

Aspects de la recherche en Photovoltaïque au CUEPE

André Mermoud

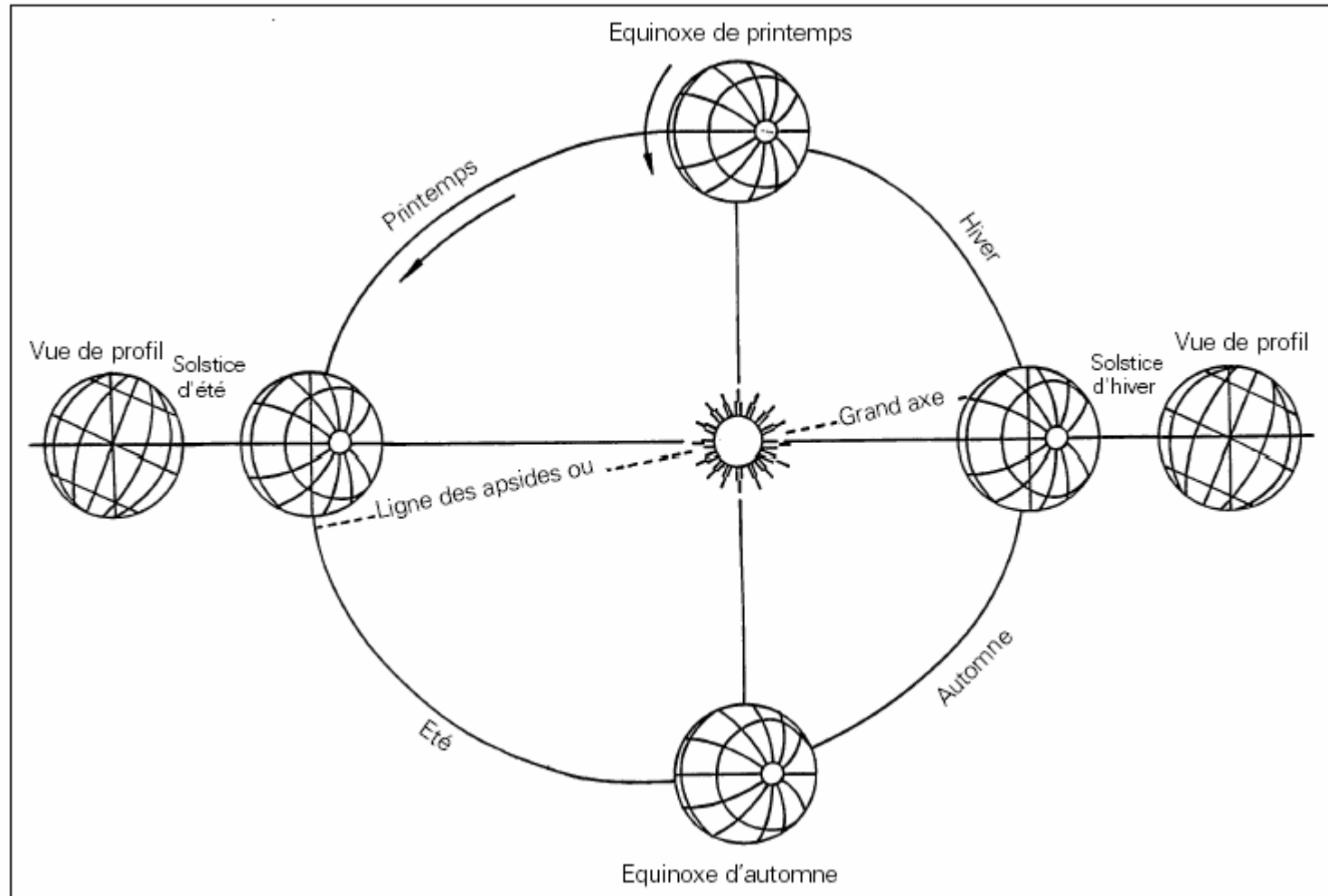
CUEPE

29 mars 2007

Sommaire

- Le potentiel solaire
- L'état de la technologie
- Activités PV au CUEPE:
 - Le logiciel PVsyst
 - Modélisation de modules PV amorphes
 - Pompage solaire
 - Chlorinateur

Le système Terre - Soleil



Le potentiel solaire

Puissance solaire interceptée par la Terre:

174'000 TW soit 342 W/m^2

Energie: $1.5 * 10^{18} \text{ kWh/an}$

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

Energie: $6500 \times$ la consommation mondiale (10 GTep)

Energies induites par l'énergie solaire:

Potentiel ENR
"récupérable"

Evaporation/convection 80 W/m^2

Photosynthèse 0.24 W/m^2

Vents 0.7 W/m^2

Géothermie 0.06 W/m^2

Hydroélectricité 0.01 W/m^2

En. solaire PV + TH 0.007 W/m^2

6 GTep

1.7 GTep

0.2 GTep

1.2 GTep

0.3 GTep



L'apport du PV à Genève

Consommation électrique du canton: 2'700 GWh 674 W/hab
(usages domestiques: 207 W/hab)

Production Photovoltaïque 2006: 3.2 GWh 0.75 W/hab
(3'200 kWc installés) 0.12% 0.06 m²/hab

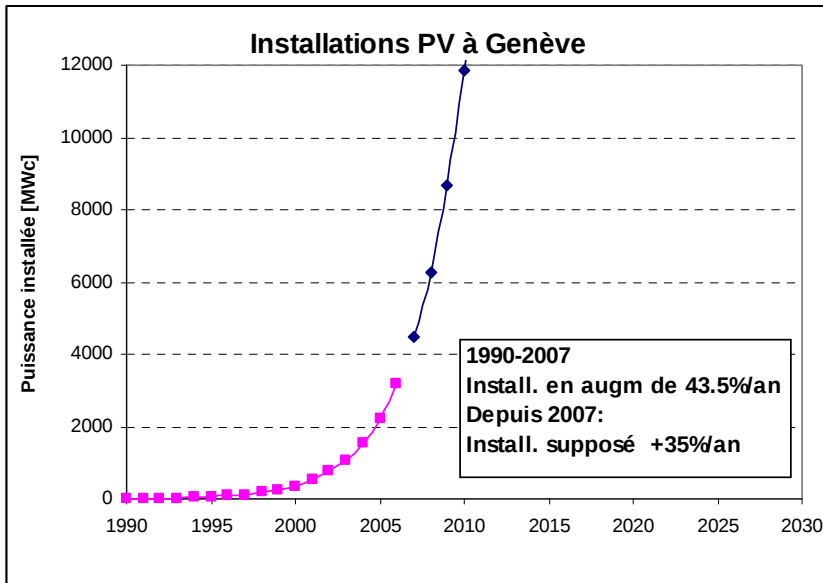
Si on veut passer à 20% de la consommation électrique globale:

Production Photovoltaïque 540 GWh 135 W/hab

→ il faut installer 1.25 kWc/hab

soit 10 m² de capteurs/hab (4.5 Millions m²)

L'apport du PV à Genève



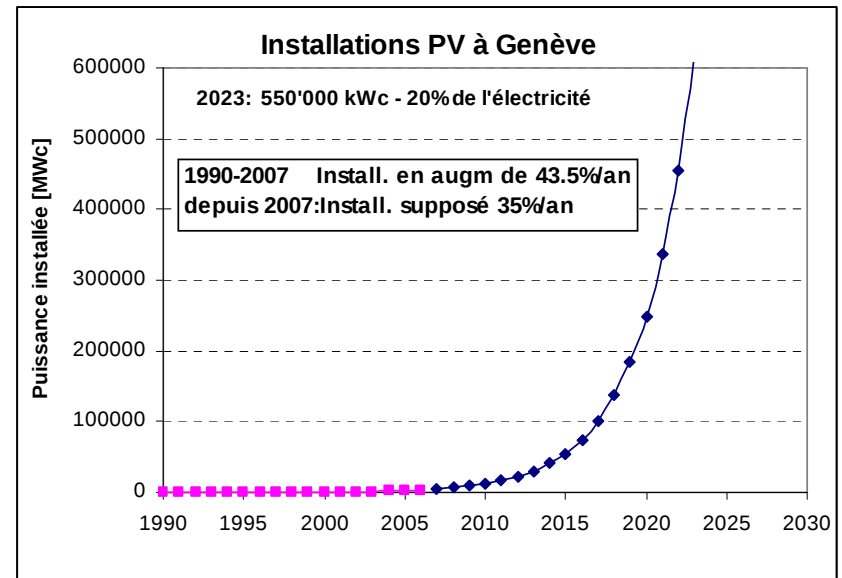
1990: première centrale 3 kWc

2006: 3'200 kWc installés

représente une augmentation
annuelle des installations de
43.5%

Si on continue à 35%/an:

550'000 kWc installés en 2023



Quelques chiffres-clés

Puissance lumineuse du soleil, perpendiculaire	1000 W/m ²
Energie sur plan horizontal à Genève	1200 kWh/m ²
Puissance moyenne horizontal à Genève	137 W/m ²
Energie produite par une installation PV (optimale à Genève)	1000 kWh / kW _c 120 kWh / m ²
=> Facteur d'utilisation d'une installation PV	11 %
Surface de capteurs nécessaire pour 1 kW _c	8 m ² / kW _c

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 40% par an

Utilisations



**Systèmes isolés
grand public**
off-grid habitation

VOLUME
81 MW

CROISSANCE
+10 %

CUM. INSTALLE
719 MWc



**Systèmes isolés
professionnels**
off-grid professional

VOLUME
68 MW

CROISSANCE
+ 12 %

CUMUL INSTALLE
545 MWc



**Connexion au
réseau distribuée**
On-grid distributed

VOLUME
1 016 MW

CROISSANCE
+ 80 %

CUMUL INSTALLE
2 609 MWc



Centrales solaires
On-grid central

VOLUME
17 MW

CROISSANCE
+30 %

CUMUL INSTALLE
95 MWc



**Modules pour
grand public**
Consumer
modules

VOLUME
38 MW

CROISSANCE
+ 9 %

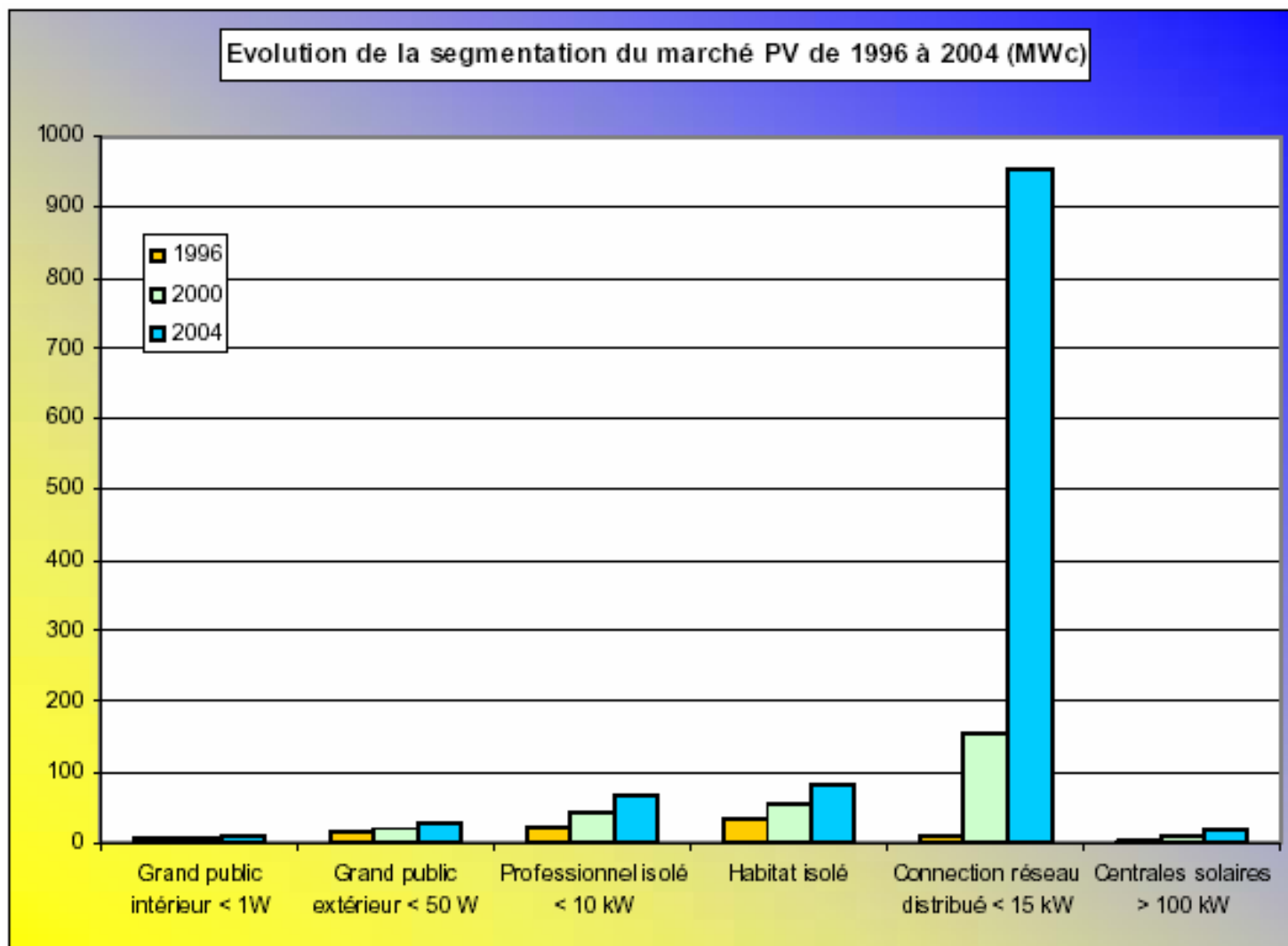
CUM. INSTALLE
395 MWc

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

Source: Cythélia

c u e p e

Evolution du marché



Source: Cythélia



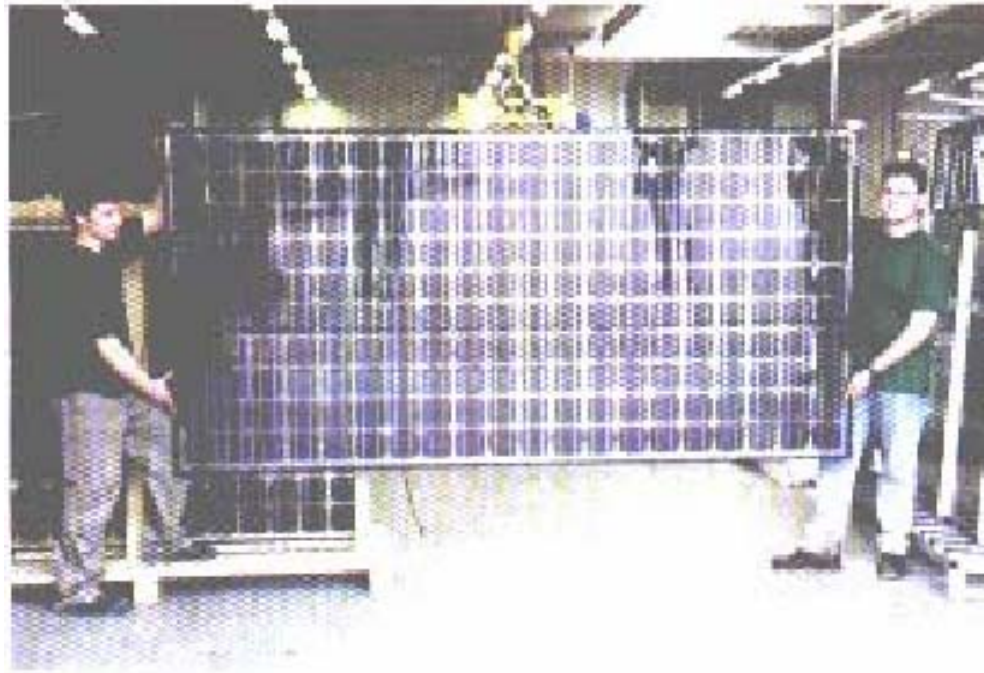
Technologies des modules: Cristallins

Silicium Monocristallin

Silicium Polycristallin

- Mono- ou PolyCristal de silicium
- Sciés en plaquettes (épaisseur typ. 250 μm), "wafers"
- (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

Modules de puissance



Module verre-verre de 200 cellules, 440 Wc

3 x 1.5 m², 210 kg

Technologies couches minces

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

Matériaux avec coeff. d'absorption élevé => Epaisseurs typique 1-2 μm

Silicium amorphe:

- a-Si:H, simple cellule, tandem, triples
- $E_{\text{gap}} = 1.6 \text{ eV}$, Jonctions p-i-n
- Longueur de diffusion courte => augmente résistivité
- Efficacités typiques 5% - 8%

CIS ou CIGS

- CuInSe_2 - Copper-Indium-Selenium + évent. Gallium
- Efficacités typiques 10%

CdTe

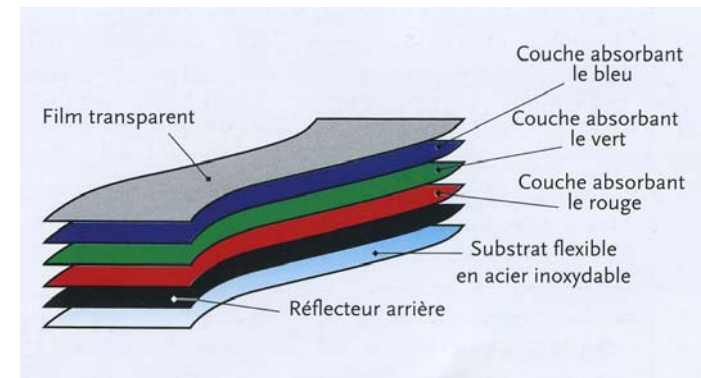
- Technologie simple
- Cadmium (très polluant - problèmes de recyclage)
- Efficacités typiques 8% -

Capteurs amorphes



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

Cellule amorphe triple jonction
Rendement 6%



Suivi du soleil

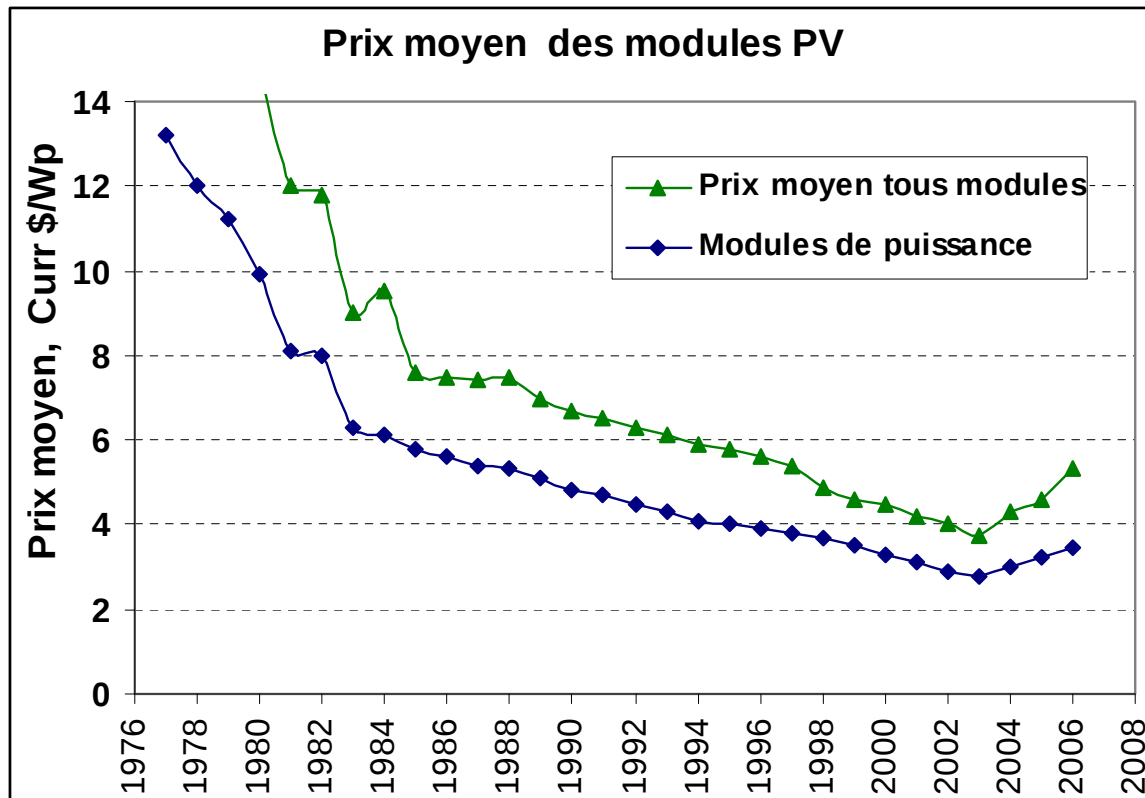


Dispositifs pour suivre
le soleil:

Gain de 30-35%

Ne se justifient
que dans les régions
très ensoleillées

Prix des modules PV



Depuis 2004:

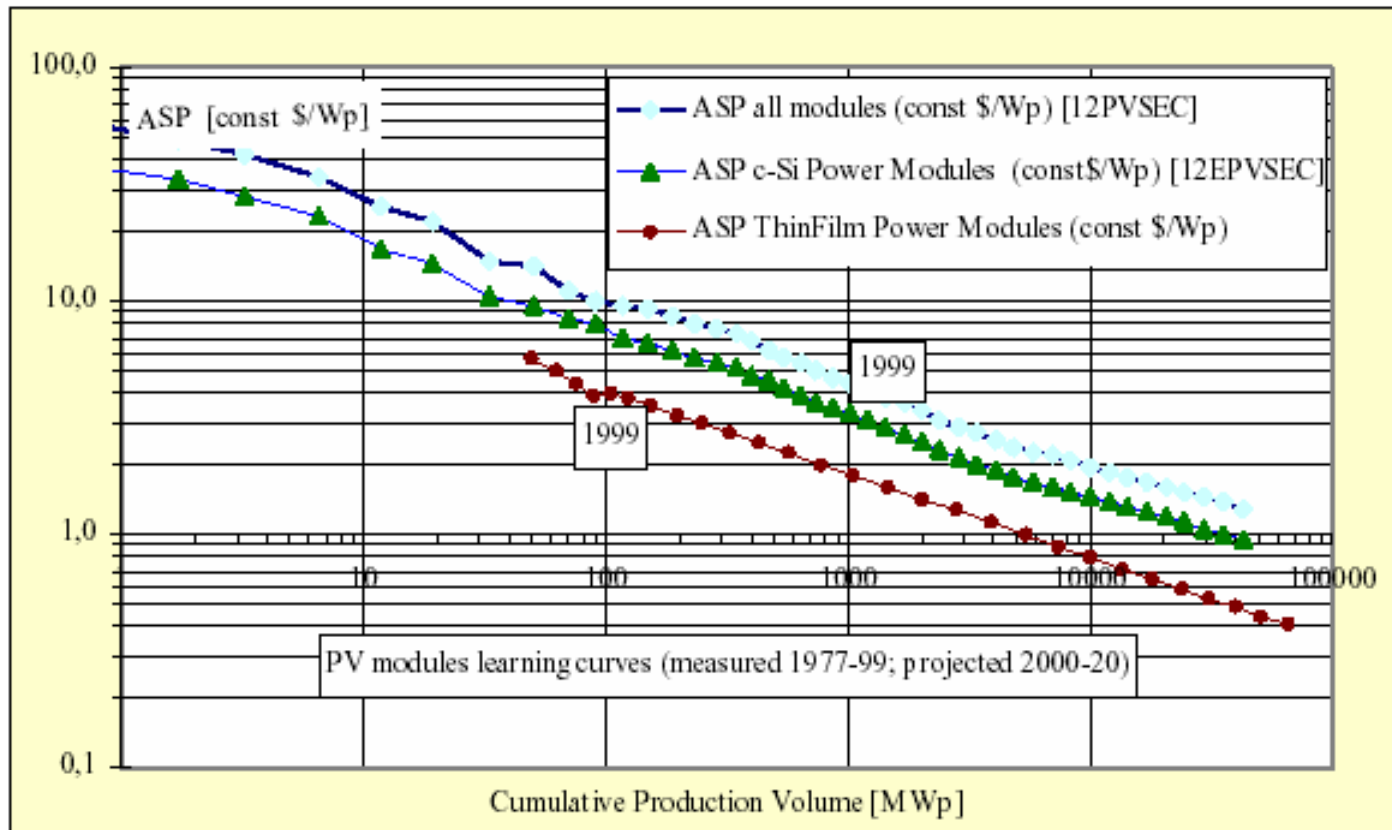
Pénurie de
Silicium

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

Courbe d'apprentissage

Règle de Verdoorn (param. établis sur données 1994)

Le prix diminue de 18% quand la production cumulée double



2005:

c-Si:

5.3 MWc

2.3 \$/Wc

Activités PV au CUEPE

➤ Logiciel PVsyst

Etude détaillée de systèmes photovoltaïques

Outils pour l'énergie solaire (météo, géométrie solaire, ombrages, comportement de composants)

Distribué dans 50 pays - 550 entreprises/universités

➤ Modélisation des modules PV amorphes

Nécessaire pour confiance/expansion de cette technologie

➤ Systèmes de pompage PV

Modélisation de pompes et systèmes

➤ Unité de production d'Hypochlorite "solaire"

Pour la potabilisation de l'eau en zones isolées

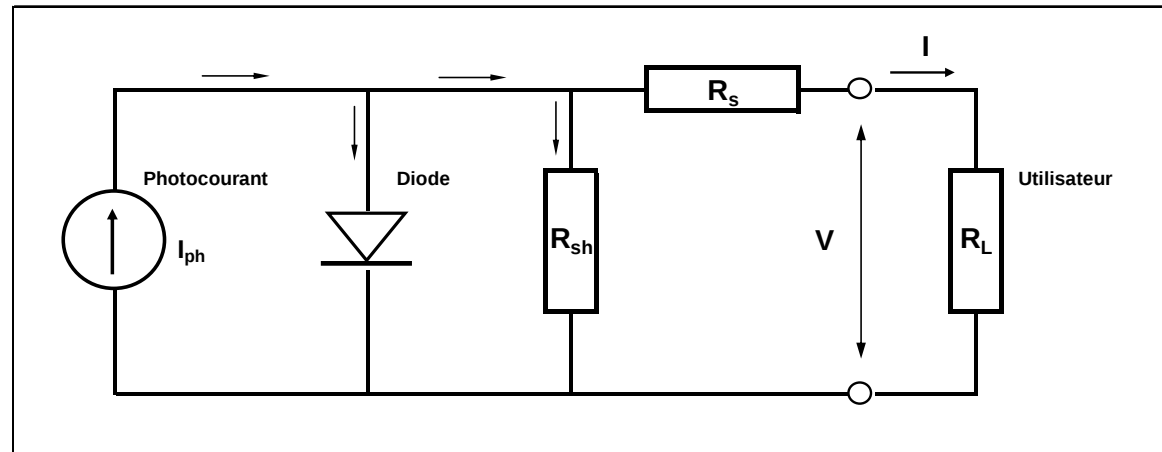
Modélisation des modules PV

Mesure de la caractéristique I/V toutes les 10 minutes



Modèle "standard" à 1 diode

La cellule PV peut être représentée par le schéma équivalent suivant:



$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(\frac{q \cdot (V + I \cdot R_s)}{N_{cs} \cdot \gamma \cdot k \cdot T_c} \right) - 1 \right] - (V + I \cdot R_s) / R_{sh}$$

Photocourant

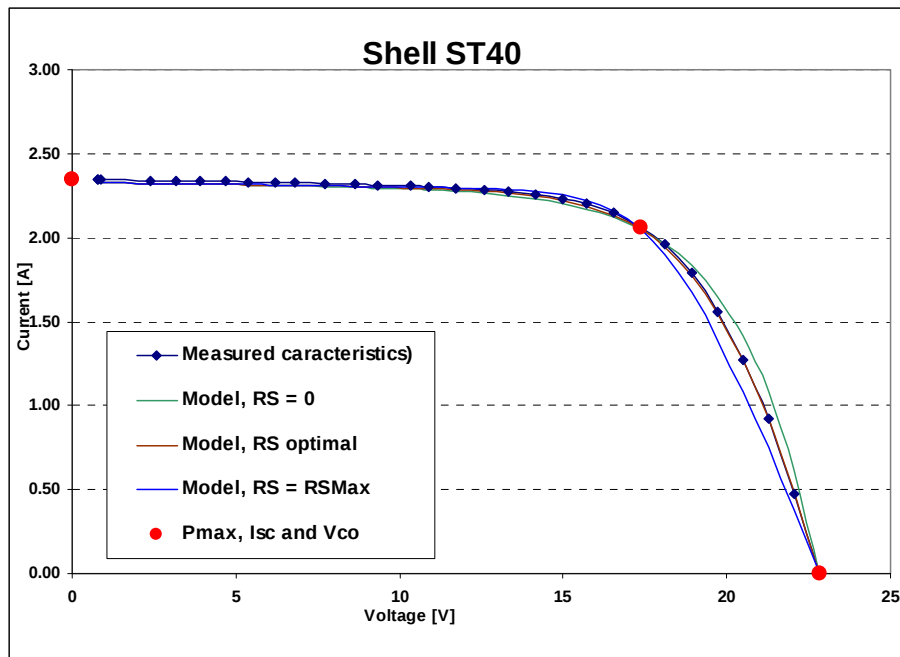
Courant dans la diode

Courant dans Rsh

Paramètres du Modèle Standard

Pour déterminer les 5 paramètres (I_{ph} , I_o , R_{sh} , R_s , γ)

La mesure complète d'une caractéristique I/V à (G_{ref} , T_{ref}) suffit !



R_{sh} est déterminé par
l'inverse de la pente à $I_{sc} = 0$

La caractéristique écrite aux 3
points remarquables donnés dans
toutes les spécifications:

$(0, I_{sc})$ (V_{mp}, I_{mp}) $(V_{co}, 0)$

donne 3 équations, dont la
résolution laisse un seul paramètre
libre, par exemple R_s

=> Pour une valeur donnée de R_s , on peut calculer I_{ph} , I_o et γ ,
donc le modèle I/V complet

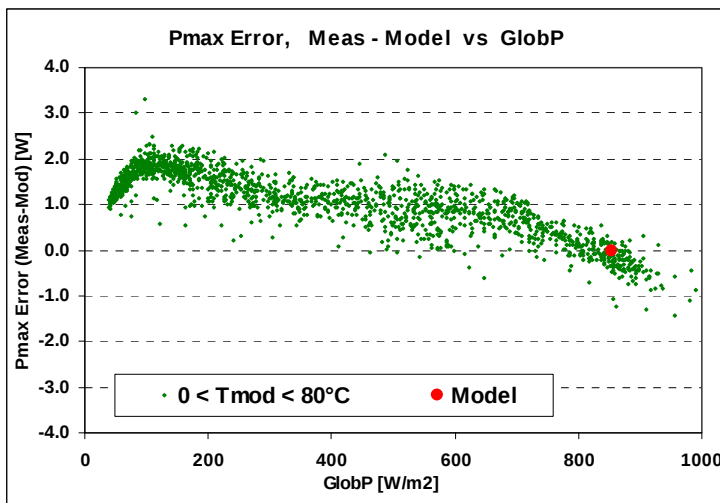
Validations du modèle

Le but du modèle est de restituer le comportement du module réel dans **toutes les conditions** d'irradiance et température.

- La qualité du modèle est estimée par les indicateurs suivants:

$$\mu = \Sigma (\text{Val. mes} - \text{Val. modèle}) / N_{\text{mes}}$$

$$\sigma = \text{SQRT} [\Sigma (\text{Val. mes} - \text{Val. modèle})^2 / N_{\text{mes}}]$$



Ex: Module Si-mono 53 Wc

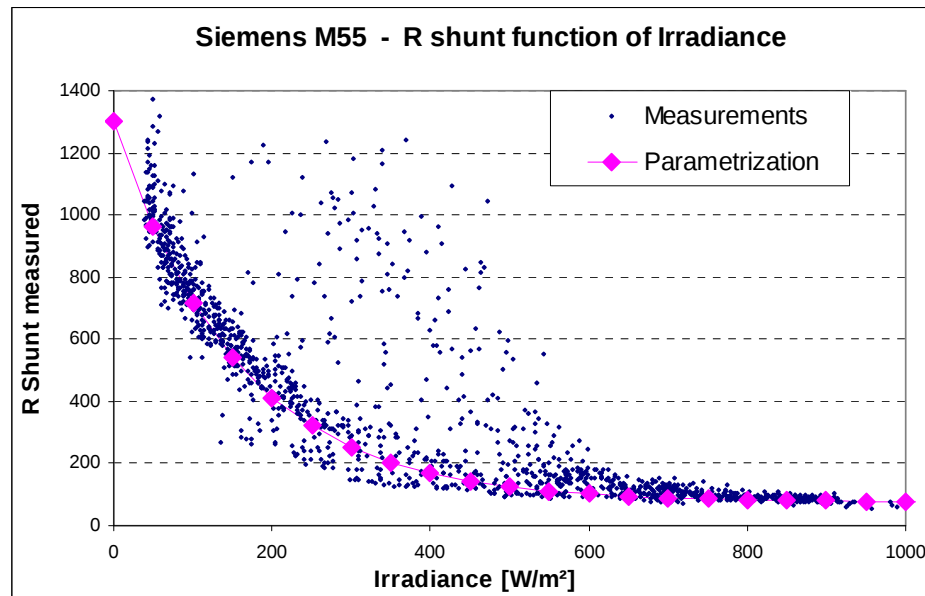
modèle standard "brut":

$\mu = 2.0\%$ $\sigma = 1.3\%$ (% de Pnom)

Correction Rshunt

Le modèle "standard" postule une Rsh constante.

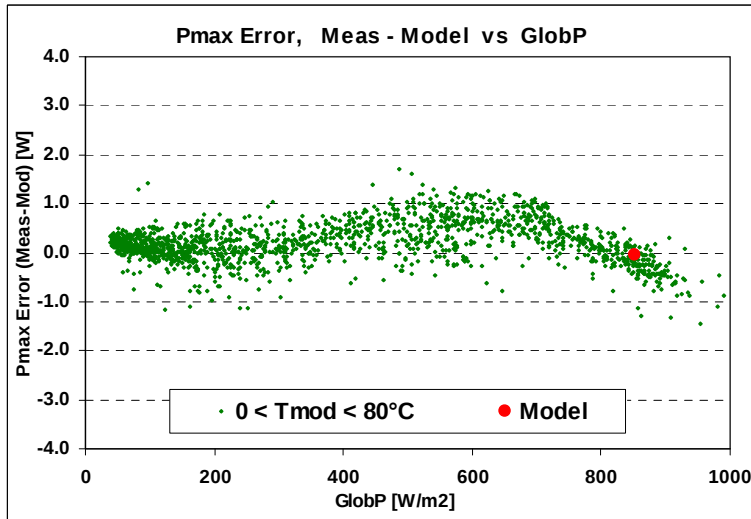
Or on constate qu'elle a une allure exponentielle selon l'irradiance:



$$R_{sh} = R_{sh}(G_{ref}) + [R_{sh}(0) - R_{sh}(G_{ref})] * \exp(-R_{sh\exp} \cdot (G / G_{ref}))$$

($R_{sh\exp}$ fixé à 5.5 pour tous les modules)

Modèle avec corr. Rshunt



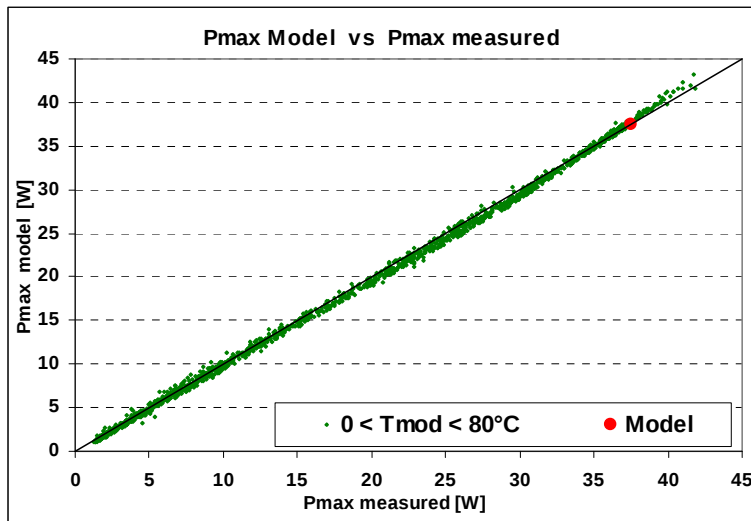
Ex: Module Si-mono 53 Wc

modèle standard + corr. Rsh:

Effet sur Pmax (% de Pnom)

Sans corr: $\mu = 2.0 \%$ $\sigma = 1.3 \%$

Avec corr: $\mu = 0.4 \%$ $\sigma = 0.7 \%$



Effet sur la modélisation de Vco:

Sans corr: $\mu = 3.1 \%$ $\sigma = 6.1 \%$

Avec corr: $\mu = -0.2 \%$ $\sigma = 1.0 \%$

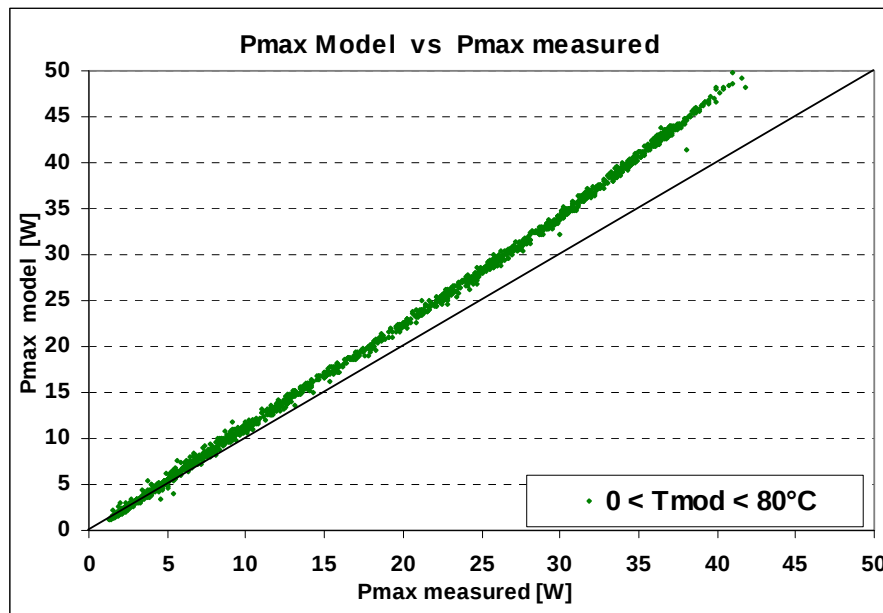
Avec spécifications fabricant

Ne pas confondre

Précision du modèle et Précision des paramètres

Modèle de qualité: si on peut trouver des paramètres pour qu'il restitue le comportement dans toutes les situation

Paramètres constructeur: peuvent être non-représentatifs du module



Mais ce sont les seuls dont on dispose pour les simulations !

Ex: Module Si-mono 53 Wc

Selon fabricant:

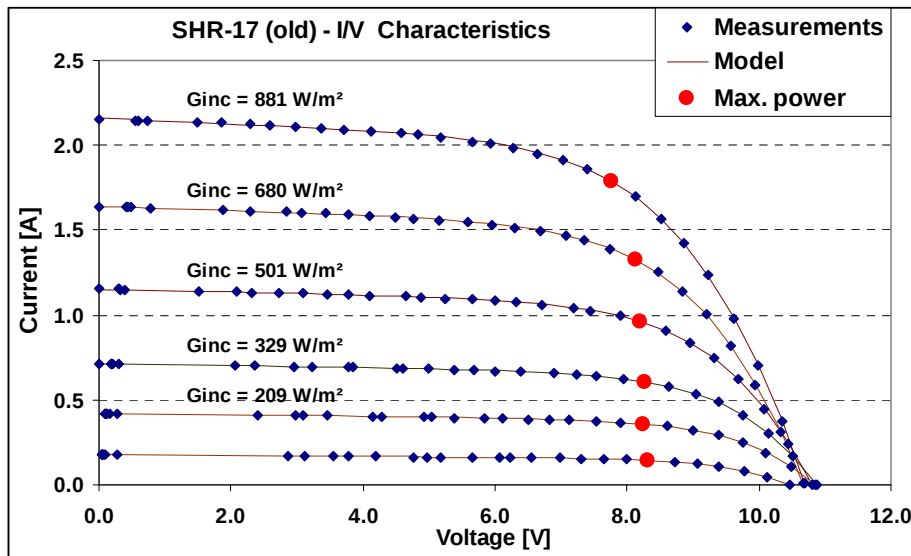
$\mu = -4.5 \%$ $\sigma = 4.0 \%$

à 1000 W/m^2 : -16%

Modélisation modules amorphes

3 corrections du modèle standard:

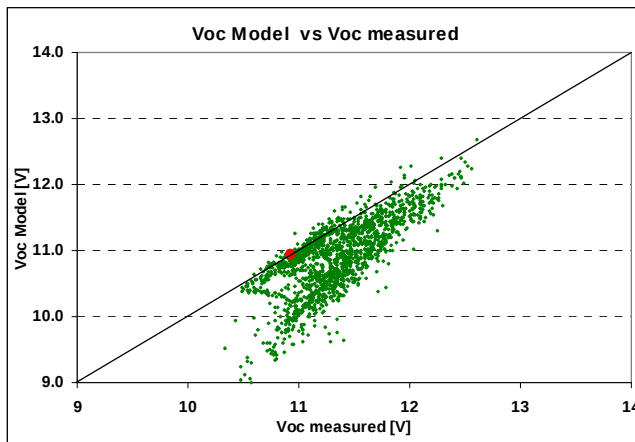
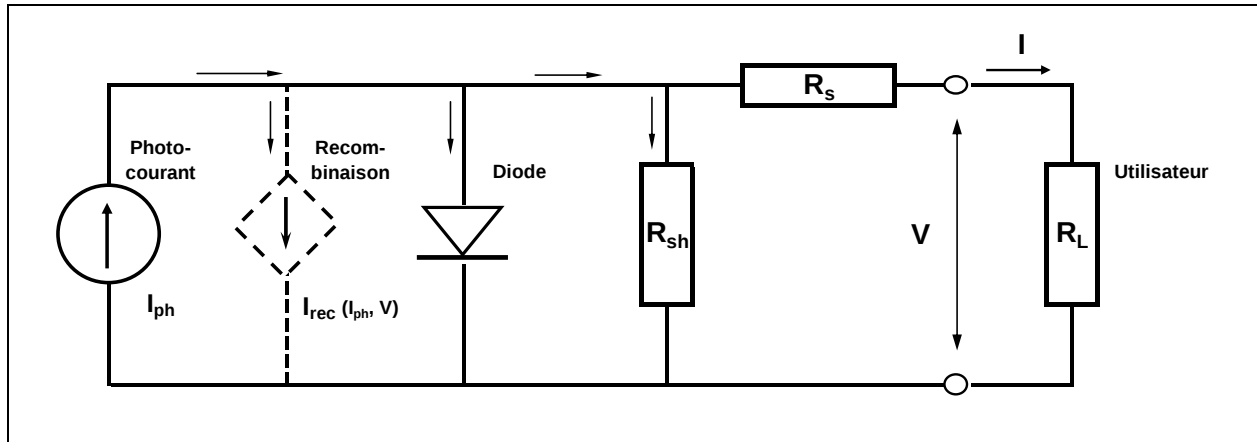
- Correction **Rshunt** - poids beaucoup plus important
- Courant de **recombinaison** dans la couche -i-
- Correction de sensibilité **spectrale**



Pour une caractéristique mesurée, il est toujours possible de construire le modèle avec grande précision
(erreurs $\sigma(I) < 0.4\%$)

Correction de recombinaison

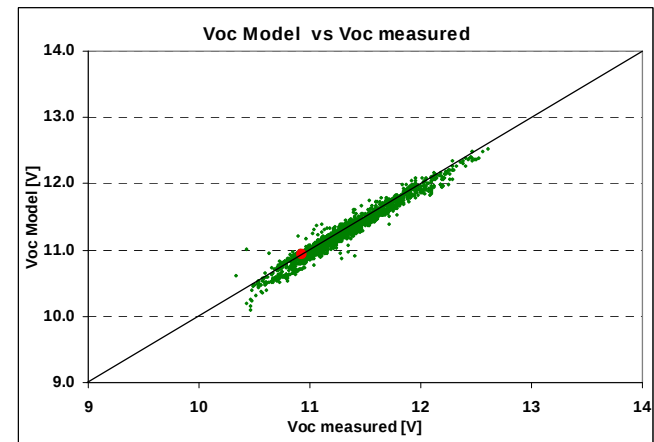
Ajoute un terme dans l'équation I/V [Mertens et al]



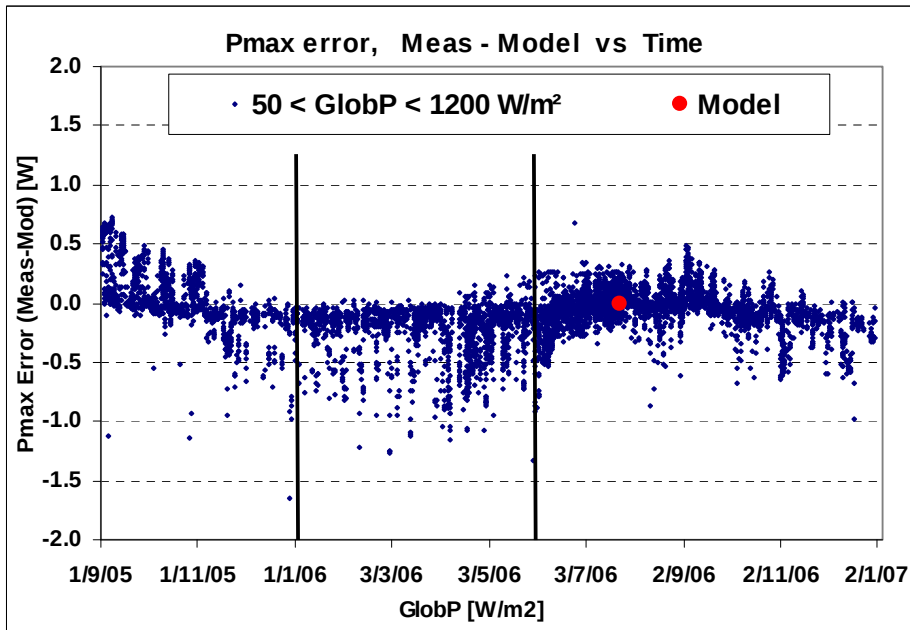
Paramètre

$$d^2 \mu \tau$$

Effet sur la tension V_{co}



Avec toutes corrections



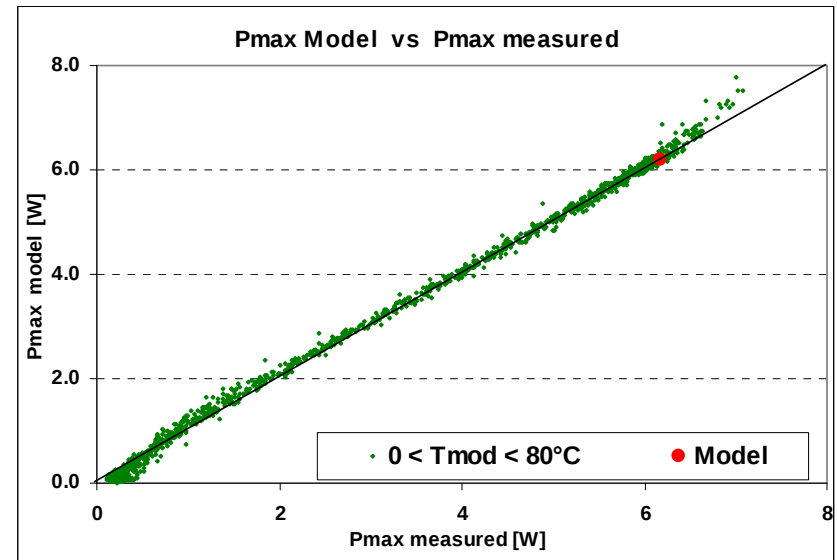
Dégradation initiale - 5%

Sur l'année complète:
phénomène d'annealing

$$\mu = -1.3\%, \quad \sigma = 3.4\%$$

Sur Juillet-août seuls:

$$\mu = -0.9\%, \quad \sigma = 1.6\%$$



Pompage Photovoltaïque



Modèle de pompe

Etablir un modèle mathématique

- qui représente le fonctionnement de **tous les types de pompes**
- dans toutes les **conditions de fonctionnement**
(puissance/tension variables selon disponibilité soleil)
- qui peut être établi avec les **données fabricant**

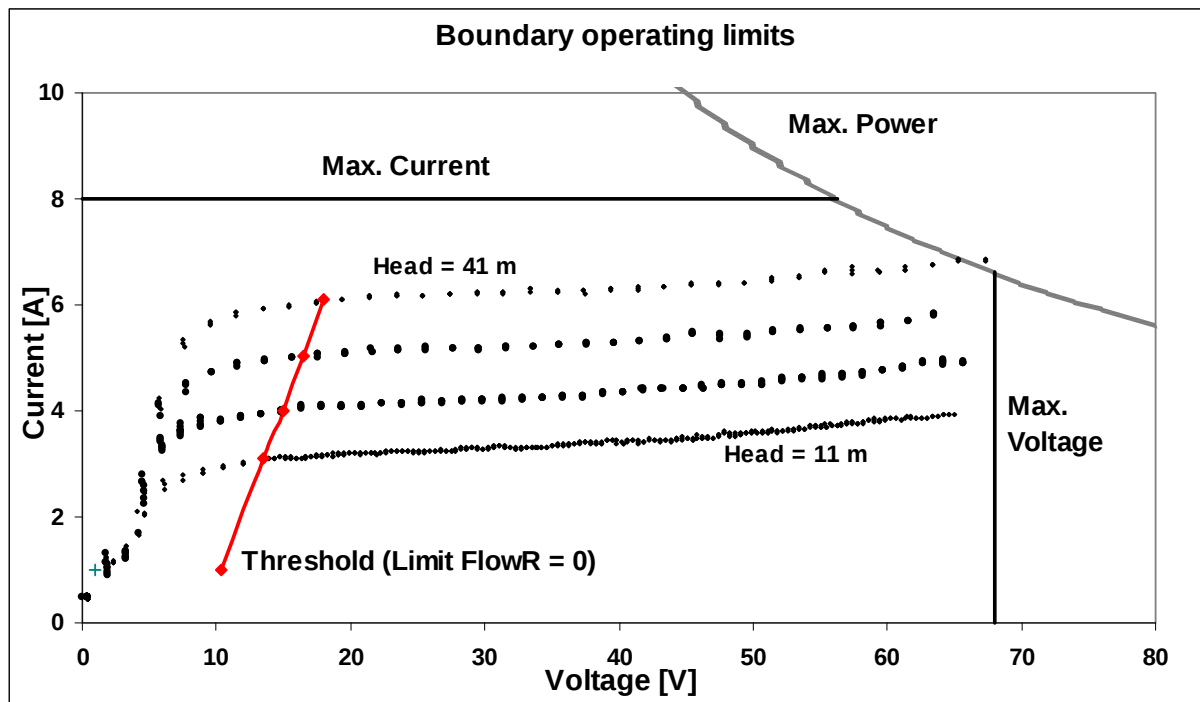
On a **4 variables**:

- Electriques: **Tension** et **Courant** (ou **Puissance**)
- Hydrauliques: **Pression** et **Débit**

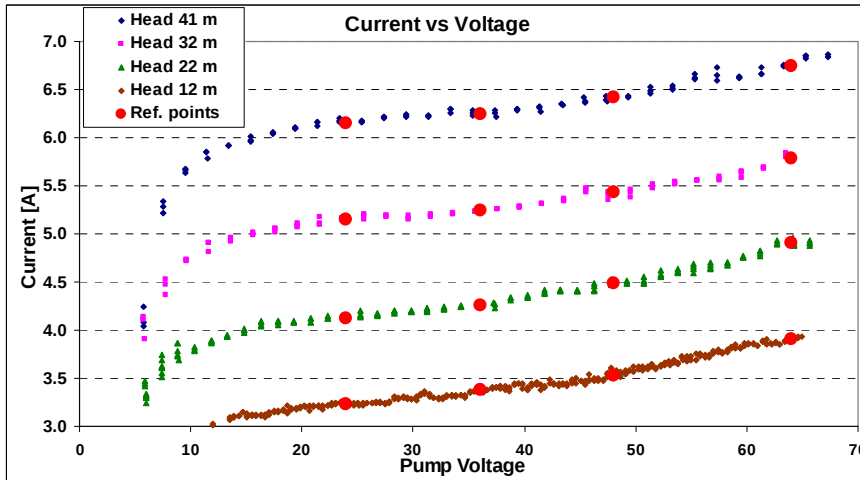
Le modèle doit établir toutes les relations entre ces variables

Modèle de pompe

.... en tenant compte de toutes les conditions aux limites (seuils et maximums)



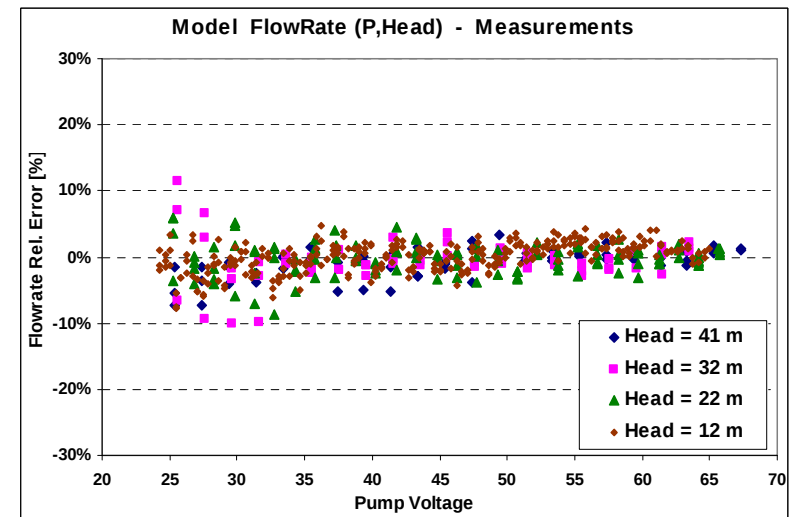
Précision du modèle



Principe:

On cale le modèle sur les points de fonctionnement donnés par le constructeur

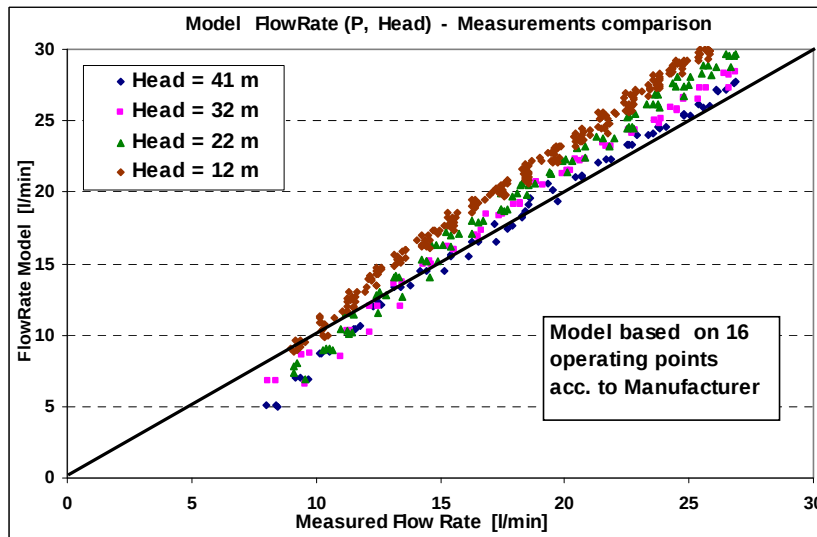
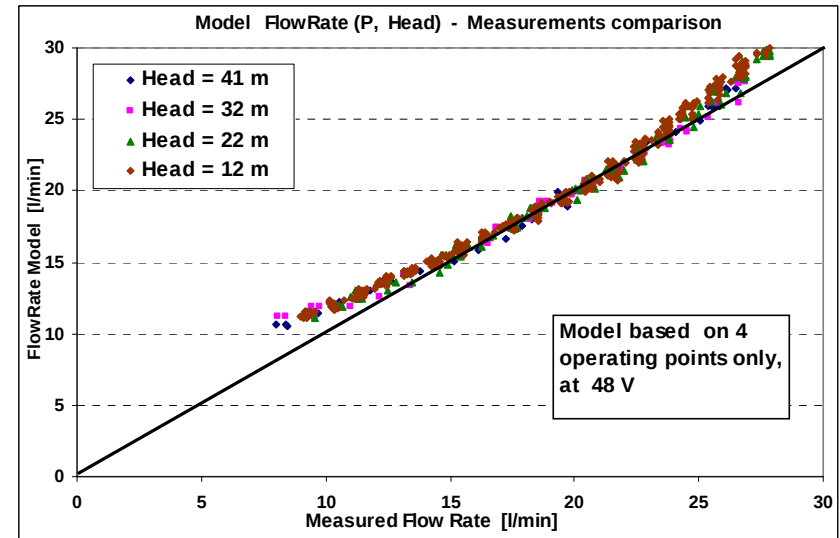
Si les données de base sont
bonnes et complètes:
la précision du modèle est excellente



Précision du modèle

Si les données sont incomplètes
(ici seulement 4 points à 48V)

Le modèle est acceptable
dans la zone de spécification



Avec les données fabricant:
On peut avoir des écarts importants
Mais pas imputables au modèle

Simulation du système

Objectif:

A partir des besoins de l'utilisateur

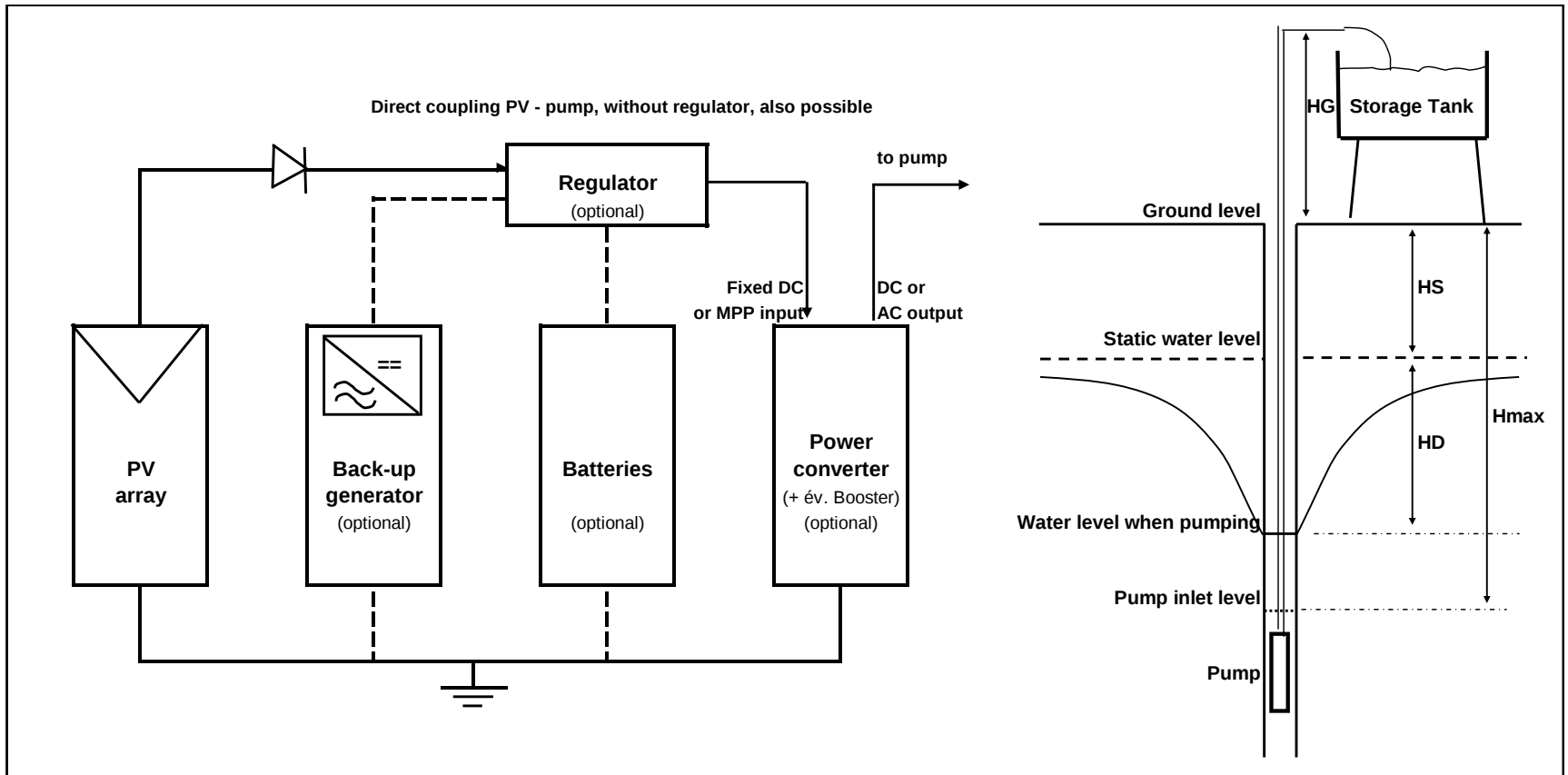
(volume d'eau selon saisons, hauteur de pompage)

Et des conditions météorologiques (sur l'année)

Dimensionner et simuler le système de pompage:

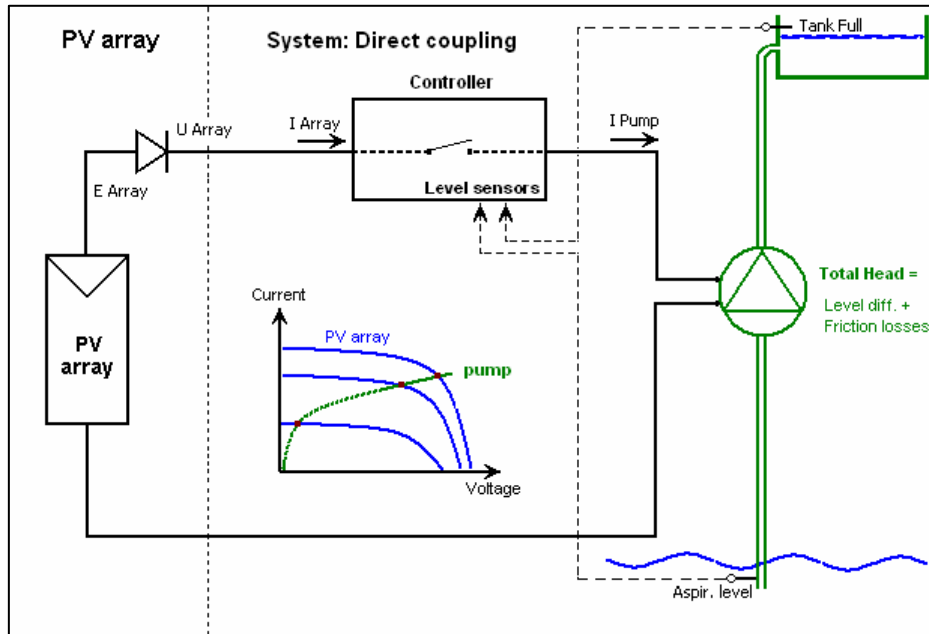
- Puissance de la pompe
- Débit nominal
- Puissance du champ photovoltaïque
- Configuration du système et régulation
- Optimisation économique

Modèle du système

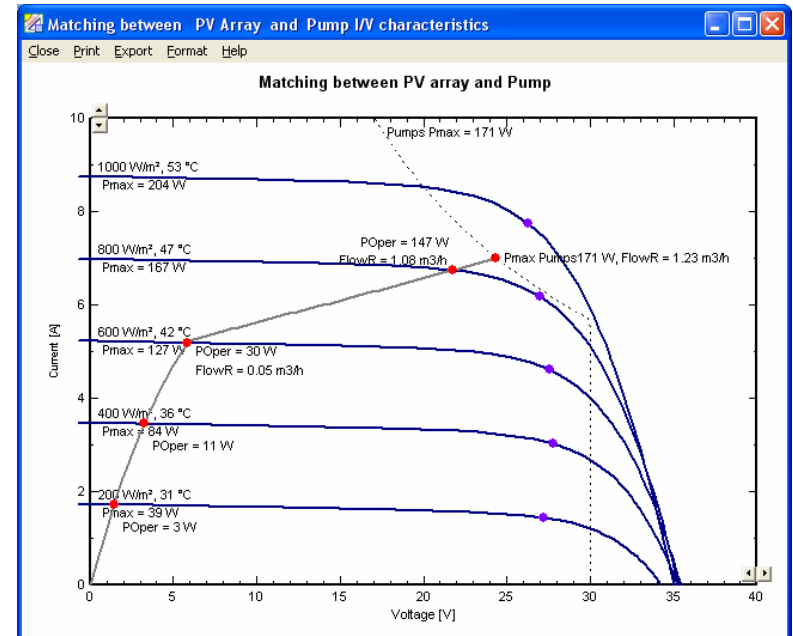


Modèle de puits: la profondeur dépend du débit

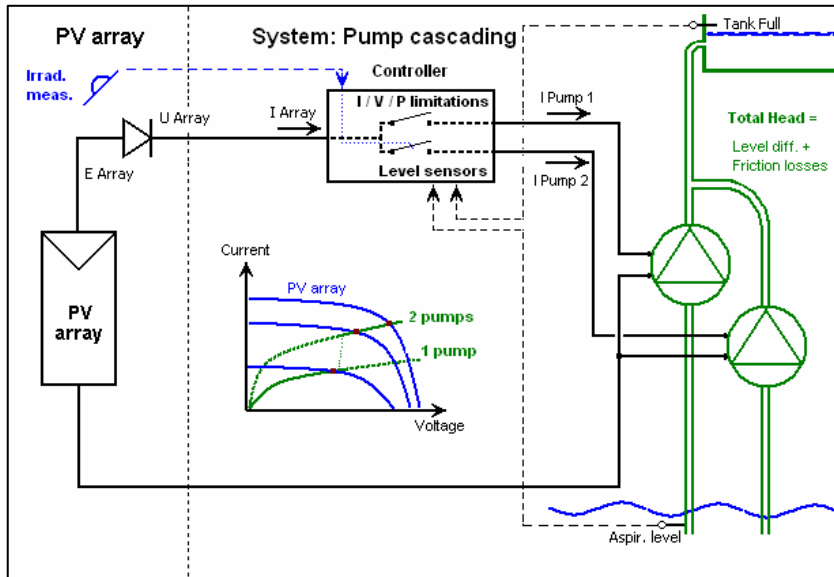
Couplage direct



Mauvaise adaptation:
à bas ensoleillement,
le champ PV
n'est pas capable
de fournir le courant

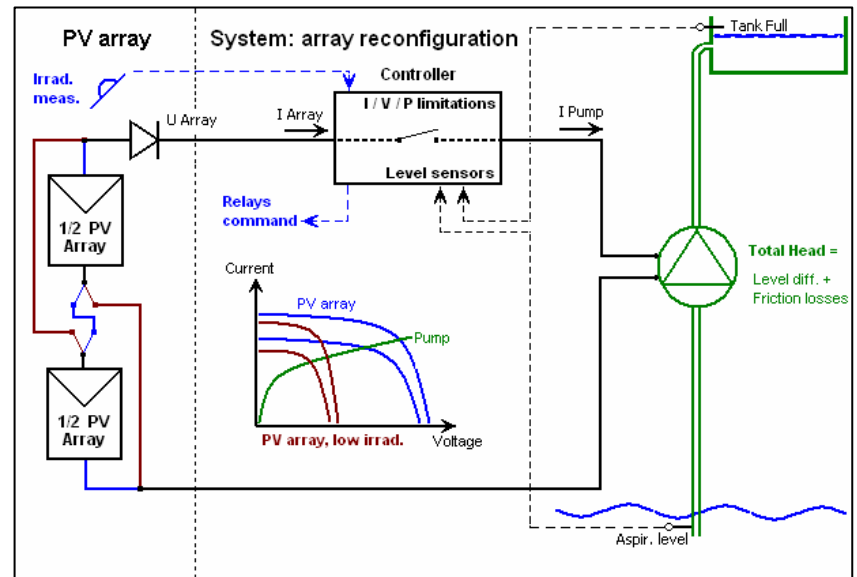


Stratégies d'amélioration

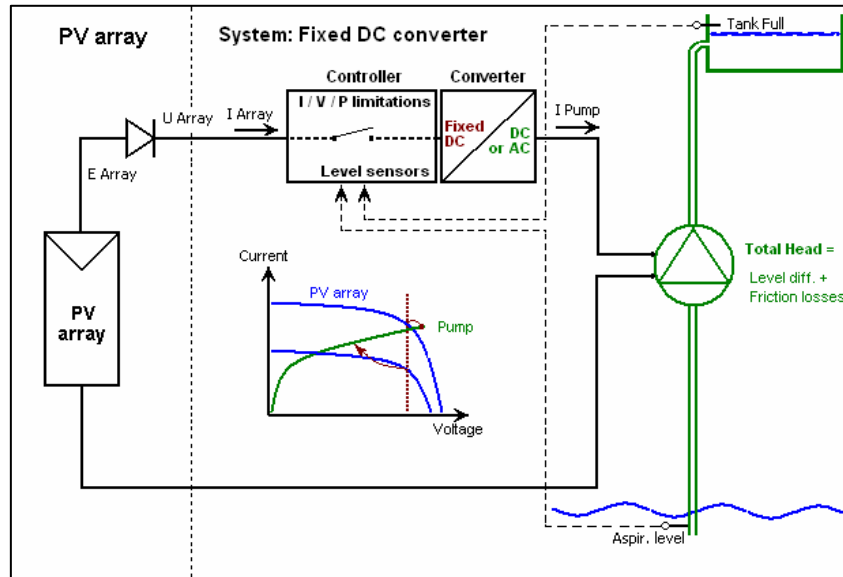


2 pompes enclenchées en cascade

Reconfiguration du champ PV en parallèle / série

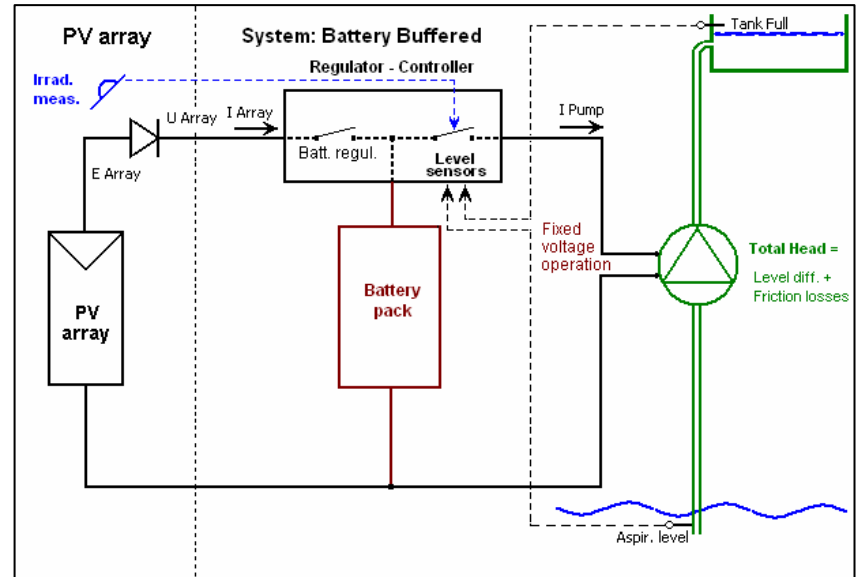


Configuration optimale



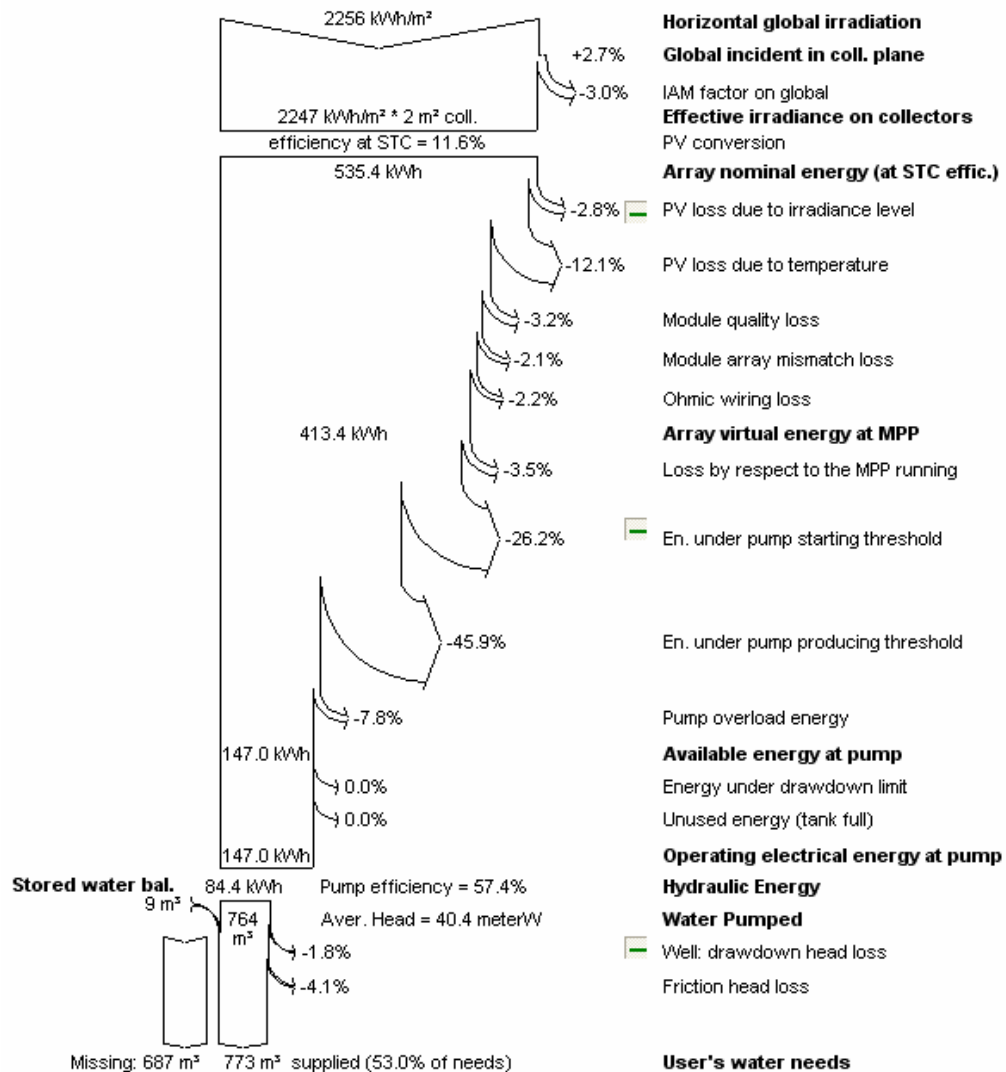
Avec convertisseur
électronique
(DC-DC ou DC-AC)

ou avec batterie tampon

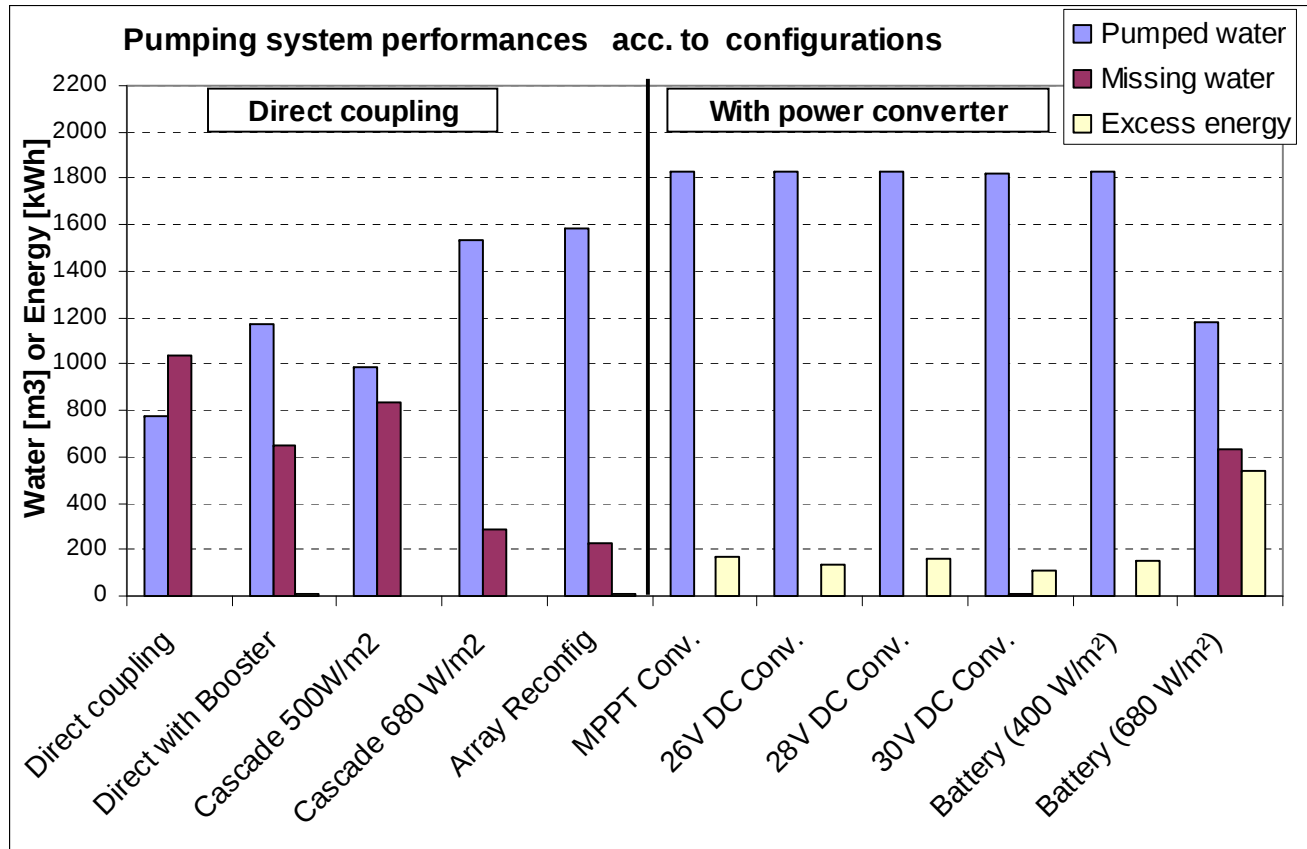


Pertes système

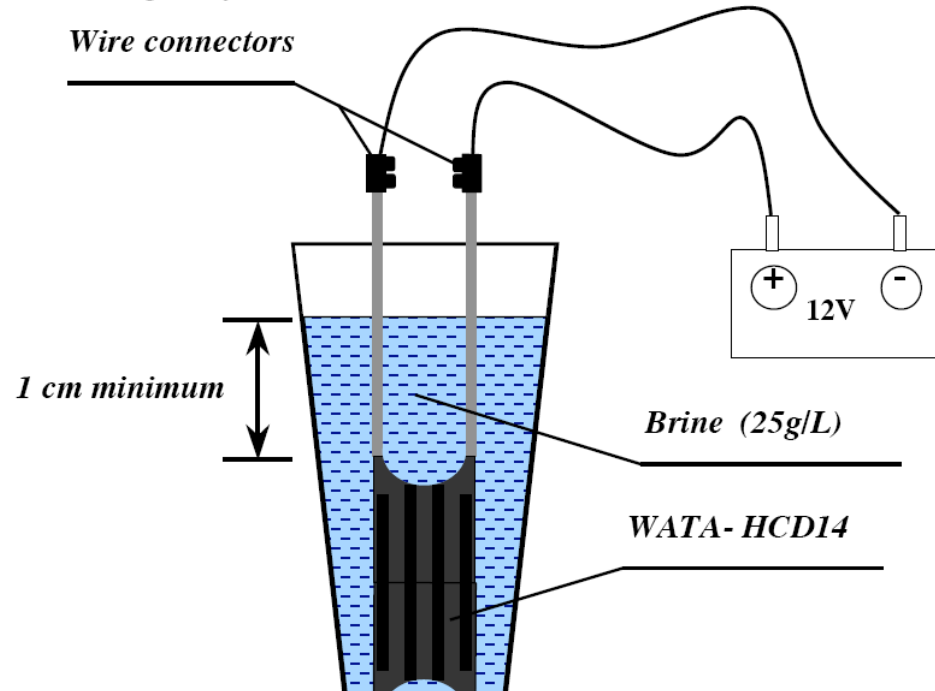
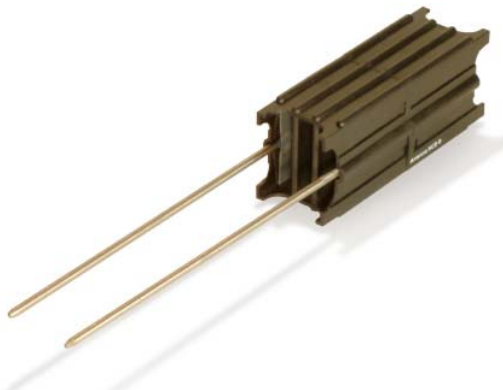
Loss diagram for "4 m³/day, H=38m, PV=240Wp, Pumps: 2 x 98W, direct coupling" - year



Résultats comparatifs



Appareil de production Hypochlorite



Production d'hypochlorite (eau de javel) à partir d'eau salée pour la potabilisation de l'eau en PVD

Appareil de production Hypochlorite

Production d'Hypochlorite (eau de Javel)
à partir de sel (NaCl) ou même d'eau de mer
pour la **potabilisation** de l'eau en conditions de brousse

Appareil d'**électrolyse** développé et distribué par
Antenna Technologies (ONG basée à Genève)

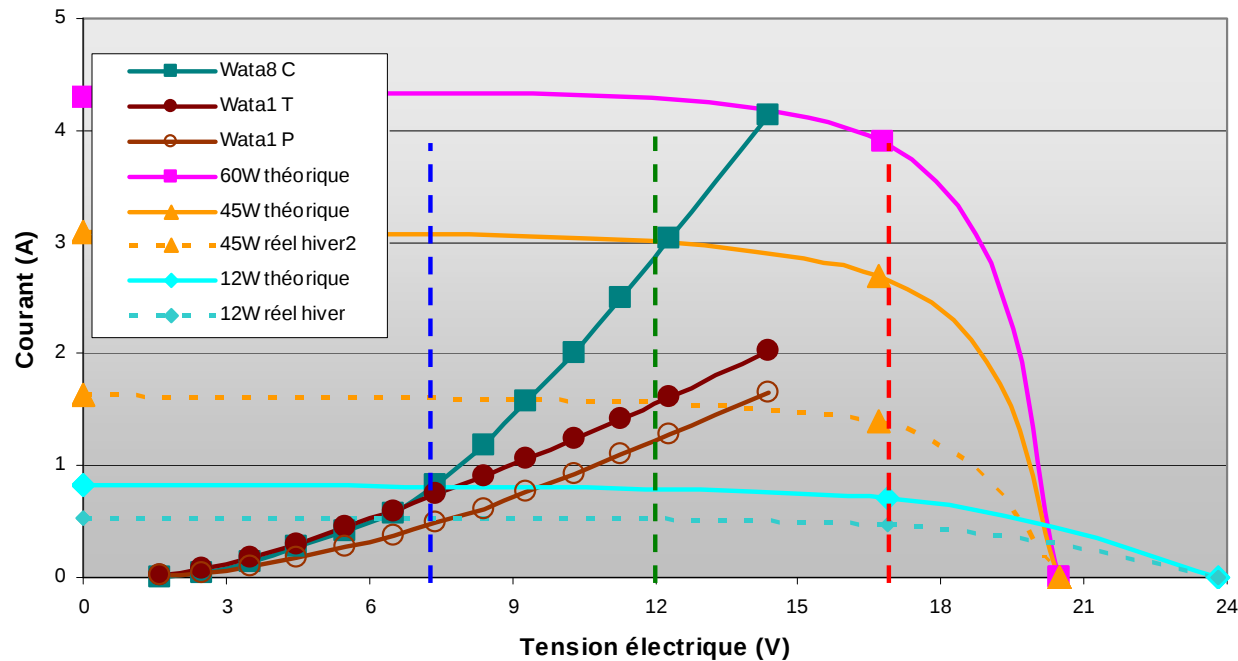
Fonctionne actuellement sur **batteries** 12V / 3A
6 heures d'électrolyse produisent 60 gr d'hypochlorite
suffisant pour potabiliser **3000 l d'eau**.

Equivalent de la production 1 jour d'un **module PV** de 60 Wc

Appareil de production Hypochlorite

Utilisation autonome avec un panneau PV de 60 Wc:
La caractéristique électrique n'est pas adaptée

Charges des Wata comparées aux caractéristiques I/V de différents panneaux solaires



Appareil de production Hypochlorite

Développement d'un régulateur électronique :

- Adaptation/**optimisation** du courant de fonctionnement
(fonctionnement par impulsions)
- Contrôle de l'**utilisation**
(Avertissement si mauvaise concentration de sel, température, court-circuit, électrodes hors de l'eau, etc)
- Contrôle du **fonctionnement**
(Comptage du courant délivré, concentration d'hypochlorite)
- Simplicité de maniement et robustesse !
- Prix !!!

Conclusions

La technologie PV a des implications:

- Régions développées: production d'énergie
Jusqu'à 20% de l'énergie électrique
- Régions isolées/en développement: prestation de service
> 30 % de la population mondiale sans électricité

Activités de recherche PV au CUEPE

- Etude / Simulation de systèmes (logiciel PVsyst)
- Systèmes couplés au réseau (efficacité énergétique)
- Systèmes autonomes (dimensionnement)
- Systèmes de pompage (recherche spécifique d'optimisation)
- Utilisation de technologies nouvelles (modélisation amorphes)
- Utilisations spécifiques de service (potabilisation)