

# La filière Photovoltaïque: le point de la situation

André Mermoud

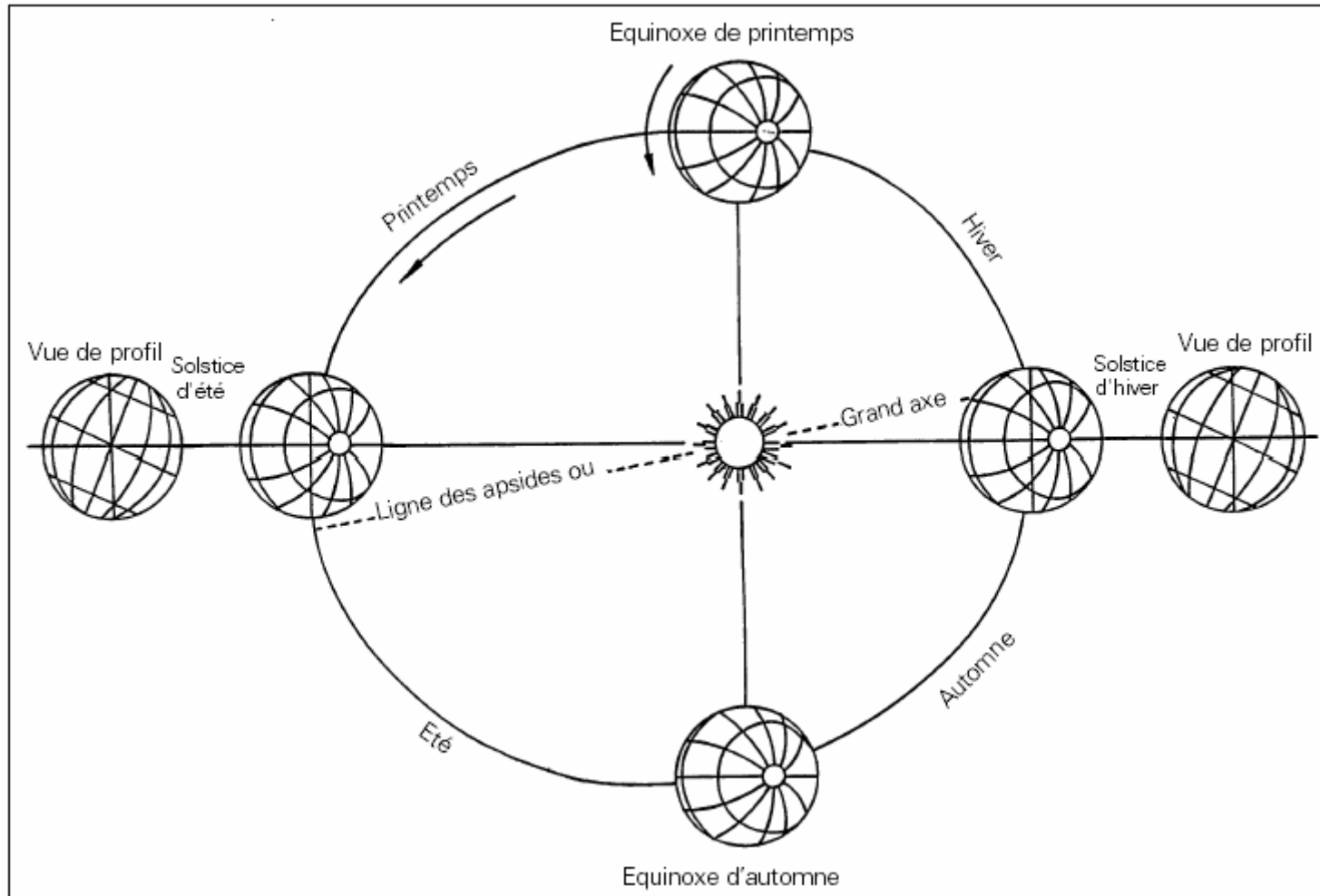
Pôle en Sciences de l'Environnement / Groupe Energie

3 avril 2008

# Sommaire

- Le potentiel solaire
- Les diverses technologies
- Contribution à la production de réseau
- L'évolution du marché - coûts
- L'impact environnemental
- Les grands programmes nationaux
- Le "service" PV décentralisé dans les PVD
- Conclusions

# Le système Terre - Soleil



# Le potentiel solaire

Puissance solaire interceptée par la Terre:

174'000 TW soit 342 W/m<sup>2</sup> moyenne plan horizontal

Au niveau de la mer: reste 50% 169 W/m<sup>2</sup> en moyenne

Energie: 1.5 \* 10<sup>18</sup> kWh/an

6500 x la consommation mondiale d'énergie (10 Gtep)



Surface recevant du soleil  
l'équivalent de la  
consommation d'électricité  
en Suisse :

7 x 7 km<sup>2</sup>

# Petite histoire des photopiles

1839: Antoine Becquerel découvre la production directe d'électricité par la lumière

1912: Einstein explique le mécanisme

1950: Premières cellules PV, pour l'alimentation de satellites

1970-1990: Les cellules évoluent avec le développement de l'industrie de l'électronique et atteignent des prix abordables pour les utilisations isolées

1985-90: Premières installations pour la production d'électricité, couplées au réseau

Dès 1995 ... Programmes nationaux (Allemagne, Japon)  
L'industrie du PV progresse très vite, avec des taux d'expansion de l'ordre de 35% à 45% par an

# Technologies des modules: Cristallins

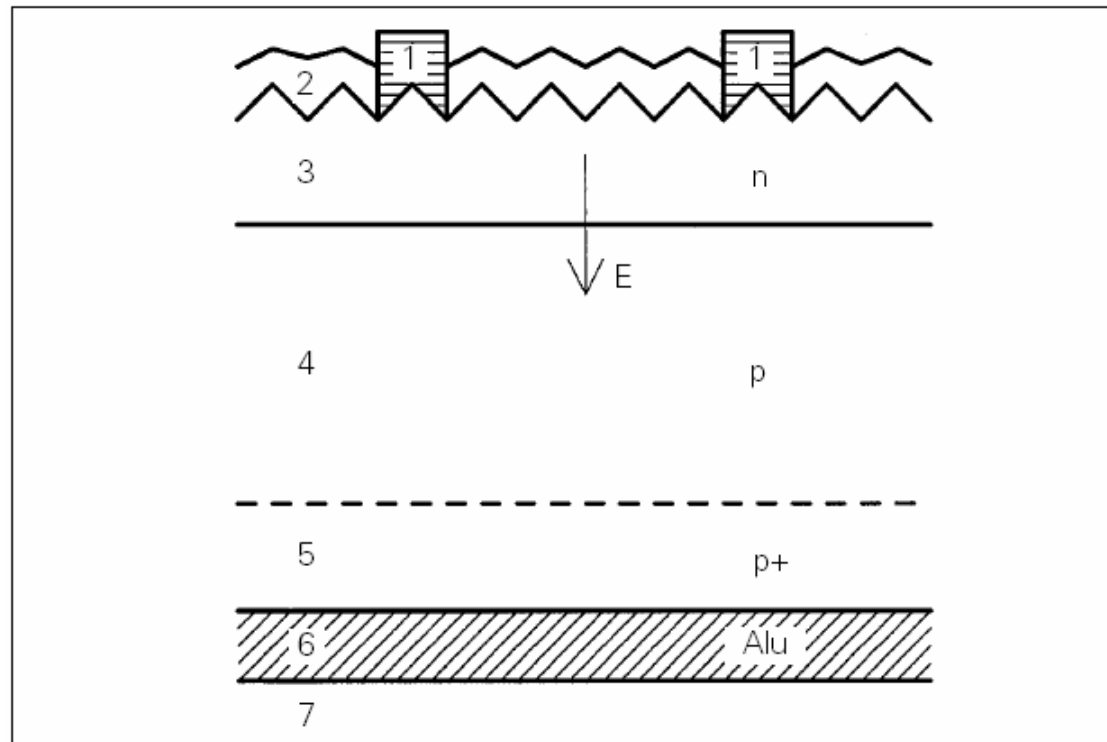
Silicium Monocristallin

Silicium Polycristallin



- Mono- ou PolyCristal de silicium ultra-pur
- Lingot "tiré" (mono) ou coulé (poly)  
(Dimensions typiques: 13x13 ou 15x15 cm<sup>2</sup>, longueur 1m)
- Sciés en plaquettes ("wafers", épaisseur typ. 200 μm),  
(poly: cellules éventuellement tirées en rubans)
- Traitements de surface (anti-reflet, dopage, électrodes)
- Encapsulées dans des modules (typ. 36, 72 cellules)
- Modules typiques: 50 - 200 Wc
- Efficacités courantes: Monocristallins 15-18%
- Polycristallins: environ 2% de moins
- 93% de la production mondiale

# Structure d'une cellule cristalline



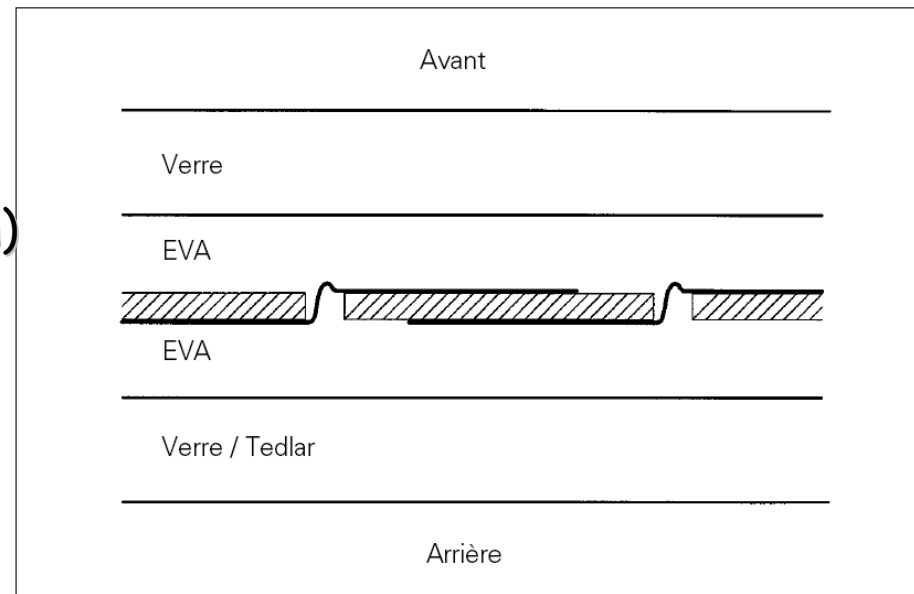
Plaquette de silicium, env 200-300  $\mu\text{m}$

1. Grille de collection avant
2. Couches antireflets
3. Surface avant dopée n et texturée
- 3-4. Jonction et champ électrique
4. Substrat dopé p
- 4-5. BSF, champ arrière
- 5 Dopage p+
- 6 Métallisation aluminium
7. Métallisation soudable

# Structure du module cristallin

## Etapes de fabrication du module:

- Tri des cellules, assemblage de bandes de cellules (soudage de tabs)
- Nettoyage des soudures, Contrôle électrique et optique
- Dépôt d'une couche EVA, bande de cellules, fibre de verre, EVA
- Feuille étanche (kevlar, verre)
- Passage au laminateur:
  - Evacuation de l'air
  - Cycles thermiques (polymérisation)
- Collage boîte de jonction, diodes
- Joint étanche, cadre
- Test en simulateur, tri





# Technologies couches minces

Couches déposées sur un substrat (verre, métal, plastique)

Matériaux avec coeff. d'absorption élevé => Epaisseurs typique 1-2  $\mu\text{m}$

## Silicium amorphe:

- a-Si:H, simple cellule, tandem, triples
- $E_{\text{gap}} = 1.6 \text{ eV}$ , Jonctions p-i-n
- Longueur de diffusion courte => résistivité  $\uparrow$
- Efficacités typiques 4% (simple) - 8% (triple)

## CIS ou CIGS

- $\text{CuInSe}_2$  - Copper-Indium-Selenium + évent. Gallium
- Efficacités typiques 10%

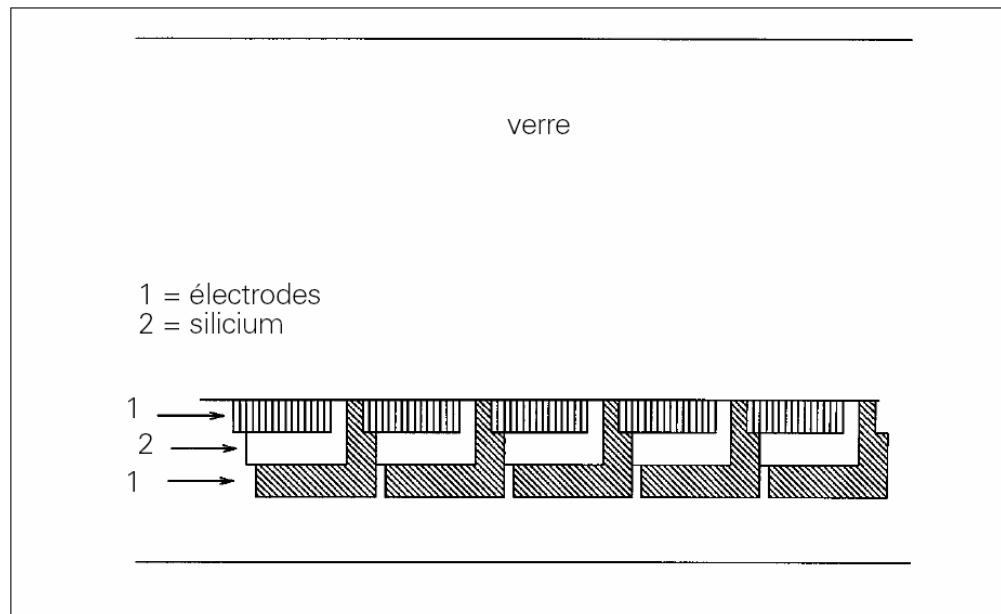
## CdTe

- Technologie simple
- Cadmium (polluant mais en faibles quantités - problèmes de recyclage)
- Efficacités typiques 8% - 10%



# Structure d'un module amorphe

Exemple de réalisation (sur verre), par dépôts de couches successives  
On pourrait avoir les étapes suivantes:



Dépôt d'une métallisation transparente (par ex. oxyde de Zinc) sur tout le verre

Dépôt de a-Si dopé p

Dépôt d'alliage a-Si:H

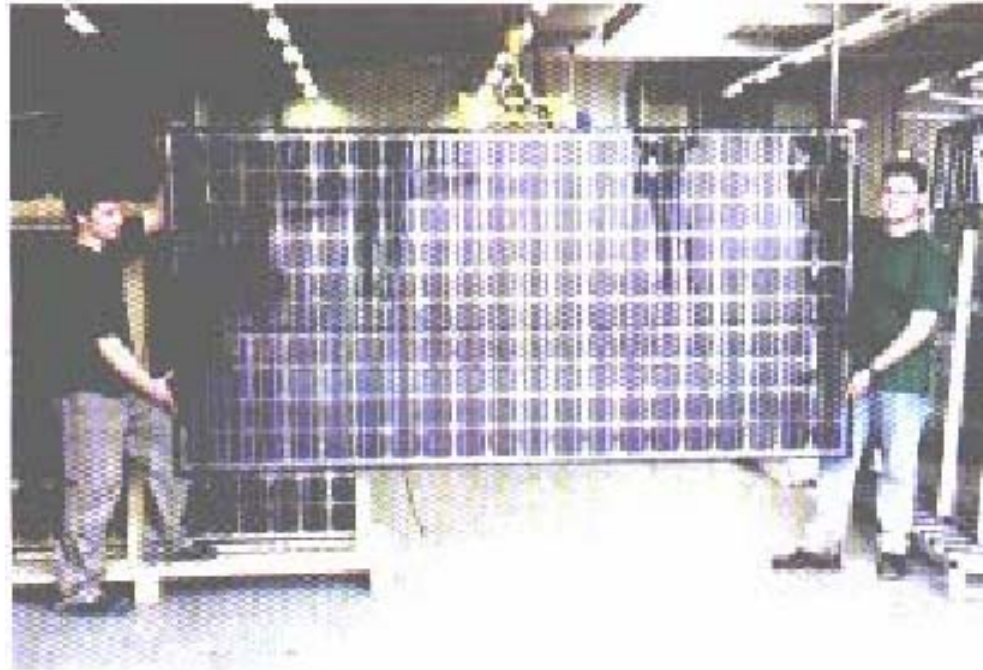
Délimitation des cellules (attaque chimique ou laser)

Dépôt de a-Si dopé n

Délimitation des cellules

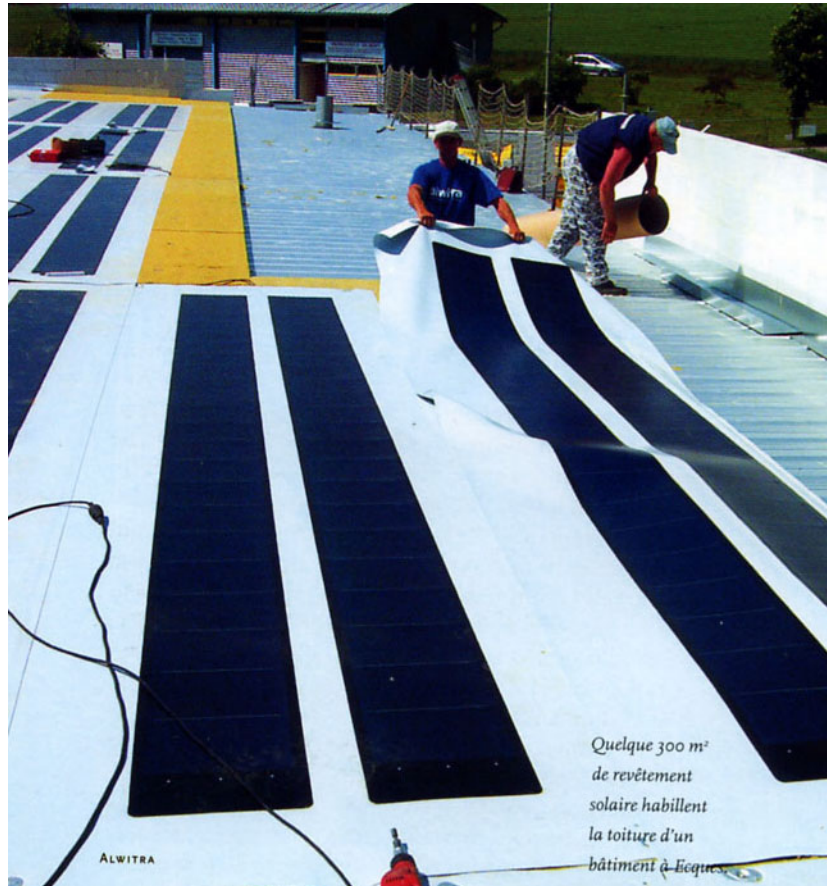
Dépôt des métallisations arrière en série avec les métallisations avant

# Modules de puissance



**Module verre-verre de 200 cellules, 440 Wc**  
**4.5 m<sup>2</sup>, 210 kg**

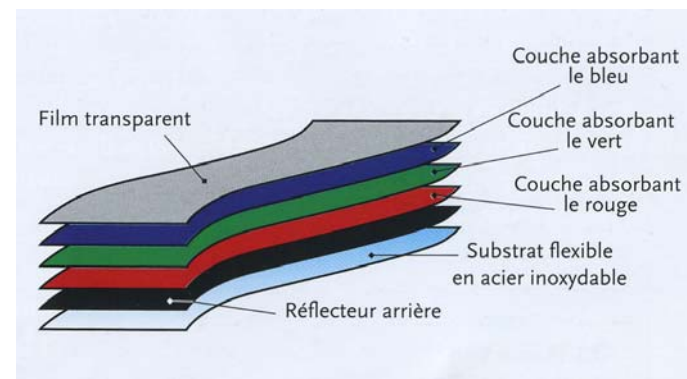
# Capteurs amorphes



Capteurs en couches minces,  
déposés sur feuille d'acier  
cumule fonctions d'étanchéité  
et de production PV

Cellule amorphe triple jonction

Rendement 7-8%



# Centrales - Suivi du soleil



Dispositifs pour suivre le soleil:

Gain de 30-35%

Ne se justifie que dans les régions très ensoleillées

# Utilisations

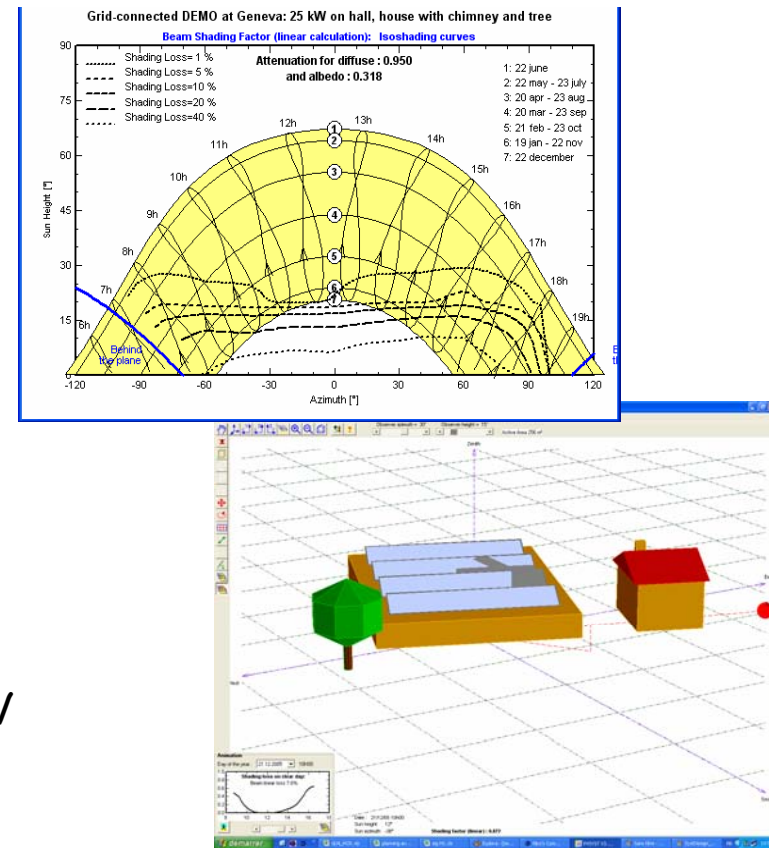
 				  
<p><b>Systèmes isolés grand public</b> off-grid habitation</p> <p><b>VOLUME</b> 81 MW</p> <p><b>CROISSANCE</b> +10 %</p> <p><b>CUM. INSTALLE</b> 719 MWc</p>	<p><b>Systèmes isolés professionnels</b> off-grid professional</p> <p><b>VOLUME</b> 68 MW</p> <p><b>CROISSANCE</b> + 12 %</p> <p><b>CUMUL INSTALLE</b> 545 MWc</p>	<p><b>Connexion au réseau distribuée</b> On-grid distributed</p> <p><b>VOLUME</b> 1 016 MW</p> <p><b>CROISSANCE</b> + 80 %</p> <p><b>CUMUL INSTALLE</b> 2 609 MWc</p>	<p><b>Centrales solaires</b> On-grid central</p> <p><b>VOLUME</b> 17 MW</p> <p><b>CROISSANCE</b> +30 %</p> <p><b>CUMUL INSTALLE</b> 95 MWc</p>	<p><b>Modules pour grand public</b> Consumer modules</p> <p><b>VOLUME</b> 38 MW</p> <p><b>CROISSANCE</b> + 9 %</p> <p><b>CUM. INSTALLE</b> 395 MWc</p>

**TOTAL en 2004 - VOLUME : 1 221 MW - CROISSANCE : +64 % - CUMUL : 4 365 MWc**

Source: Cythélia

# PVsyst - Logiciel d'étude et simulation de systèmes Photovoltaïques à l'usage des Ingénieurs, Chercheurs, Architectes, et pour l'enseignement

- Traite les systèmes photovoltaïques
  - couplés au **réseau**
  - autonomes avec **batteries**
  - systèmes de **pompage**.
- **Dimensionnement** et **Simulation** de systèmes complets, analyse énergétique, diagramme de pertes, évaluation économique.
- Outil de construction 3D pour le **calcul des ombrages**
- **Bases de données** intégrée pour les données météorologiques, les composants de systèmes PV (2'500 panneaux PV, 900 onduleurs, batteries, régulateurs, pompes, etc).
- **Outils** de traitement Météo, géométrie solaire, comportement des composants, ...



Logiciel utilisé par 950  
entreprises ou universités  
2'300 licences dans 60 pays.

# Quelques chiffres-clés

Puissance lumineuse du soleil, perpendiculaire	1000 W/m <sup>2</sup>
Energie sur plan horizontal à Genève	1200 kWh/m <sup>2</sup>
(à Dakar	2200 kWh/m <sup>2</sup> )
Puissance moyenne horizontal à Genève	137 W/m <sup>2</sup>

---

Unité de puissance d'une installation PV (puissance produite sous 1000 W/m <sup>2</sup> et 25°C)	1 kWc
Surface de capteurs correspondante:	8 m <sup>2</sup> / kWc (Si-c)
ou:	0.8 hectare / MWc

Energie produite par une installation PV (optimale à Genève)	1000 kWh / kWc
	120 kWh / m <sup>2</sup>

=> Facteur d'utilisation d'une installation PV 11 %  
(= fraction de temps opérationnelle équivalente à Puissance nom.)



# L'apport du PV à Genève

Consommation électrique du canton: **2'700 GWh**      674 W/hab  
usages domestiques:                      31 %                      207 W/hab

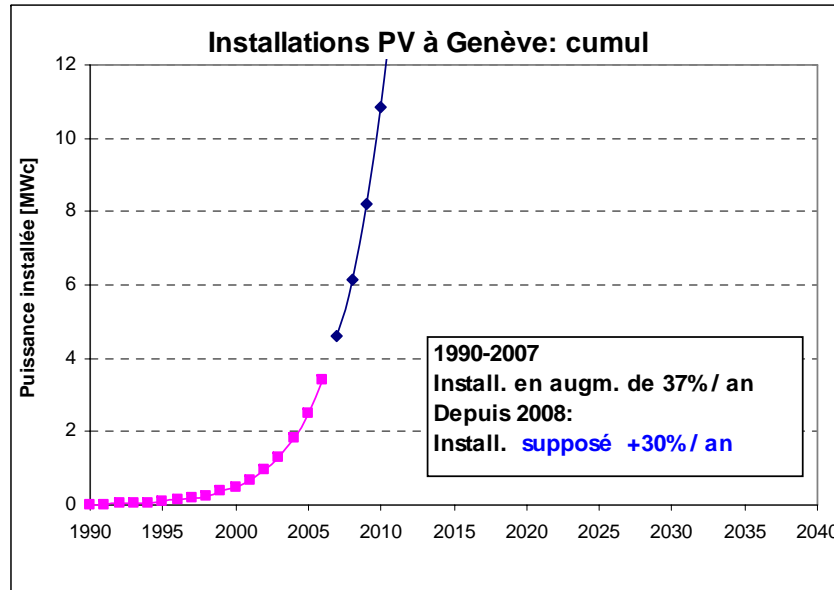
Production Photovoltaïque 2007:                      **3.8 GWh**      0.96 W/hab  
Installations PV actuelles                      **4.6 MWc**      **10.0 Wc/hab**  
(**0.14%** de la consommation él. totale )                      0.08 m<sup>2</sup>/hab

---

Si on veut passer à **20% de la consommation** électrique globale:

Production Photovoltaïque                      **540 GWh**      135 W/hab  
→ il faut installer                      **580 MWc**      **1.25 kWc/hab**  
(4.5 Millions m<sup>2</sup> capteurs, 1.6% surf. du canton)                      **10 m<sup>2</sup> /hab**  
(en Suisse: 52 m<sup>2</sup> de bâtiments/hab)

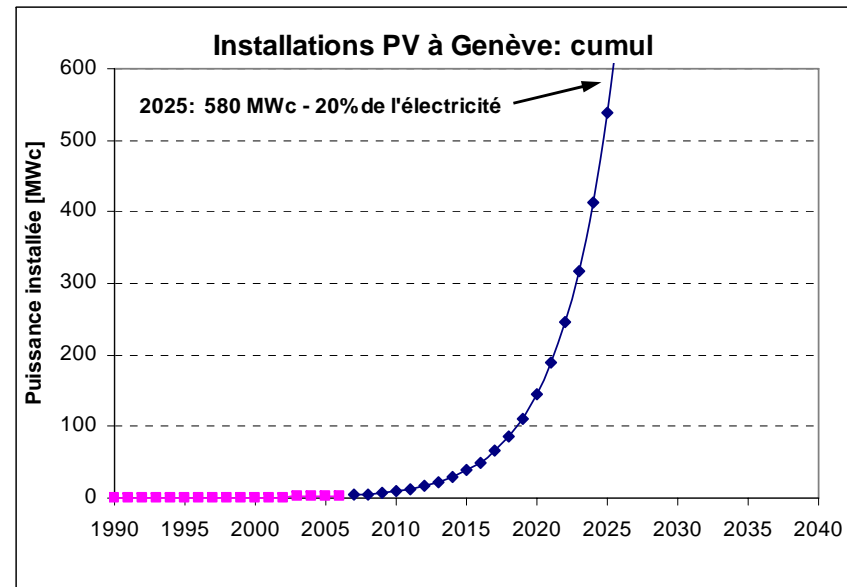
# L'apport du PV à Genève



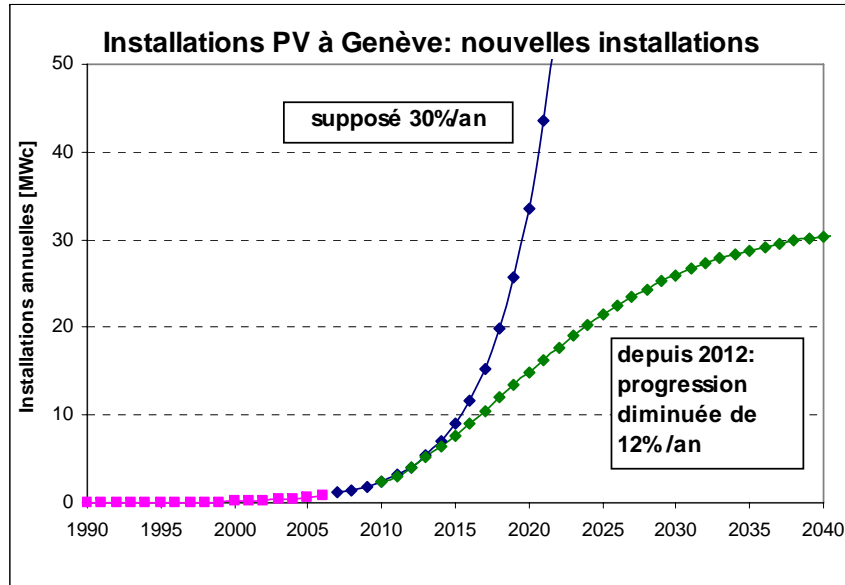
1990: première centrale 3 kWc  
2007: 4'600 kWc installés  
représente une augmentation  
annuelle des installations de 37 %

Politique volontariste :  
Subventions + Tarif de rachat  
ou Bourse Solaire

Si on continue à +30%/an:  
580'000 kWc installés en 2025

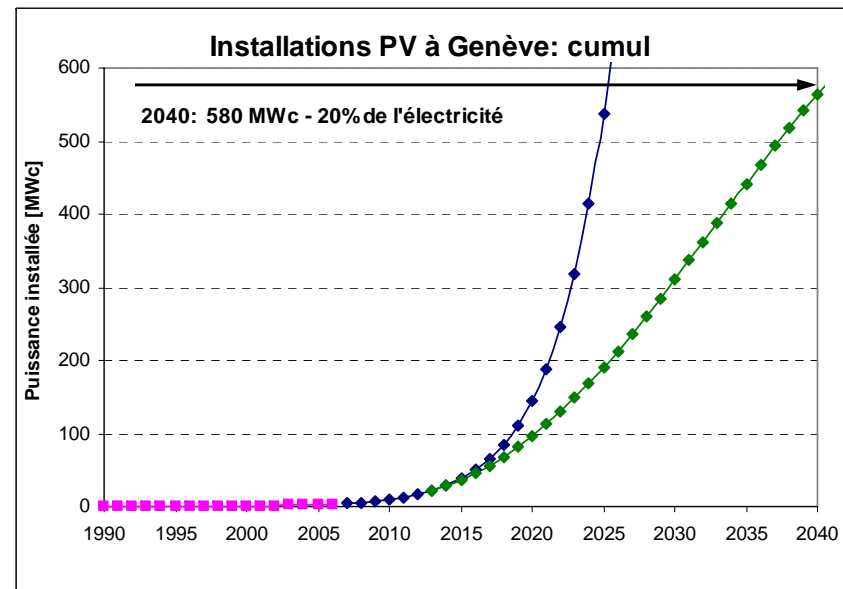


# L'apport du PV à Genève



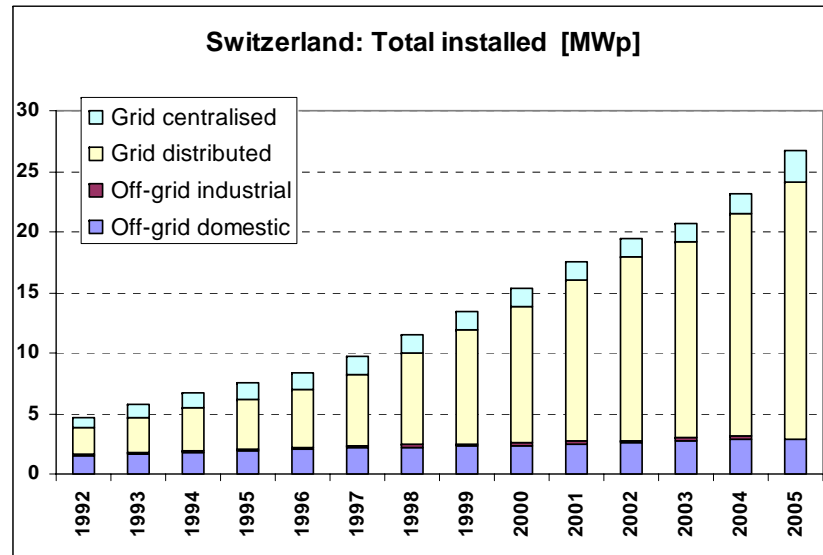
Mais la progression purement exponentielle n'est pas réaliste !

Si la progression des nouvelles installations est limitée à 30 MWc/an :



Avec limitation de la progression:  
580'000 kWc installés en 2040

# L'apport du PV en Suisse



Installés fin 2005: 27 MWc  
3.6 Wc/hab

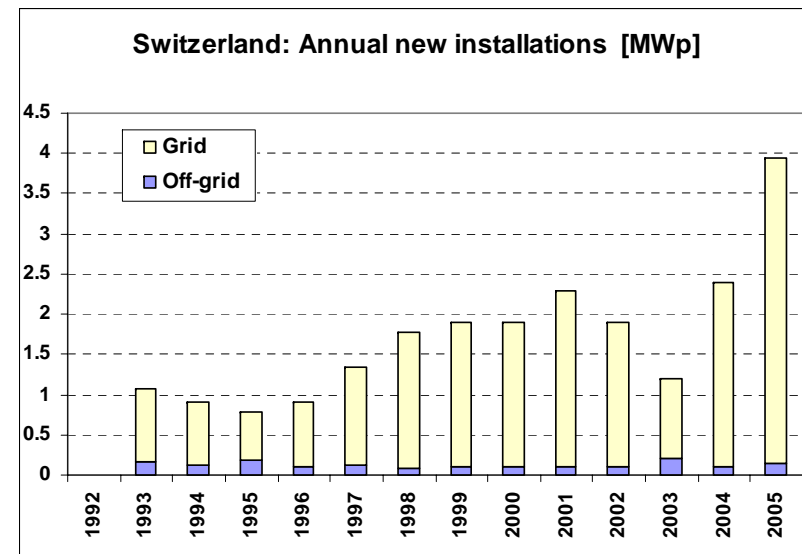
Production PV 23 GWh  
/consomm. élec. 0.035 %

Nouvelles installations PV:  
2 MWc/an "stable"

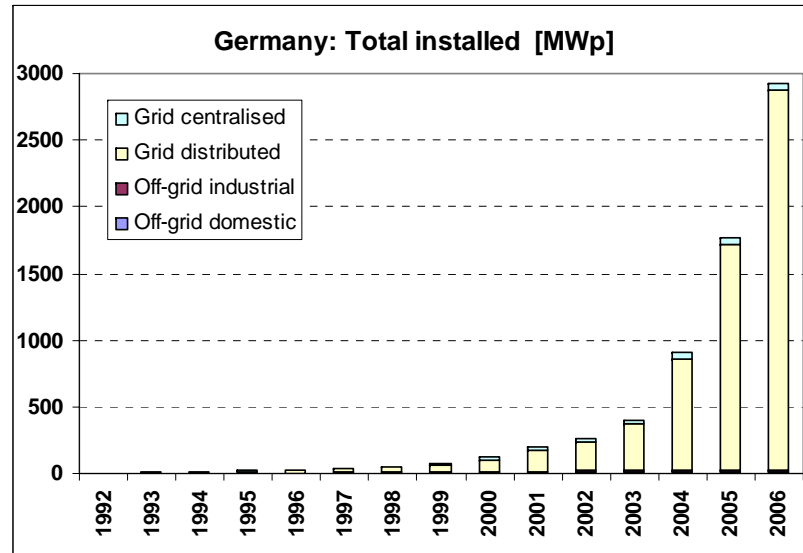
Fin du programme Energie 2000 !

Objectif 20% de la consommation:  
=> installation de 14'000 MWc  
(0.28% de la surface Suisse)

avec +30%/an: atteint en 2033  
+20%/an: 2044  
+10%/an: 2076



# L'apport du PV en Allemagne

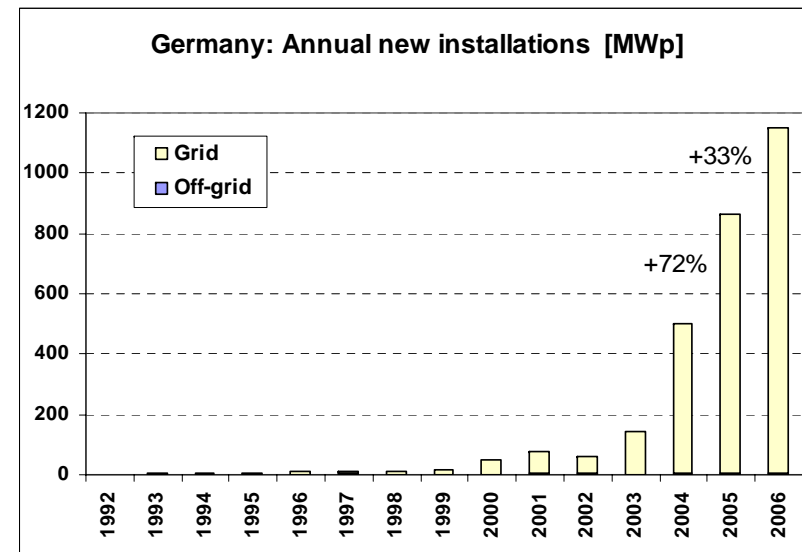


Installés fin 2006: 3'000 MWc  
36 Wc/hab

Production PV 2'200 GWh  
/consomm. élec. 0.35 %

Nouvelles installations PV:  
1'100 MWc/an

Augm. de +51%/an depuis 1990 !

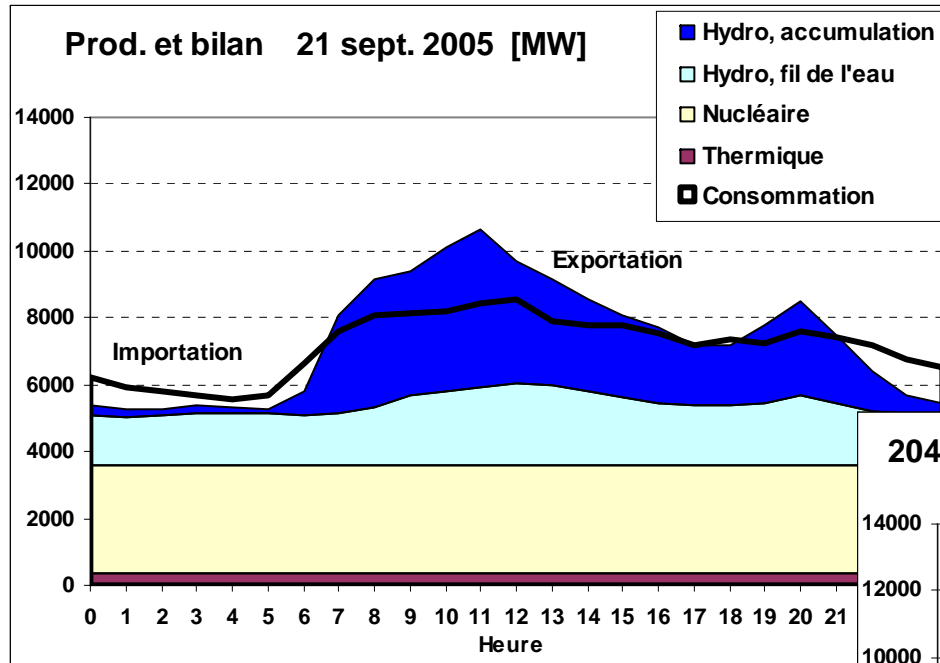


Si l'Allemagne continue avec +30%/an :

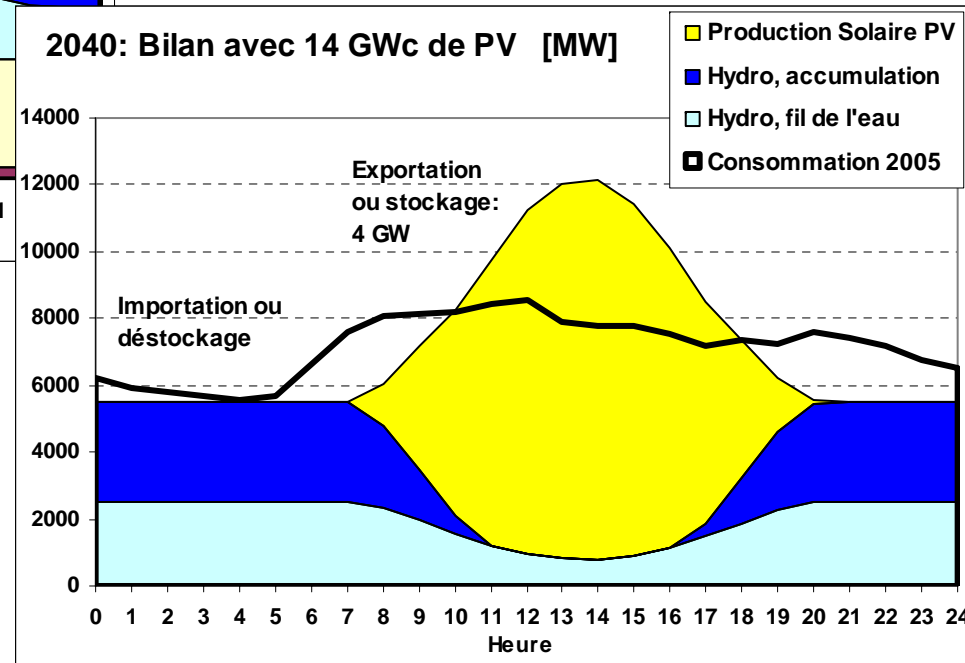
Objectif 20% d'électricité PV

=> 168 GW installés, atteint en 2020

# Limitations réseau: 20% de PV



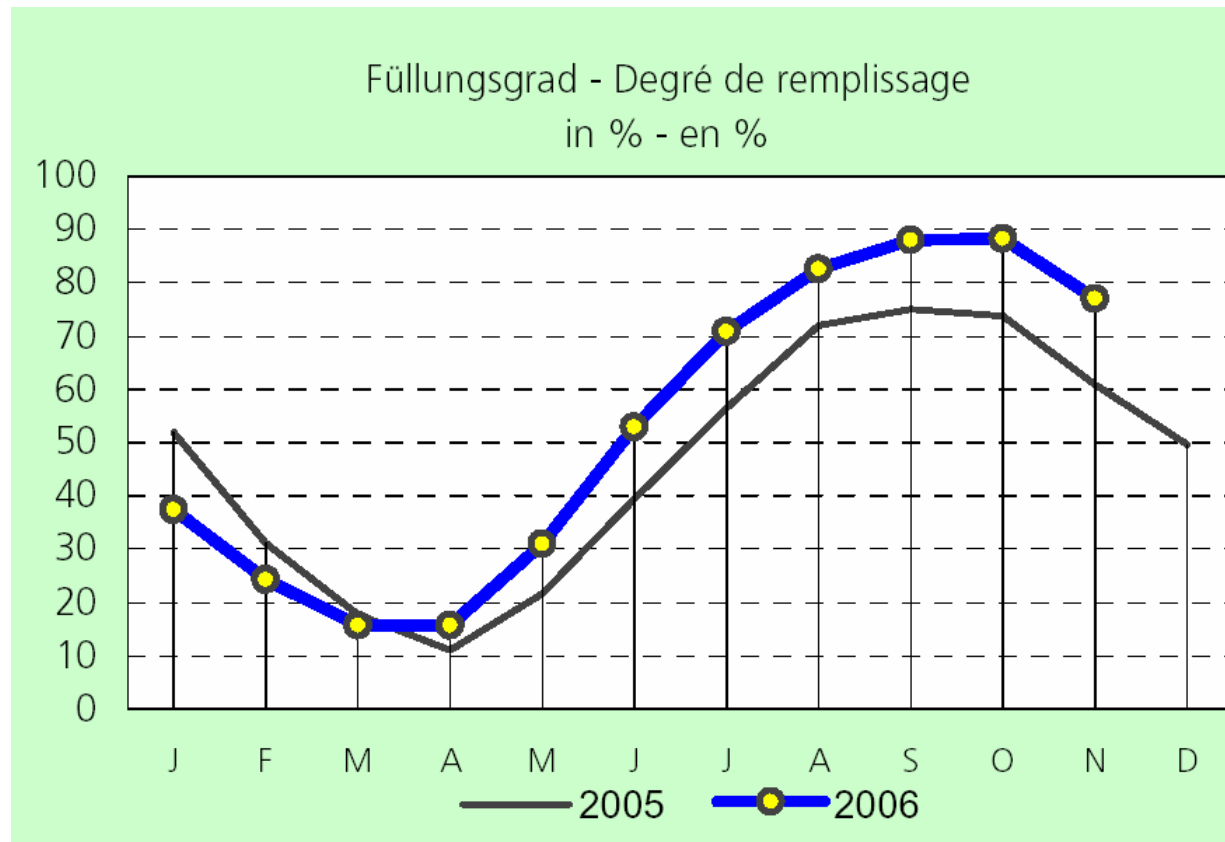
Réseau Suisse:  
 Profil de productions et  
 consommations 2005



Profil possible avec production PV  
 pour un parc de 14 GWc  
 et beau jour sur tout le pays:  
 4 GW de surproduction à  
 stocker ou exporter (ou réguler) !

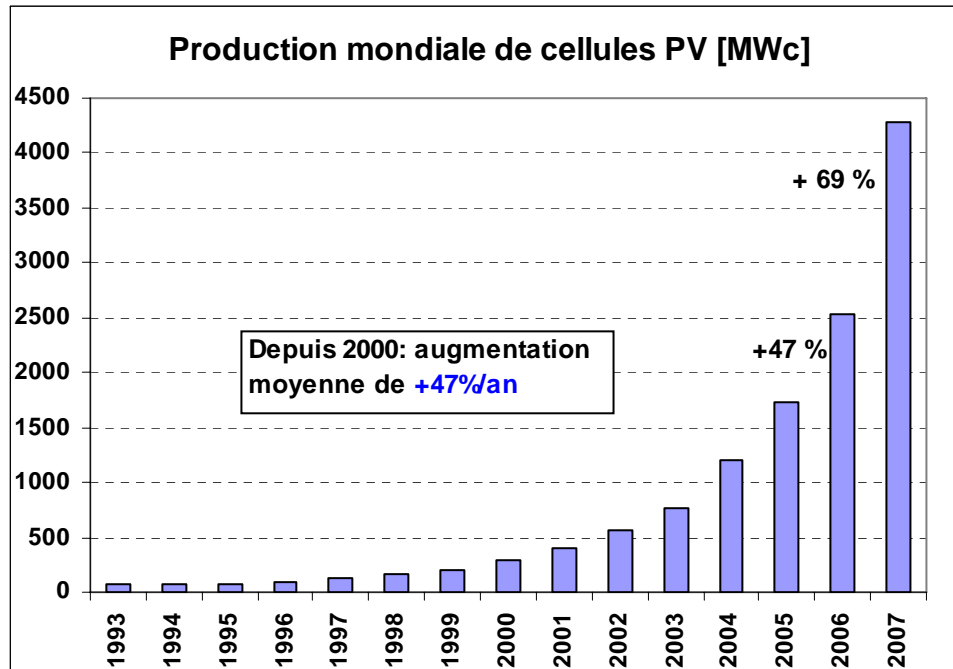
# Stockage saisonnier

A la fin de l'été, les bassins d'accumulation sont pleins ...



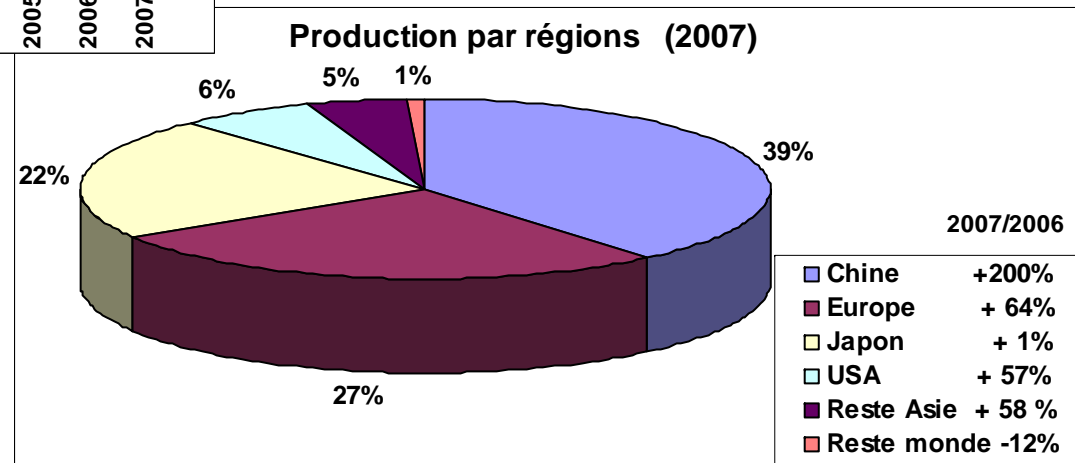
gesamte\_erzeugung\_verbrauch\_06.pdf

# La production mondiale



Production 2007:  
4'300 MWc

Production cumulée:  
12'600 MWc





# Production selon les technologies

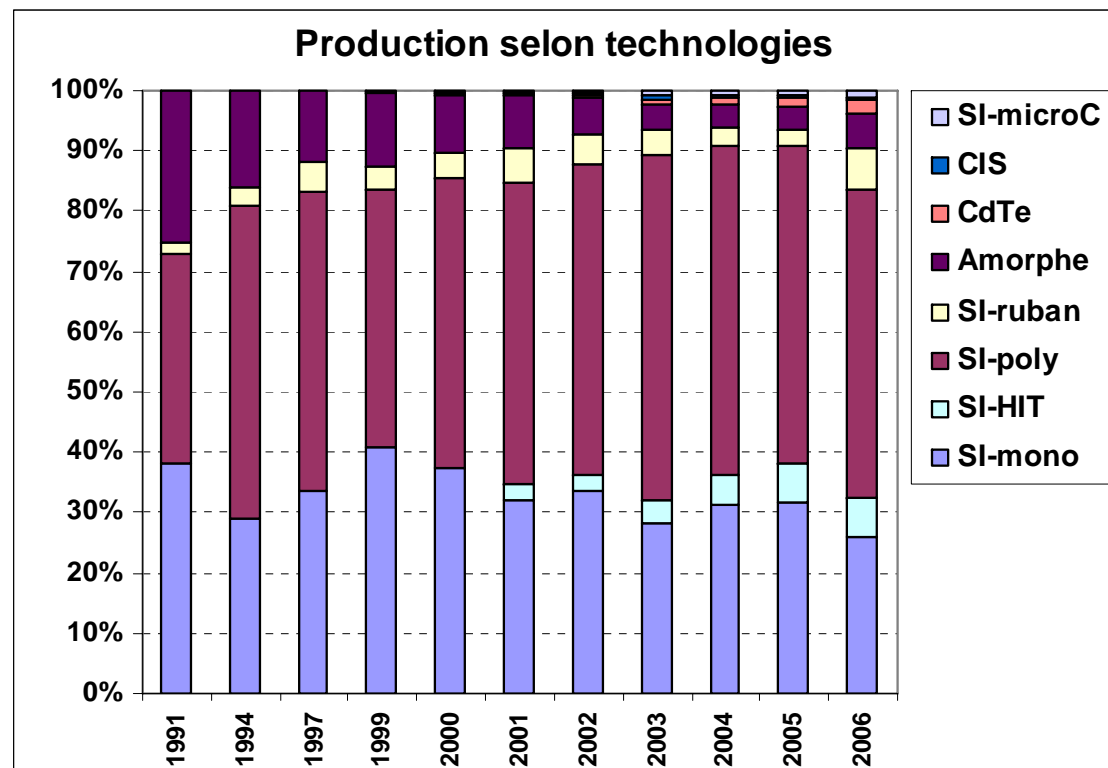
Bases de la technologie amorphe découvertes dès les années 70.

Production de couches minces nécessite des usines à gros investissements.

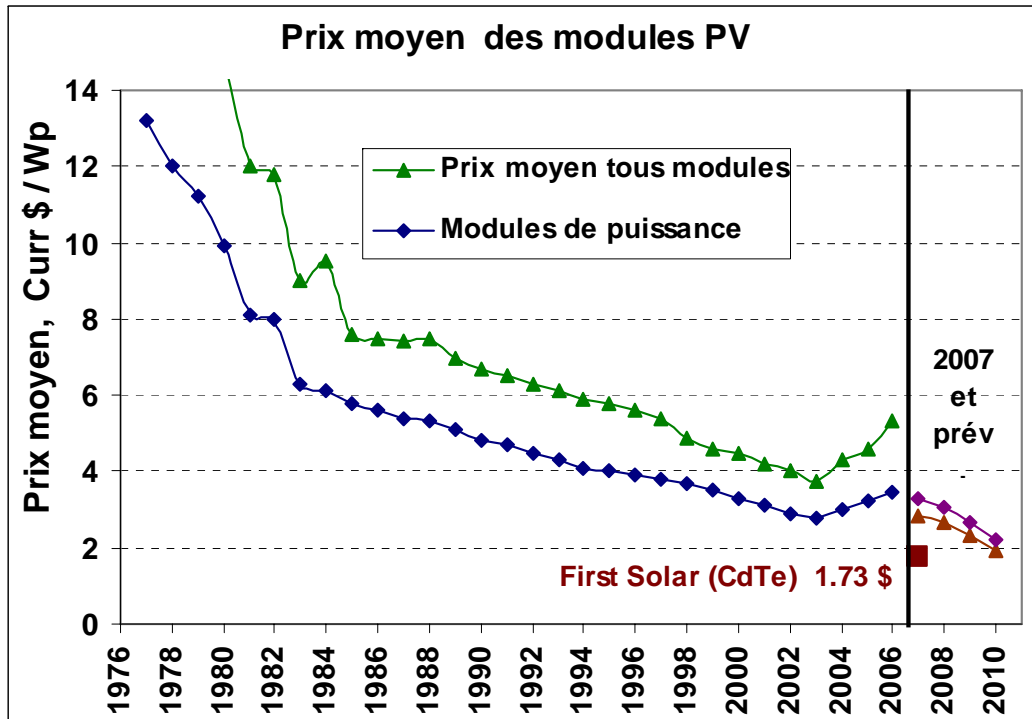
=> leur importance relative diminue jusqu'en 2004

Plusieurs grosses unités de production mises en service récemment.

**HIT:** technologie Sanyo,  
cellule SI-mono doublée d'une  
cellule amorphe en série:  
=> efficacités env. 22%



# Prix des modules PV

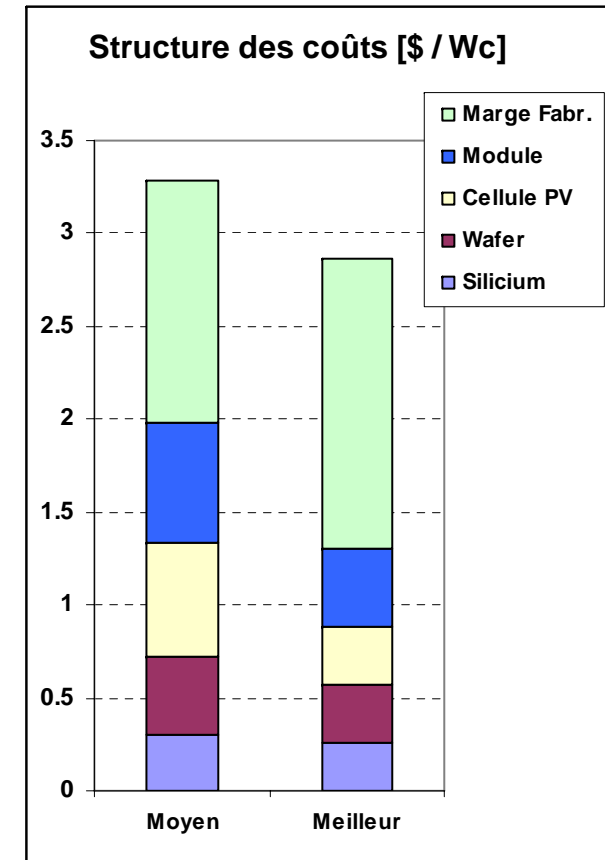


Depuis 2004:

Pénurie de **Silicium**

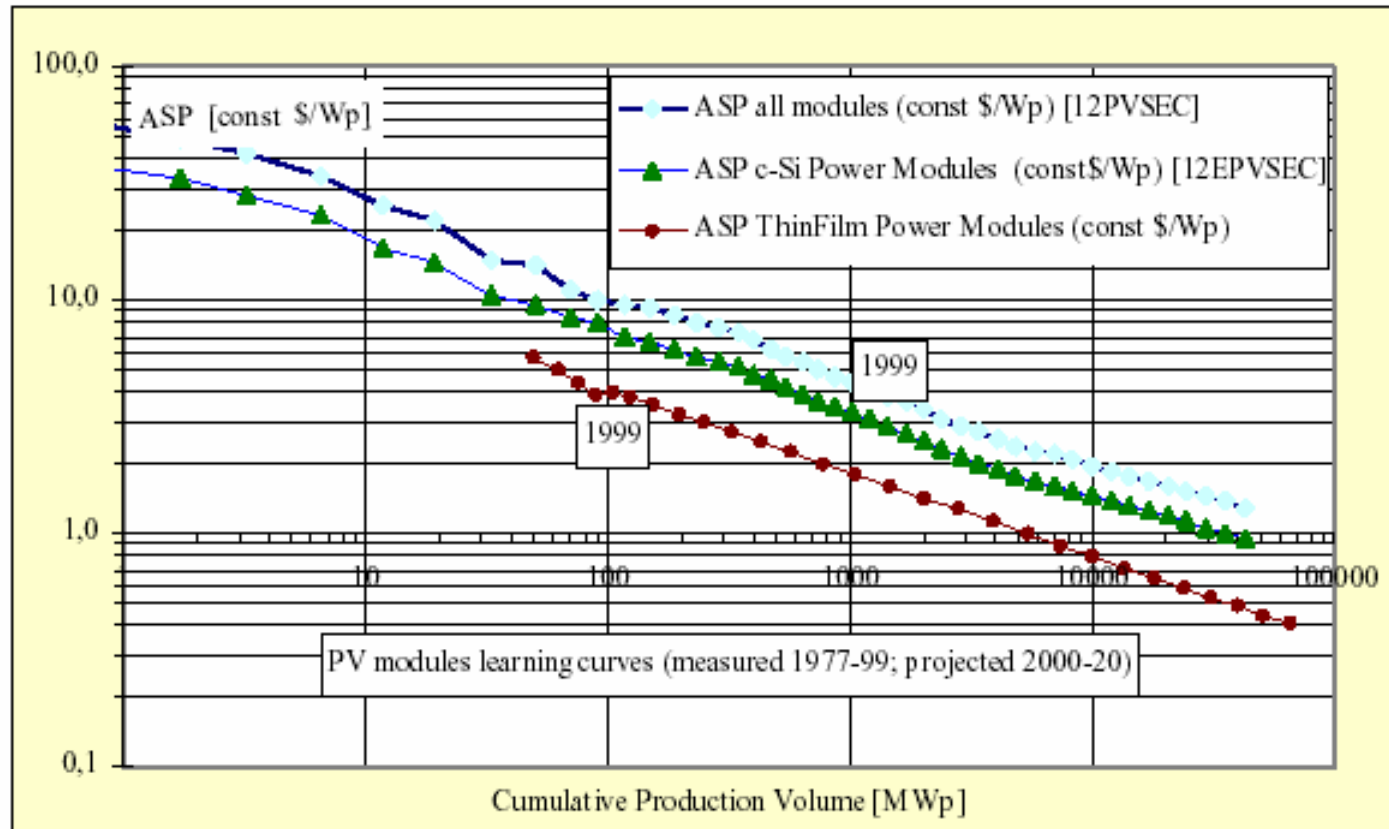
Construction d'usines pour le silicium SG (Solar Grade)

Prochaine pénurie: **le verre !**



# Courbe d'apprentissage

Règle de Verdoorn (paramètres établis sur données de 1977-1999):  
Le prix diminue de 18% quand la production cumulée double



Source: Cythelia

Prédiction de  
1999  
pour 2007:

c-Si:  
4.3 GWc  
1.8 \$/Wc

Réel moyen  
2.0 \$/Wc

écart dû à la  
pénurie de Si

# Coûts du système et de l'énergie

Prix d'un système PV en Suisse:	< 10 kW	8.00 - 11.50 F / Wc
(IEA-PVPS, 2006)	> 10 kW	7.50 - 9.50 F / Wc
Réalité, à Genève (2001-2003)		10.00 - 13.00 F / Wc
Intégré + 20 à 30%		12.00 - 17.00 F / Wc

Prix du kWh produit: dépend

- De l'investissement (intégration, type de modules, tracking, etc)
- Des conditions de prêt (durée et taux d'intérêt, usuel 20 ans à 4%)
- Du système (orientation)
- De la localisation (Genève 1000 kWh/kWc, Espagne 1600 kWh/kWc)
- De la dégradation éventuelle du système, remplacement onduleurs, assurance, ...

Prix indicatif pour une installation "moyenne" en Suisse (amort. 20 ans 4%):

- Environ 80 ct/kWh (50 ct€)
- Façade: 70% de l'optimal: 115 ct/kWh
- Sud de la France ou Espagne: 1500 / 1000 kWh/kWc 53 ct/kWh
- Dégradation de 0.5%/an: au bout de 20 ans 90 ct/kWh

# Financement - Incitations

⇒ Le développement du PV réseau dépend des conditions d'aides

Marché à fort investissement, n'explose que si l'investissement devient rentable

Instruments:

- **Subvention** à l'investissement, crédit d'impôt (Etat, crédit immédiat)
- **Feed-in Tariff** (à la charge de l'Etat, des consommateurs, ...)  
Condition: **pérennité/sécurité** sur la durée d'investissement (20 ans)
- A Genève: **Bourse Solaire** (à la charge des consommateurs volontaires)
- En Suisse 2009: **Feed-in tariff** financé par taxe 0.6 ct/kWh
- Facilitation des prêts (les banques ne sont pas toujours confiantes)
- Prise en compte des coûts externes ? (taxe ou certificats CO2)

La plupart des pays où le PV a décollé ont choisi le Feed-in Tariff:

- Tarifs ajustés de manière à atteindre la rentabilité
- Certaines modulation incitatives (prime à l'intégration)
- Dégressifs ou progressifs selon la taille de l'installation
- Révisés à la baisse, selon l'évolution de la technologie PV

# Programmes nationaux

## Les 3 principaux pays consommateurs de PV

Allemagne:	Progr. 100'000 toits solaires, loi EEG, feed-in	install 2006 3063 MWc
Japon:	1994: Programme 70'000 toits, subventions + feed-in	
Californie:	Subventions (3.5, 2.8)/Wc, feed-in tariffs	

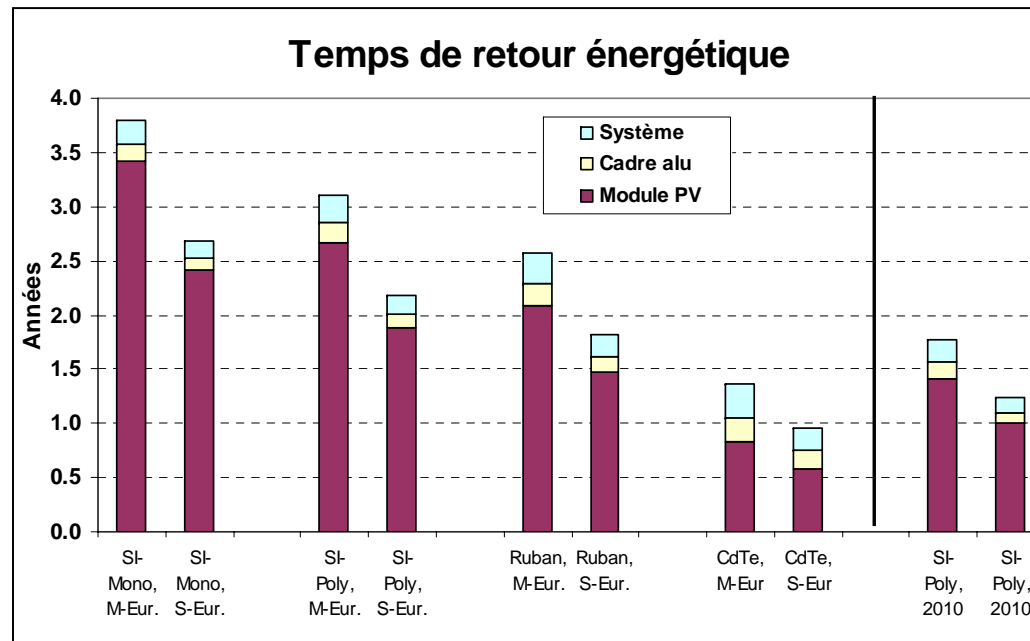
## Les programmes PV émergents en Europe

Espagne:	feed-in tariff	118 MWc
Italie:	feed-in tariff, avec conditions limitatives	58 MWc
Pays-bas:	feed-in tariff,	51 MWc
France:	feed-in tariff + subventions (crédits d'impôts)	32 MWc
Suisse:	Subventions + feed-in tariffs, (feed-in fédéral 2009)	env 31 MWc
Genève:	Bourse solaire (indexée au coût moyen, 80ct/kWh) <b>ou</b> Subvention + Tarif de rachat garanti (65ct)	3.2 MWc

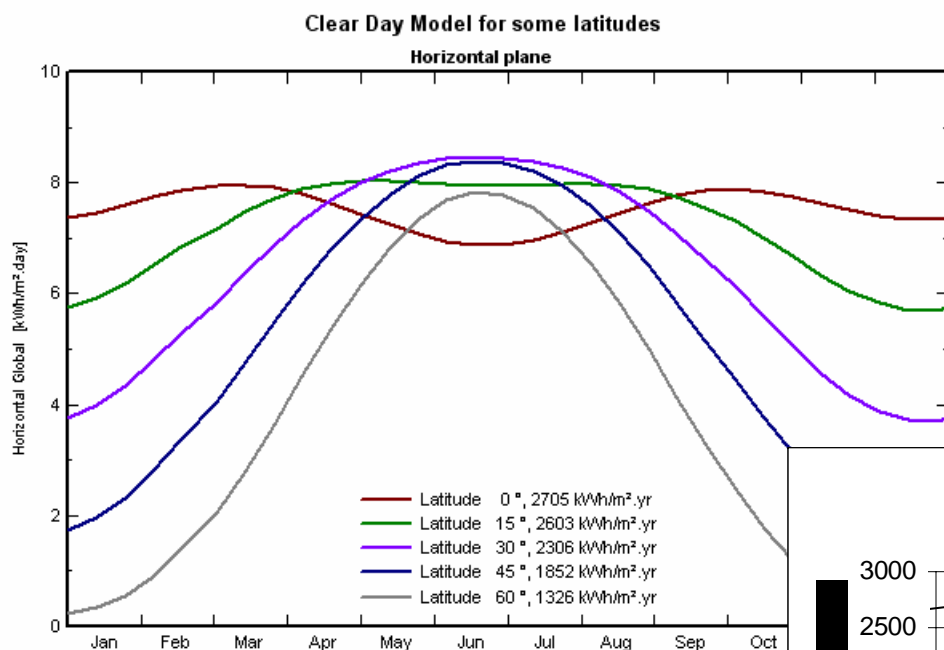
# Temps de retour énergétique

L'Energie grise dépend:

- de la technologie (ici: mono: Wafer de 300um, effic. 14%, pessimiste)
- évolue rapidement (Silicium SOG, épaisseur Wafer, efficacité, etc)
- de la situation géographique (med-Eur, 1200 kWh/m<sup>2</sup>, sud-Eur 1700 kWh/m<sup>2</sup>)
- de la mise en œuvre (orientation, tracking),



# Disponibilité géographique

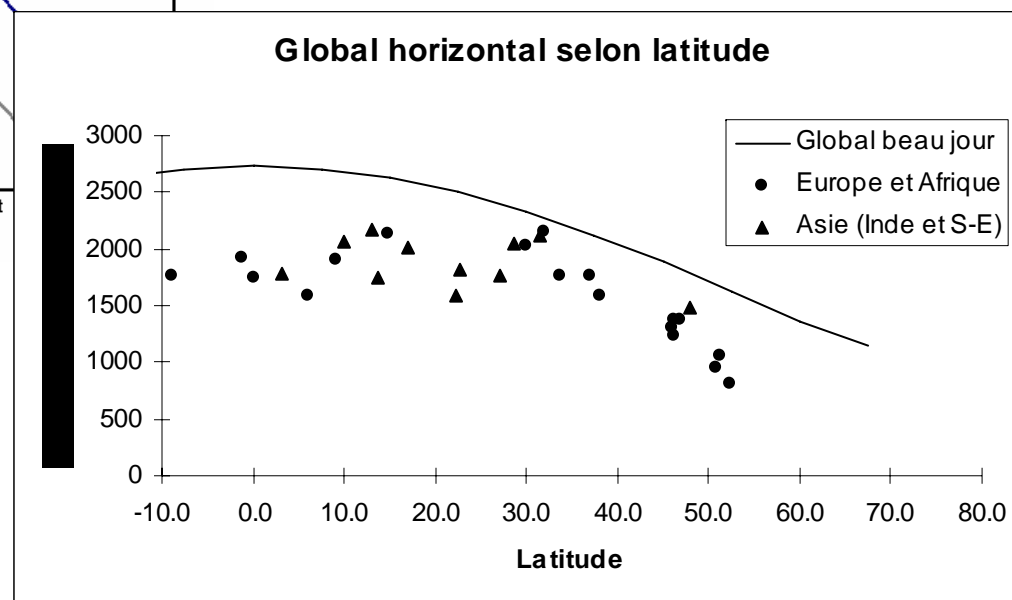


Ensoleillement "Beau Jour":  
=> Variabilité annuelle aux  
hautes latitudes !

Météo Réelle:

Meilleurs sites aux tropiques

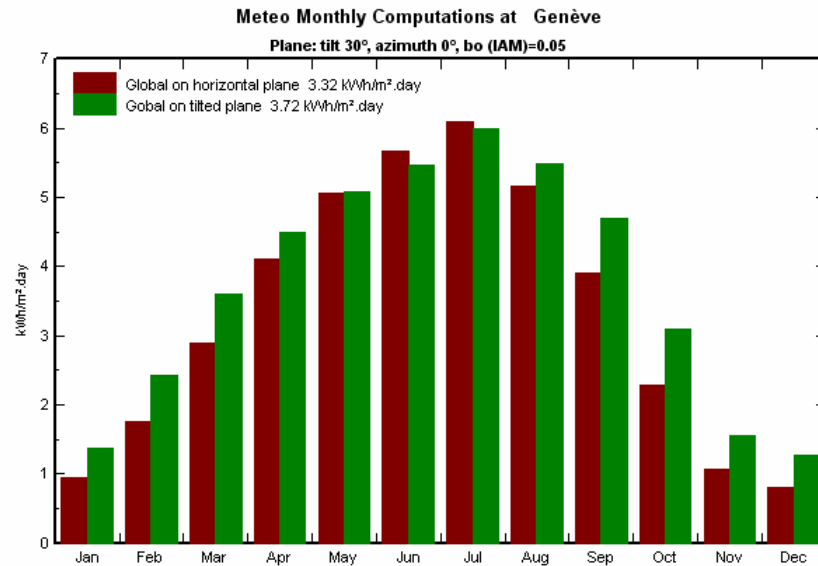
Genève 46°N 1230 kWh/m<sup>2</sup>  
Dakar 15°N 2150 kWh/m<sup>2</sup>  
(+74%)



Source: Cythélia

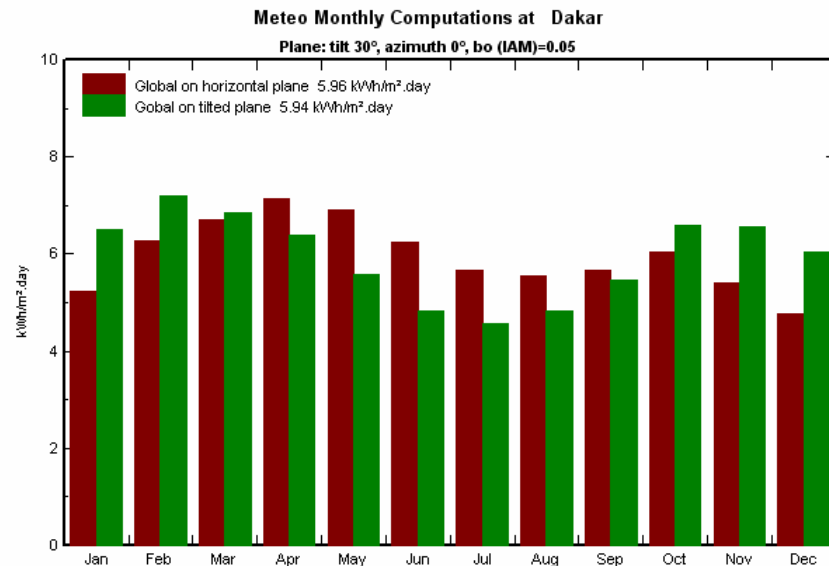


# Distribution annuelle



Ensoleillement à Genève:  
Horizontal et 30° sud  
Dynamique été:hiver 4:1

Ensoleillement à Dakar:  
Très constant au cours de l'année  
=> favorable aux utilisations isolées



Source: Cythélia

# PV dans les PVD: un service

Plus de 2 milliards d'hommes et femmes vivent sans électricité

Les services qui peuvent être couverts par la "petite" électricité:

- **Niveau familial: SHS, Solar Home System, Typ. 50Wc + batt. 100Ah**  
Eclairage, radio/télévision, (év. ordinateurs ou téléphone)  
Réfrigération (beaucoup plus chère, au moins 150 Wc)
- **Collectivités locales** (écoles, dispensaires, administrations, culte)  
Eclairage, réfrigération (médicaments), sonorisation,  
informatique, éclairage public,  
Centre de recharge de batteries
- **Collectifs de production agricole:** pompage de l'eau,  
moulins à grains, réfrigération (lait), etc.

Installations en général organisées autour d'un parc de batteries Pb.  
Alimentation par PV, petite hydraulique, éolien, diesel ...

# Qualité et efficacité

L'énergie PV décentralisée est très chère

=> utiliser des équipements extrêmement performants

Le surcoût de la qualité est rapidement rentabilisé

(lampes fluo, réfrigérateurs super-isolés (0.3 kWh/jr contre 1.2))

Exemple: l'éclairage PV efficient est compétitif avec les autres modes d'éclairages généralement utilisés

Usage	Puissance lumineuse	Durée d'éclairage		Coût horaire	Coût de l'énergie
	<i>lumen</i>	<i>heures</i>		<i>CHF/heure</i>	<i>CHF/kWh</i>
Batterie 75Ah + lampe fluo	400	112	h/recharge	0.050	6.3
Lampe BUTAGAZ	300	42	h/bouteille	0.065	11
Lampe à pétrole	45	33	h/litre	0.027	30
Lampe torche (2*R20)	7	18	h/ 2 piles	0.053	375
Grande bougie	1	8	h	0.017	825
Petite bougie	1	2.7	h	0.017	825

# Conditions de développement

Condition de succès d'un projet PV rural:

- les populations **doivent être impliquées** dans le projet Photovoltaïque.
- Motivation par participation financière (même modeste)
- **Information** des usagers
- Formation, et suivi d'un **service technique** sur le terrain
- Fabrication/réparation indigène de composants (lampes, batteries)
- Systèmes commerciaux et/ou administratifs efficaces
- **Cadre juridique** capable d'assurer la pérennité des institutions
- Aide extérieure: surtout à l'**investissement** initial
- Environnement (**recyclage** notamment des batteries)

# Modes de financement

L'installation PV est très intensive en capital

(on achète d'un coup toute l'électricité pour 20 ans)

A l'opposé des structures économiques de ces populations !

=> nécessité absolue de **financements extérieurs**:

- Programmes d'aides internationaux (banque mondiale, ONG)
  - Nécessité d'organisation/suivi à très long terme
  - Dispositions particulières (batt+régulateur scellés, etc.)
- Programmes nationaux / Entreprises publiques
  - Installations propriétés de l'entreprise/état
  - qui en assurent l'entretien
  - Vente de l'électricité consommée
  - (systèmes de location, à pré-paiement, etc)
- Entreprises privées: idem, avec aide initiale
  - Eventuellement bornes de rechargement de batteries

# Du bon usage du PV ...



Batterie hors d'usage après 1-2 ans sans suivi technique ou financier...



# Conclusions

La Conversion Photovoltaïque: une invention majeure du XX<sup>e</sup> siècle !

## Dans les pays développés:

- Installations couplées au réseau: contribution aux ENR
- Source d'énergie "efficace", faibles impacts environnementaux
- Actuellement chère - nécessite de l'argent public et/ou des mesures incitatives (répartition)
- La mise en oeuvre actuelle se justifie par la nécessité d'un développement industriel "progressif" jusqu'au milieu du siècle
- Le développement industriel profite à l'utilisation en PVD

## Pays en Voie de développement

- 2 milliards d'humains sans électricité
- supp. 10 Wc/habitant => marché de 20 GWc (12 x prod. 2005)
- Implémentations de programmes PV doivent s'accompagner de conditions/mesures sociales et techniques très strictes  
Peut être un élément de structuration des Communautés