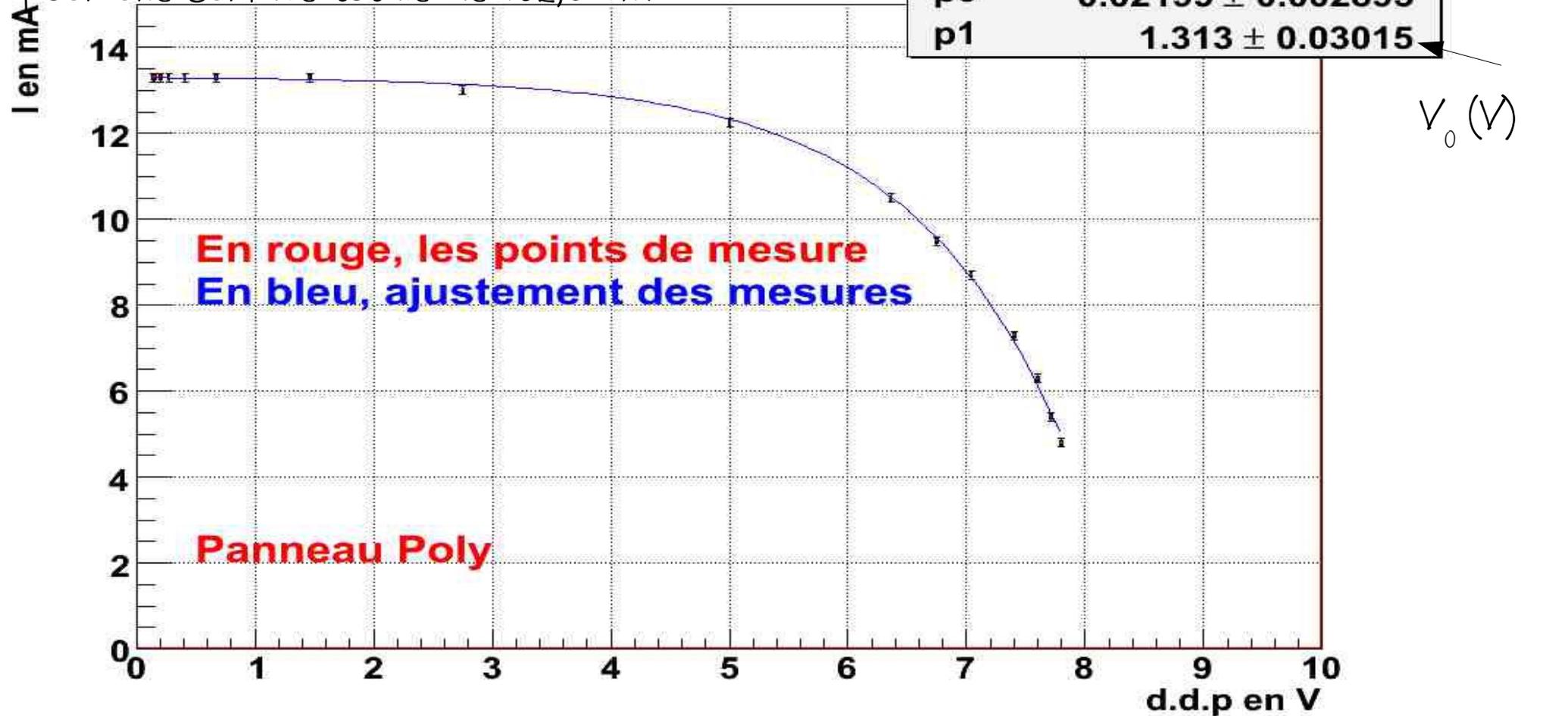
$$I = I_{ph} - I_0 \left( \exp\left(\frac{V}{V_0}\right) - 1 \right) \quad \text{avec :} \quad V_0 = s \frac{n_{id} k T}{e} \quad \text{où } s \text{ est le nbre de cellules montées en série}$$

Chaque association en série de  $s$  cellules peut être vue comme une grosse cellule photovoltaïque produisant pour un même courant une tension multipliée par  $s$ .

Chaque association en parallèle de  $p$  cellules produira pour une même tension un courant multiplié par  $p$ .

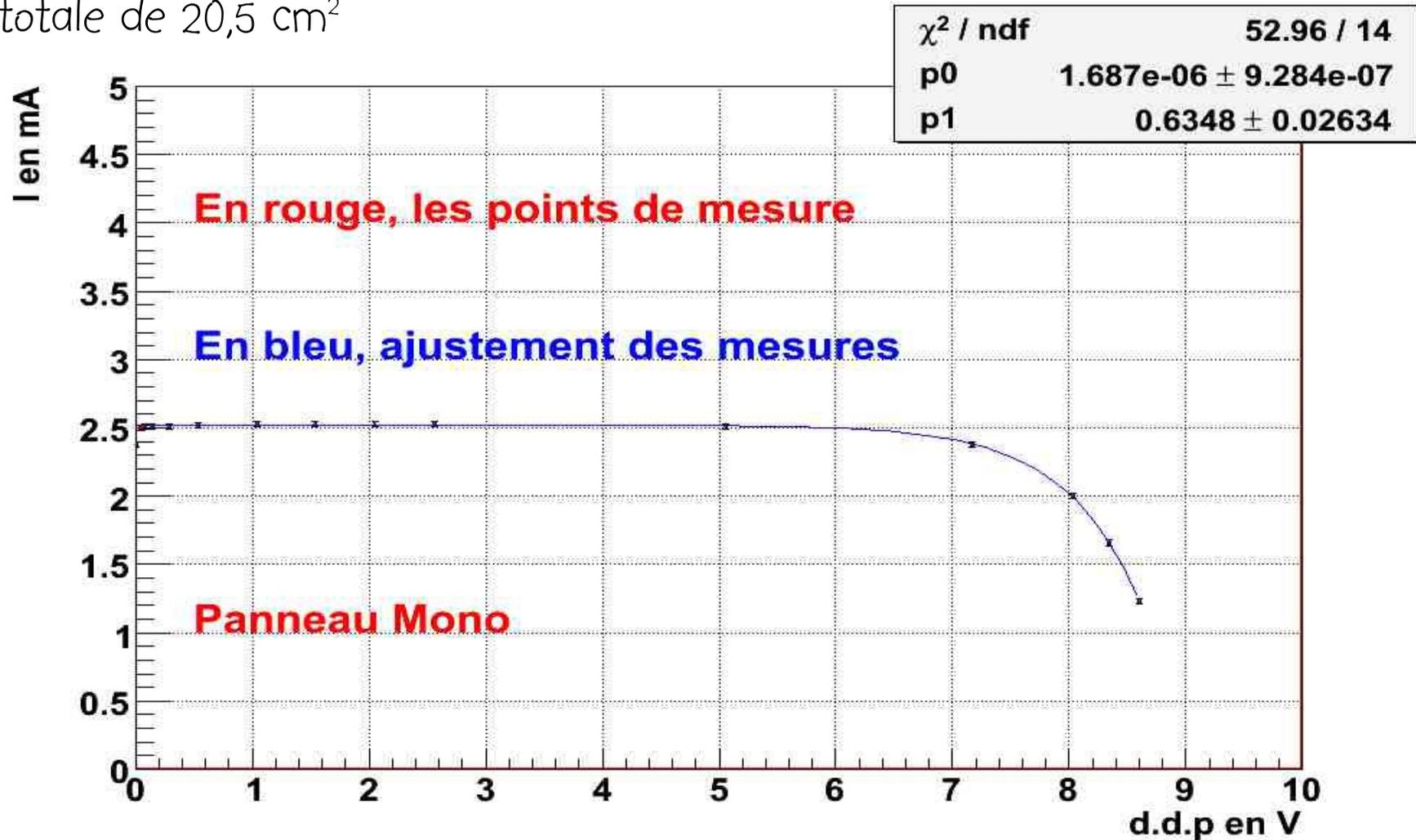
# 15. Effet photovoltaïque : exemple panneau de silicium polycristallin

Composé de 18 cellules identiques montées en série pour une surface totale de 102,6 cm<sup>2</sup>



$$T \sim 30 \text{ } ^\circ\text{C} , V_0 = 1,31 \text{ V} \rightarrow n_{id} = 2,78$$

16. Effet photovoltaïque : exemple panneau de silicium monocristallin  
composé de 18 cellules en série pour une surface  
totale de 20,5 cm<sup>2</sup>



$T \sim 30 \text{ }^\circ\text{C}$  ,  $V_0 = 0,63 \text{ V}$   $\rightarrow n_{id} = 1,34$

## 17. Effet photovoltaïque : caractéristiques électrocinétiques

Courant de court-circuit  $I_{cc}$ , c.-à-d. pour  $V=0$ ,  $I_{cc} = I_{ph}$  qui est proportionnel à l'irradiance.

Tension à circuit ouvert  $V_{co}$ , c.-à-d. pour  $I=0$  :  $V_{co} = V_0 \ln\left(1 + \frac{I_{cc}}{I_0}\right)$

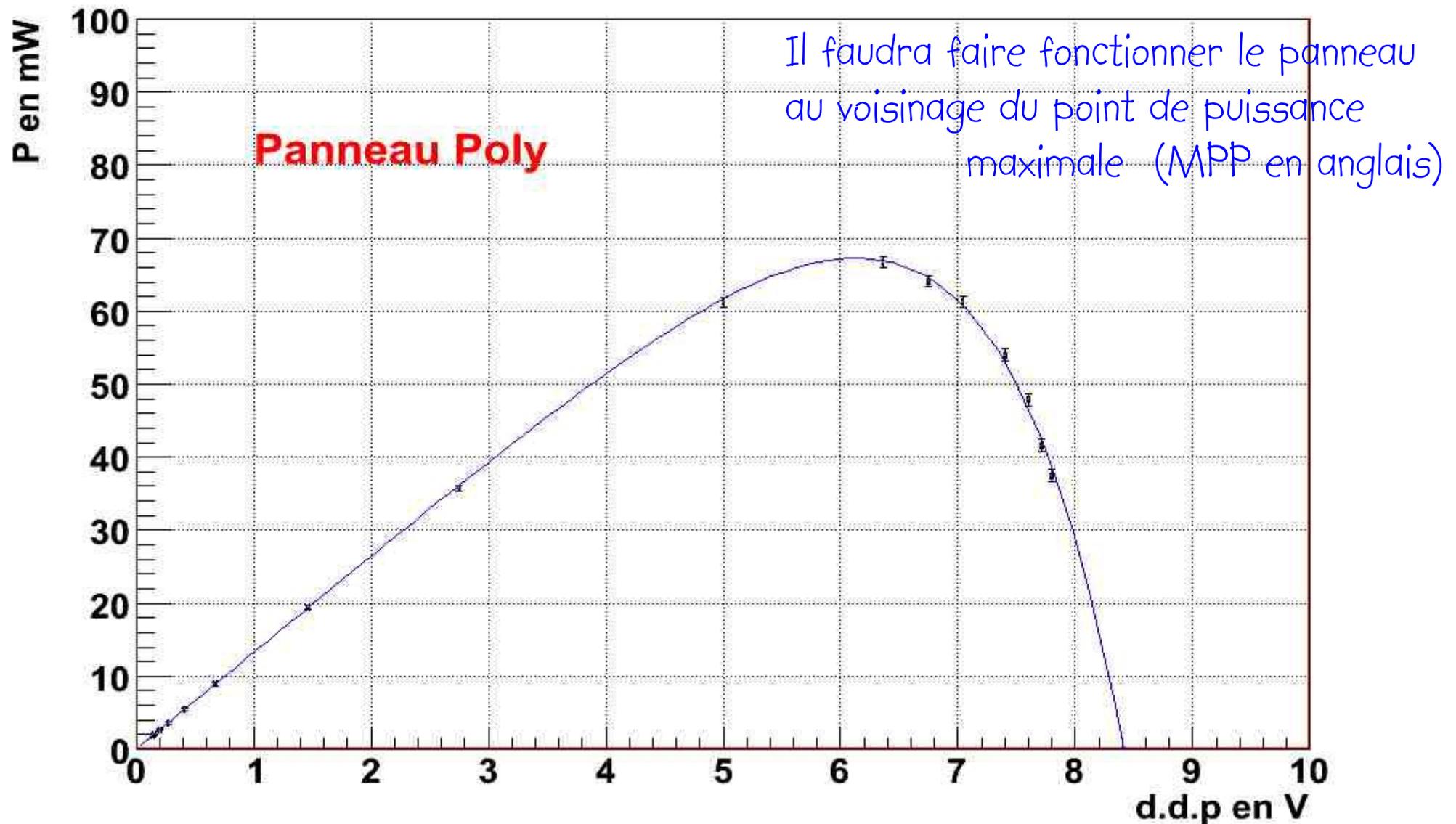
exemples précédents :

$$\text{PC} : I_{cc} = 13,3 \text{ mA} , V_{co} = 1,31 \ln\left(1 + 13,3 / 0,22\right) = 8,39 \text{ V} \left(8,37 \text{ V mesuré}\right)$$

$$\text{Mono} : I_{cc} = 2,52 \text{ mA} , V_{co} = 0,635 \ln\left(1 + 2,52 / 1,69 \cdot 10^{-6}\right) = 9,02 \text{ V} \left(9,25 \text{ V mesuré}\right)$$

## 18. Effet photovoltaïque : caractéristiques électrocinétiques

À  $V=0$ , le courant est maximal mais la puissance ( $VI$ ) est nulle !



## 19. Effet photovoltaïque : caractéristiques électrocinétiques

Le facteur de remplissage est défini comme :

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{CC} \cdot V_{CO}} \simeq \frac{\frac{V_{CO}}{V_0} - \ln\left(\frac{V_{CO}}{V_0} + 0,72\right)}{\frac{V_{CO}}{V_0} + 1} \quad \text{avec : } \frac{V_{CO}}{V_0} = \ln\left(1 + \frac{I_{CC}}{I_0}\right)$$

exemples : PC : FF = 60% , Mono : FF = 75%

Et la tension de point maximal de puissance est donnée par :

$$\exp\left(\frac{V_{max}}{V_0}\right)\left(1 + \frac{V_{max}}{V_0}\right) = \left(\frac{I_{CC}}{I_0} + 1\right) \quad \text{qui est une équation transcendante}$$

$V_{max}$  sera une fonction légèrement croissante de  $I_{CC}$  donc de l'irradiance .

## 20. Effet photovoltaïque : efficacité quantique & sensibilité

Le courant total photo-induit peut être obtenu par :

$$I_{ph} = e \int_{\lambda} \Phi(\lambda) EQE(\lambda) d\lambda$$

nbre de photons reçus par seconde et par unité de longueur d'onde

charge de l'électron

longueur d'onde de la lumière incidente

efficacité quantique externe : probabilité de création d'un électron circulant par photon incident en fonction de la longueur d'onde

La densité de courant est le courant photo-induit par unité de surface de la cellule :  $J_{cc}$  ( $\text{mA} \cdot \text{cm}^{-2}$ )

$\Phi_0 = \frac{hc}{S} \int_{\lambda} \frac{\Phi(\lambda)}{\lambda} d\lambda$  est l'irradiance ( $\text{W cm}^{-2}$ ) à laquelle est soumise le panneau

La sensibilité  $\epsilon$  ( $\text{mA /W}$ ) est définie par :  $J_{cc} = \epsilon \Phi_0$

## 21. Effet photovoltaïque : exemple de propriétés d'une cellule

### Electrical Characteristics

Symbol	Cell Parameter	Typical Ratings <sup>2)</sup>	Units
$V_{OC}$	open circuit voltage	630	mV
$J_{SC}$	short circuit current density	35	mA/cm <sup>2</sup>
$V_{mpp}$	voltage at max. power point	505	mV
$J_{mpp}$	current density at max. power point	32.5	mA/cm <sup>2</sup>
$P_{mpp}$	maximum peak power	16.6	mW/cm <sup>2</sup>
FF	fill factor	> 75	%
$\eta$	efficiency	17	%
$\Delta V_{OC}/\Delta T$	open circuit voltage temp. coefficient	-2.1	mV/K
$\Delta J_{SC}/\Delta T$	short circuit current temp. coefficient	0.12	mA/(cm <sup>2</sup> K)
t	cell thickness	250	$\mu\text{m}$

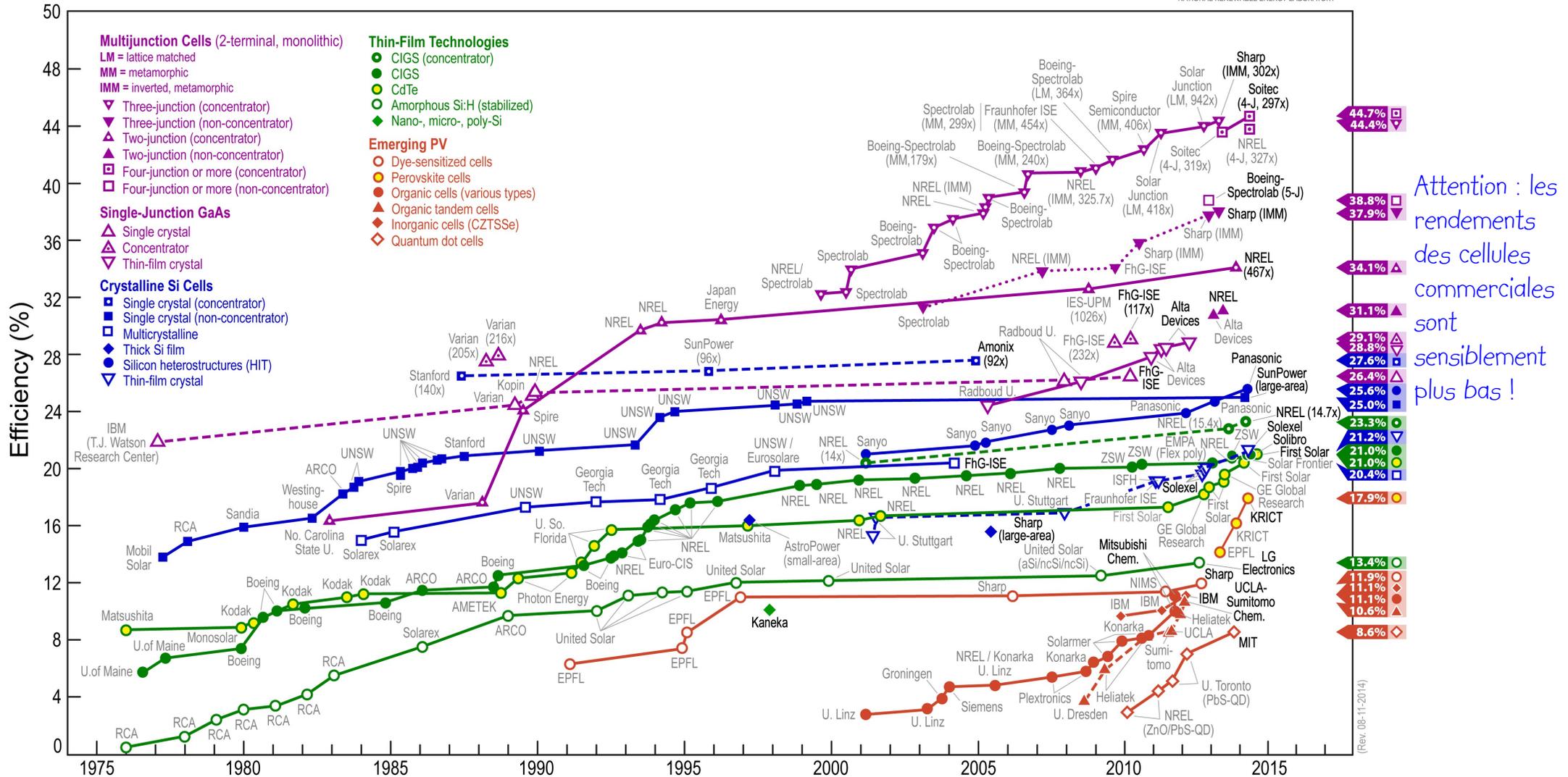
<sup>2)</sup> All values measured at Standard Condition: 1 sun (= 100mW/cm<sup>2</sup>), Air Mass 1.5, 25°C

1 cellule individuelle en silicium monocristallin

# 22. Effet photovoltaïque : rendement énergétique des cellules photovoltaïques

$$\eta = \frac{P_{max}/S}{\Phi_0} = \frac{I_{CC} \cdot V_{CO} \cdot FF}{S \Phi_0}$$

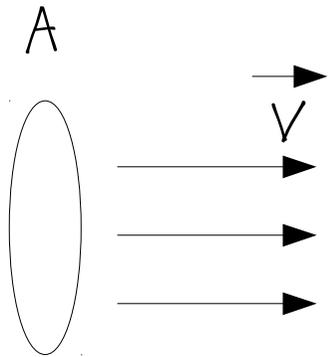
## Best Research-Cell Efficiencies



Attention : les rendements des cellules commerciales sont sensiblement plus bas !

## 23. énergie éolienne : puissance transportée par un vent non perturbé

Vent sans perturbation possédant une vitesse homogène  $V$  et qui souffle à travers une surface  $A$  perpendiculaire à la direction de l'écoulement :



Le débit massique d'air à travers la surface  $A$  est donné par :

$$\frac{dm}{dt} = \rho AV$$

masse volumique  
de l'air.

La puissance du vent qui s'écoule à travers  $A$  est alors donnée par :

$$P = \frac{dE}{dt} = \frac{d}{dt} \left( \frac{1}{2} m V^2 \right) = \frac{1}{2} \frac{dm}{dt} V^2 = \frac{1}{2} \rho A V^3$$

Cette puissance ne peut pas être récupérée intégralement car cela reviendrait à arrêter le vent. L'air s'accumulerait alors localement !

## 24. énergie éolienne : puissance transportée par un vent non perturbé

$$P/A = \frac{1}{2} \rho V^3$$

La puissance du vent par unité de surface varie donc comme le cube de sa vitesse !

L'hiver - la température étant notablement plus basse que l'été dans les pays nordiques - la masse volumique de l'air augmente en proportion identique. À vitesse égale, la puissance du vent est alors plus grande !

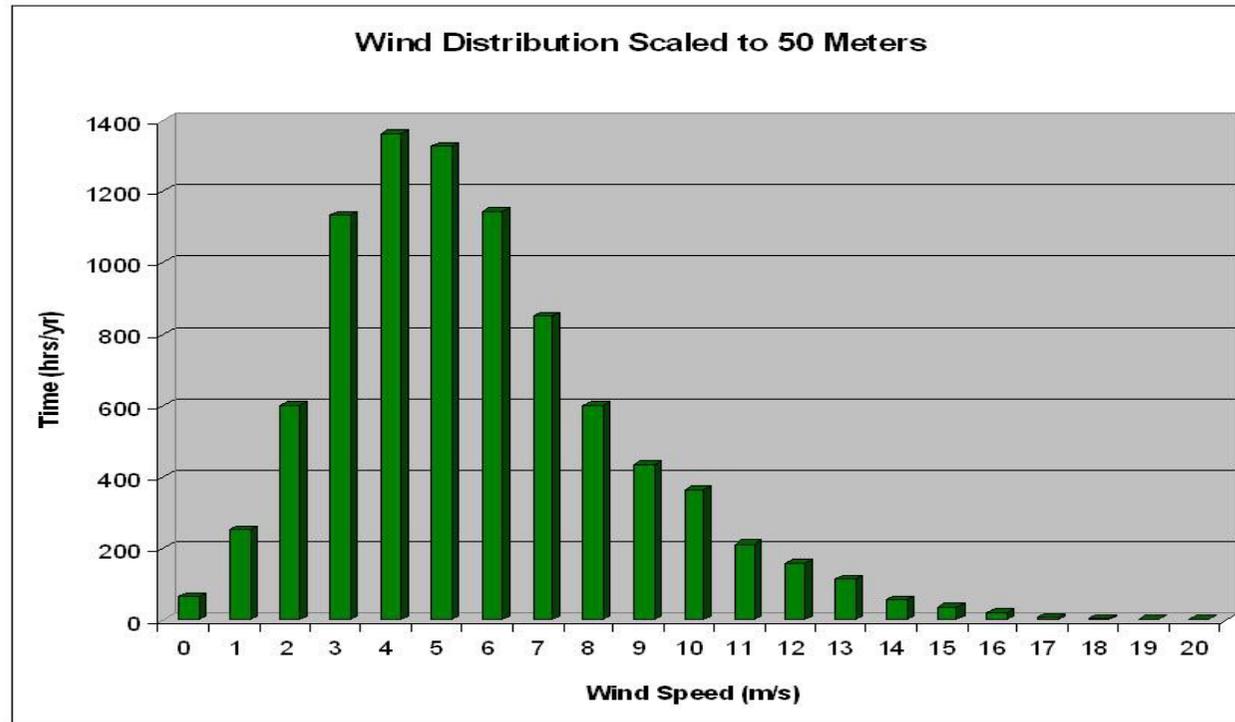
Pour une température moyenne de 9 °C et une pression de 1 bar, la densité de l'air est d'environ 1,25 kg/m<sup>3</sup>.

Si l'on connaît la distribution des fréquences de la vitesse du vent sur l'année on peut alors estimer grossièrement le contenu énergétique annuel du vent par la formule suivante :  $P/A = 5,475 \langle V^3 \rangle \text{ kWh/m}^2/\text{an}$

avec :  $\langle V^3 \rangle = \frac{\sum_i w_i V_i^3}{\sum_i w_i}$  où :  $w_i$  est la fraction de l'année durant laquelle le vent souffle à la vitesse  $V_i$ .

## 25. énergie éolienne : puissance transportée par un vent non perturbé

exemple de distribution annuelle des fréquences de vitesse du vent sur un site  
(à 50 m au-dessus du sol) .

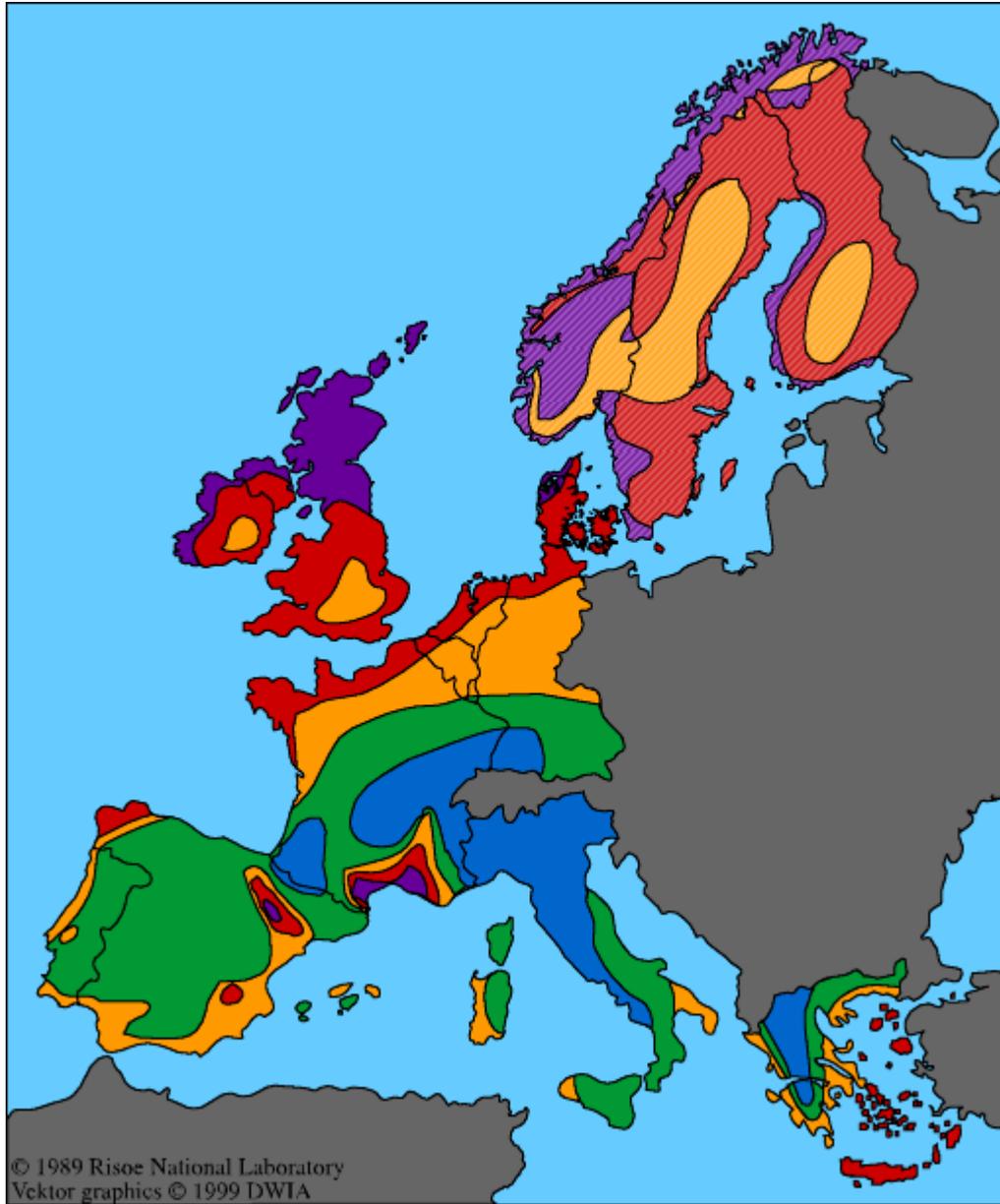


Souvent, celle-ci peut être ajustée par une distribution de Weibull :

$$p(V) = \frac{k}{\lambda} \left(\frac{V}{\lambda}\right)^{k-1} \exp\left(-\left(\frac{V}{\lambda}\right)^k\right)$$

où :  $k$  et  $\lambda$  sont des constantes positives .

## 26. énergie éolienne : puissance transportée par un vent non perturbé



Mesurée à 50 m au-dessus du sol

terrain abrité    plaine ouverte    bord de mer    en mer    collines et crêtes

	m/s	W/m <sup>2</sup>	m/s	W/m <sup>2</sup>						
	>6.0	>250	>7.5	>500	>8.5	>700	>9.0	>800	>11.5	>1800
	5.0-6.0	150-250	6.5-7.5	300-500	7.0-8.5	400-700	8.0-9.0	600-800	10.0-11.5	1200-1800
	4.5-5.0	100-150	5.5-6.5	200-300	6.0-7.0	250-400	7.0-8.0	400-600	8.5-10.0	700-1200
	3.5-4.5	50-100	4.5-5.5	100-200	5.0-6.0	150-250	5.5-7.0	200-400	7.0-8.5	400-700
	<3.5	<50	<4.5	<100	<5.0	<150	<5.5	<200	<7.0	<400
			>7.5							
			5.5-7.5							
			<5.5							

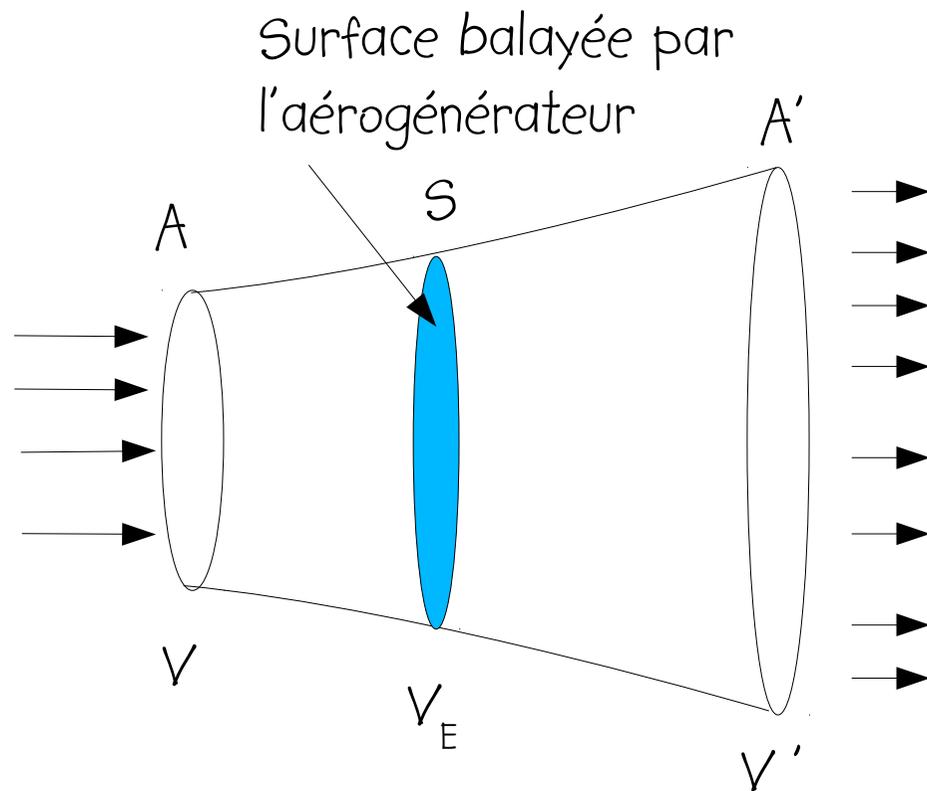
Moyennes annuelles

puissance moyenne  
vitesse moyenne

Pour obtenir les prévisions du contenu énergétique annuel, on multiplie par 8,76 les puissances données ci-dessus en W/m<sup>2</sup> pour un résultat en kWh/m<sup>2</sup>/an.

## 27. énergie éolienne : loi de Betz

On suppose ici qu'un aérogénérateur (une éolienne) est placé dans un tube de courant d'air supposé incompressible (sans accumulation) qui s'écoule de manière stationnaire, sans friction, sans échange d'énergie ni de chaleur avec l'extérieur (autre qu'avec l'éolienne).



$$P_E = \frac{1}{2} \rho S V_E (V^2 - V'^2) \quad (I)$$

À l'entrée et à la sortie du tube, l'écoulement est laminaire.

En l'absence de toute perte énergétique, la puissance transmise à l'éolienne s'écrit :

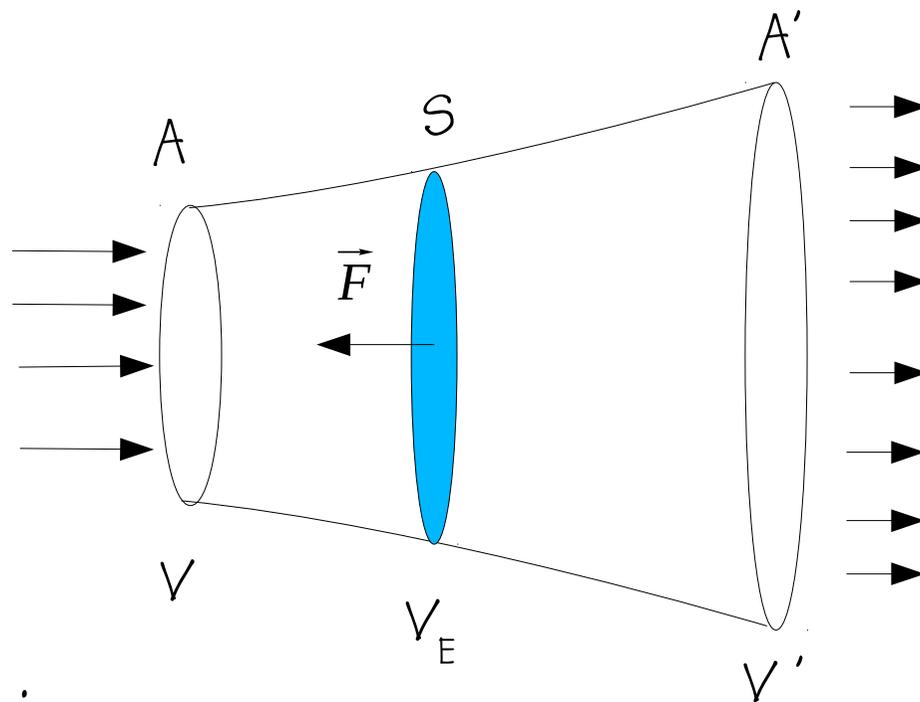
$$P_E = \frac{1}{2} \frac{dm}{dt} (V^2 - V'^2)$$

Dans un écoulement stationnaire, le débit massique est constant :

$$\frac{dm}{dt} = \rho A V = \rho S V_E = \rho A' V'$$

$\rho = \text{cte}$  car l'air est supposé incompressible.

## 28. énergie éolienne : loi de Betz



La masse d'air  $\Delta m$  qui s'écoule pendant le temps  $\Delta t$  (temps de transit dans le tube entre A et A') subit une variation de la quantité de mouvement :

$$\Delta m \cdot V' - \Delta m \cdot V = \Delta m (V' - V) < 0$$

laquelle résulte de la force  $\vec{F}$  appliquée par l'éolienne sur l'air. Le module de F est alors :

$$F = \frac{\Delta m}{\Delta t} (V - V')$$

La puissance transmise à l'éolienne est donc :

$$P_E = -\vec{F} \cdot \vec{V}_E = \frac{\Delta m}{\Delta t} (V - V') V_E$$

$$\frac{\Delta m}{\Delta t} = \frac{dm}{dt} = \rho S V_E$$

$$P_E = \rho S V_E^2 (V - V') \quad (2)$$

## 29. énergie éolienne : loi de Betz

Finalement, il vient : (1) = (2)

$$\rho S V_E^2 (V - V') = \frac{1}{2} \rho S V_E (V^2 - V'^2)$$

$$V_E (V - V') = \frac{1}{2} (V^2 - V'^2) = \frac{1}{2} (V - V')(V + V')$$

$$V_E = \frac{1}{2} (V + V')$$

En posant :  $V_E = V(1-a)$  et  $V' = V(1-2a)$  avec :  $0 < a < 0,5$

$$P_E = \rho S V_E^2 (V - V') = \rho S V^3 (1-a)^2 2a \quad \text{qui est maximale pour : } \frac{dP_E}{da} = 0$$

c.-à-d.  $a = 1/3$

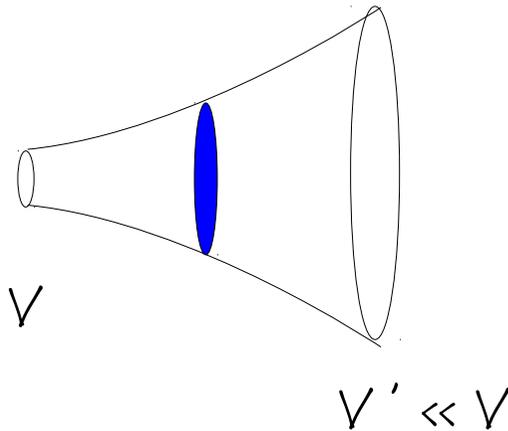
$$P_E^{max} = \frac{1}{2} \rho S V^3 \frac{16}{27} \quad C_P^{max} = \frac{16}{27}$$

C'est la loi de Betz (établie dès 1919 par Alfred Betz)

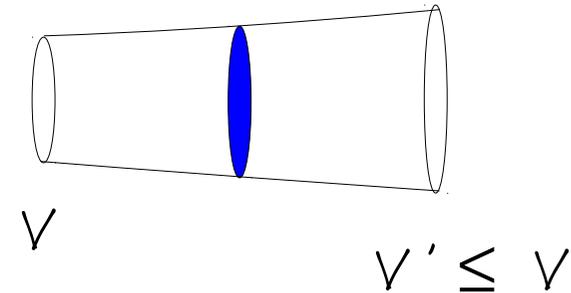
En réalité, la puissance recueillie par une éolienne est toujours inférieure à cette valeur idéale :  $P_E = \frac{1}{2} \rho S V^3 C_P$  où  $C_P$  est le coefficient de puissance  
( $0 < C_P < 16/27$ )

### 30. énergie éolienne : Comprendre la loi de Betz

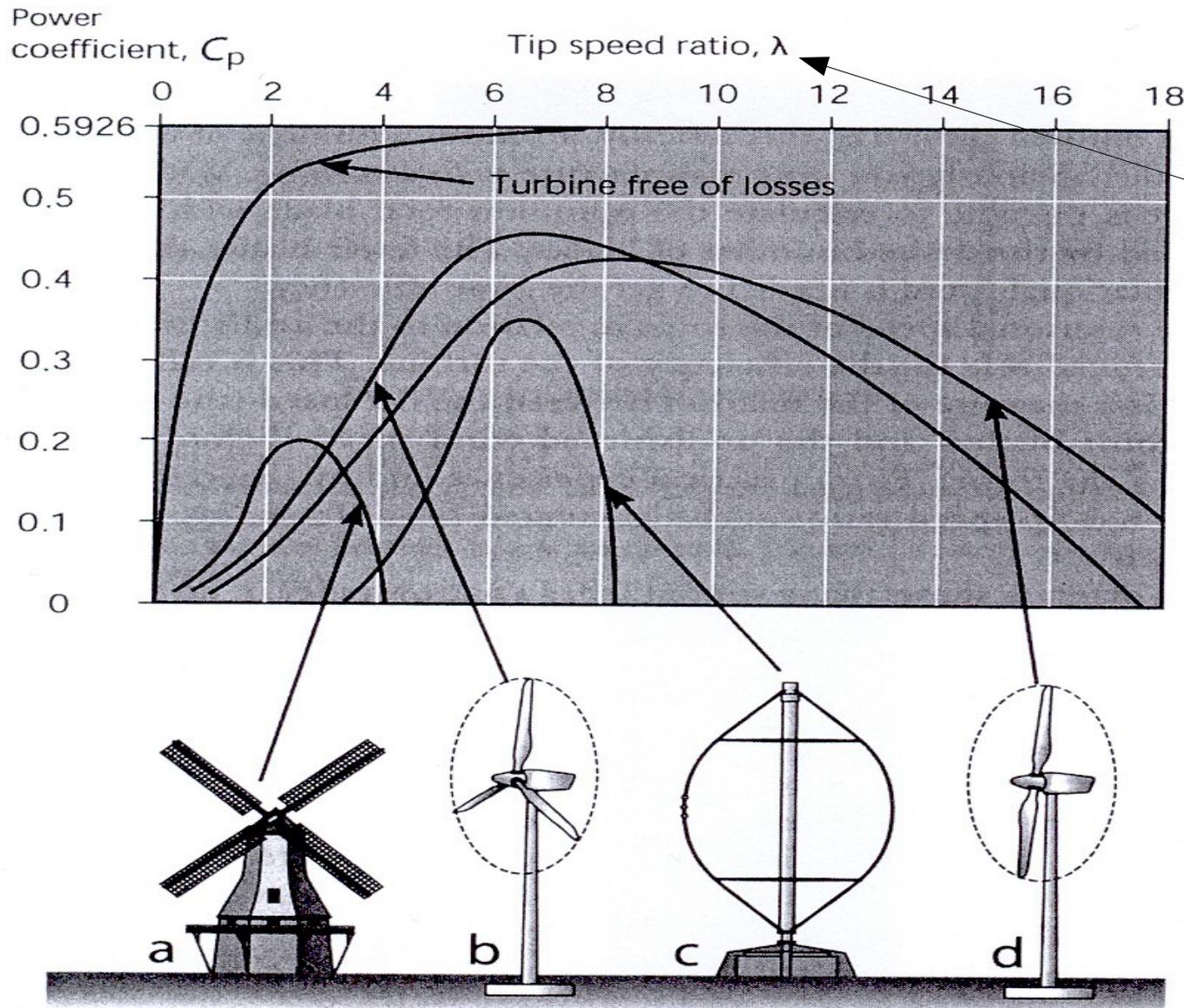
Le débit étant constant dans le tube d'air, si la vitesse du vent est fortement réduite, la section avant du tube - et donc l'énergie captée - est grandement diminuée, alors que si à l'inverse, la section avant est grande, la vitesse à l'arrière est faiblement réduite, ce qui conduit à une énergie transférée à l'éolienne relativement faible. Il existe donc un optimum qui est donné par la loi de Betz.



$$\rho AV = \rho A'V'$$



### 31. énergie éolienne : Coefficient de puissance de quelques aérogénérateurs

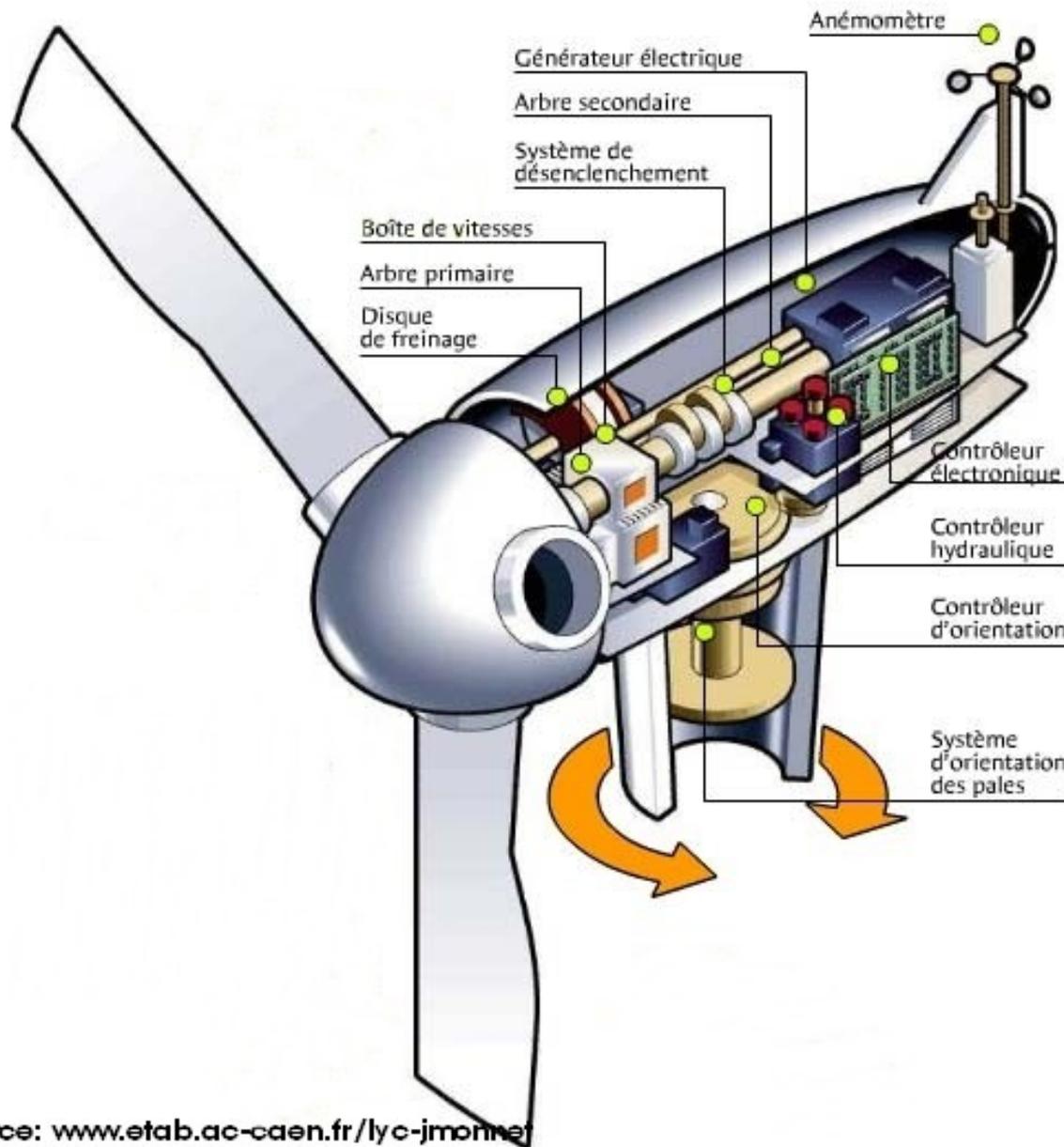


Rapport de la vitesse du bout d'une pale sur la vitesse du vent non perturbé

Les aérogénérateurs à trois pales sont actuellement les plus courants.

Figure 6.8 Tip speed ratio diagrams

## 32. énergie éolienne : technologie



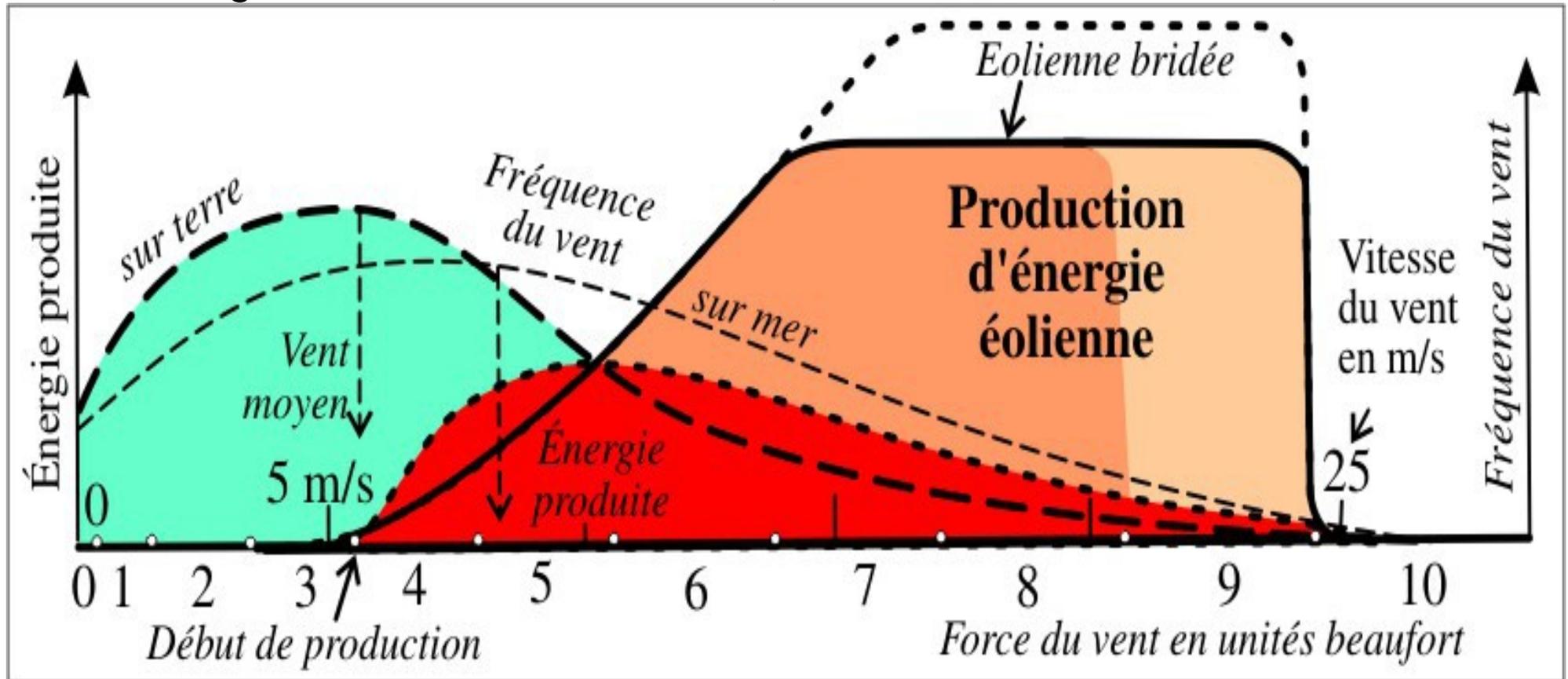
Source: [www.etab.ac-caen.fr/lyc-jrmonnet](http://www.etab.ac-caen.fr/lyc-jrmonnet)

L'éolienne moderne comporte le plus fréquemment 3 pales qui ont une forme d'aile d'avion. Leur fonctionnement est régi par les lois de l'aérodynamique. Les pales sont en matériaux composites : époxy - fibres de verre ou fibres de carbone.

Les pales sont orientables de façon à ajuster l'angle d'attaque de chaque pale (aile) dans le vent apparent (vent réel + vent relatif).

Leur diamètre peut atteindre 126 m pour une hauteur de tour de 198 m et une puissance maximale de 6 MW.

### 33. énergie éolienne : efficacité et performance



En moyenne le facteur de capacité - qui mesure le rapport de la puissance moyenne annuelle sur la puissance nominale d'une éolienne - dépasse rarement 30% .

Pour rappel :  $v(\text{km/h}) = 3 B^{1,5}$  où  $B$  est la force du vent en unités beaufort  
ou encore  $v(\text{m/s}) = 0,83 B^{1,5}$

Un vent de force 7 a une vitesse d'environ 15 m/s. Si l'éolienne tourne avec un rapport  $\lambda$  de 6, le bout des pales se déplace à 330 km/h ! dans l'air.

34. Pour en savoir plus :

- L'Énergie – Ressources, Technologies et environnement,  
C. Ngô – UniverSciences Dunod
- L'Énergie de demain – Techniques, Environnement, Économie –  
J.L. Bobin, E. Huffer, H. Nifenecker – EDP Sciences
- Practical Handbook of photovoltaics : fundamentals and applications  
Tom Markvart & Luis Castaner , Elsevier
- Energy ... beyond oil , Fraser Armstrong & Katherine Blundell, Oxford
- Developing wind power projects - Theory and practice - Tore Wizelius  
- Earthscan