



I N S T I T U T
P H O T O V O L T A Ï Q U E
D ' Î L E - D E - F R A N C E



PV: Vers des hauts rendements?

James Connolly



- Le contexte politique
- Un survol de la physique
 - L'état de l'art
- Pistes vers les hauts rendements

[Barack Obama, janvier 2017](#) B. Obama, *Science* 10.1126/science.aam6284 (2017) : Les énergies renouvelables sont irréversibles car:

- L'économie croît, les émissions baissent
- Réductions d'émissions dans le secteur privé
- Les forces du marché dans le secteur de l'énergie

Conclusion: *"In recent years, we have also seen that the economic case for action - and against inaction - is just as clear, the business case for clean energy is growing, and the trend toward a cleaner power sector can be sustained regardless of near-term federal policies."*

Cite as: B. Obama, *Science*
10.1126/science.aam6284 (2017).

The irreversible momentum of clean energy

By **Barack Obama**

President of the United States, Washington, DC 20500, USA.
Email: press@who.eop.gov. After 20 January 2017: contact@obamaoffice44.org

Private-sector efforts help drive decoupling of emissions and economic growth

The release of carbon dioxide (CO₂) and other greenhouse gases (GHGs) due to human activity is increasing global average surface air temperatures, disrupting weather patterns, and acidifying the ocean (1). Left unchecked, the continued growth of GHG emissions could cause global average temperatures to increase by another 4°C or more by 2100 and by 1.5 to 2 times as much in many midcontinent and far northern locations (1). Although our understanding of the impacts of climate change is increasingly and disturbingly clear, there is still debate about the proper course for U.S. policy—a debate that is very much on display during the current presidential transition. But putting near-term politics aside, the mounting economic and scientific evidence leave me confident that trends toward a clean-energy economy that have emerged during my presidency will continue and that the economic opportunity for our country to harness that trend will only grow. This Policy Forum will focus on the four reasons I believe the trend toward clean energy is irreversible.

ECONOMIES GROW, EMISSIONS FALL

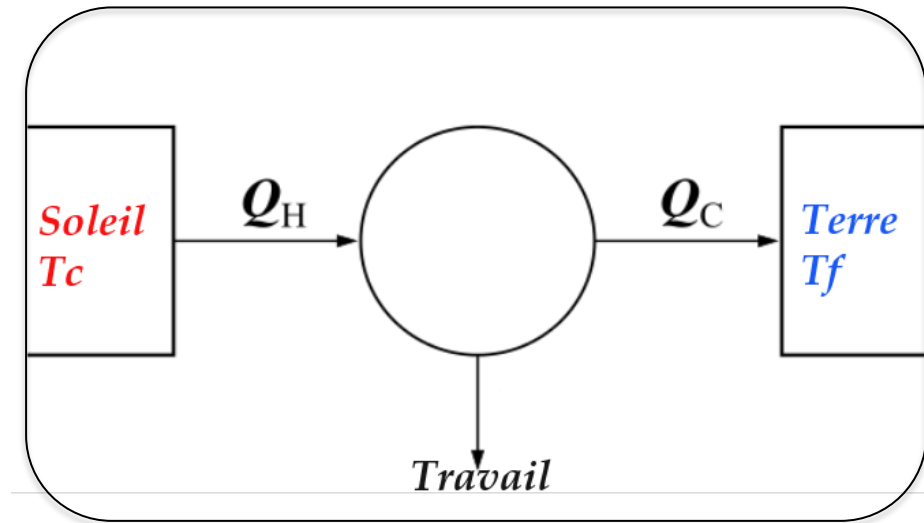
The United States is showing that GHG mitigation need not

nary estimate of energy-related CO₂ emissions in 2015 reveals that emissions stayed flat compared with the year before, whereas the global economy grew (3). The IEA noted that “There have been only four periods in the past 40 years in which CO₂ emission levels were flat or fell compared with the previous year, with three of those—the early 1980s, 1992, and 2009—being associated with global economic weakness. By contrast, the recent halt in emissions growth comes in a period of economic growth.”

At the same time, evidence is mounting that any economic strategy that ignores carbon pollution will impose tremendous costs to the global economy and will result in fewer jobs and less economic growth over the long term. Estimates of the economic damages from warming of 4°C over preindustrial levels range from 1% to 5% of global GDP each year by 2100 (4). One of the most frequently cited economic models pins the estimate of annual damages from warming of 4°C at ~4% of global GDP (4–6), which could lead to lost U.S. federal revenue of roughly \$340 billion to \$690 billion annually (7).

Moreover, these estimates do not include the possibility of GHG increases triggering catastrophic events, such as the

Introduction: Les limites de rendement



- Rendement: $\text{Travail} / Q_H = 1 - T_f (\text{Terre}) / T_c (\text{soleil})$
- Le soleil: 6000 kelvin, the solar cell 300K

=> Rendement \approx 95%

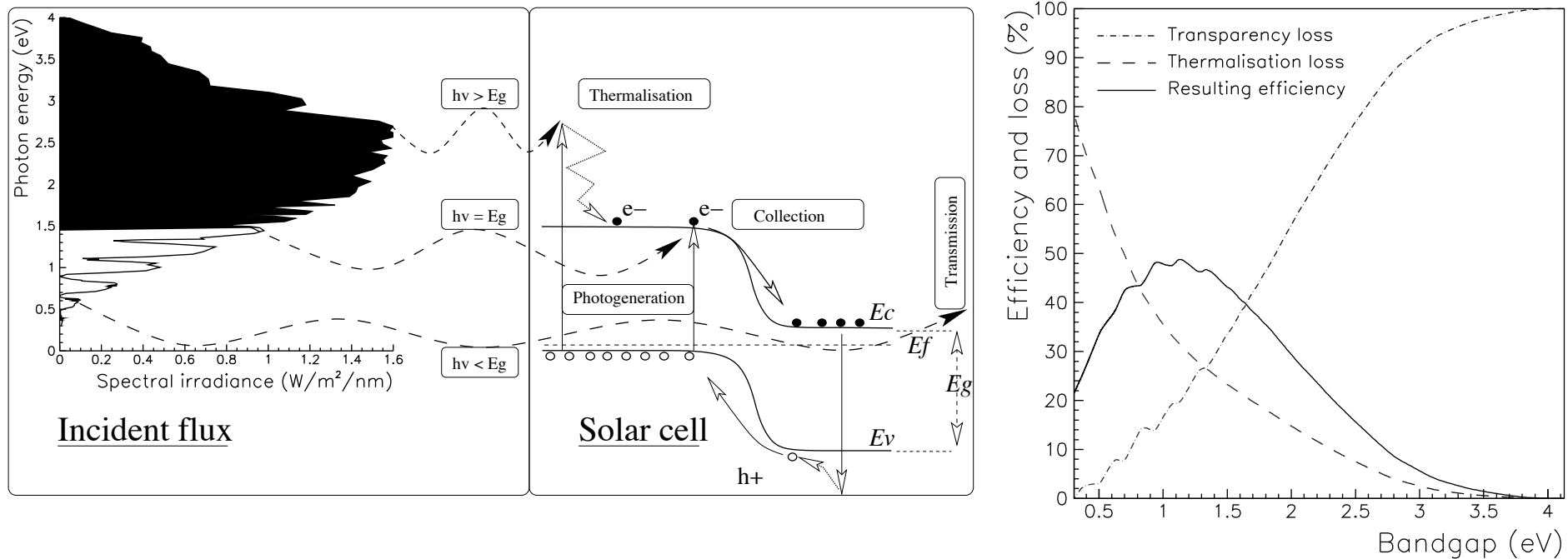
C'est le traitement le plus simple – Des traitements plus complexes existent, voir par exemple Hirst¹

Suite: des concepts plus réalistes.

Limites: une approche conceptuelle

Quel est le rendement de cellules **simple homojonction** supposant:

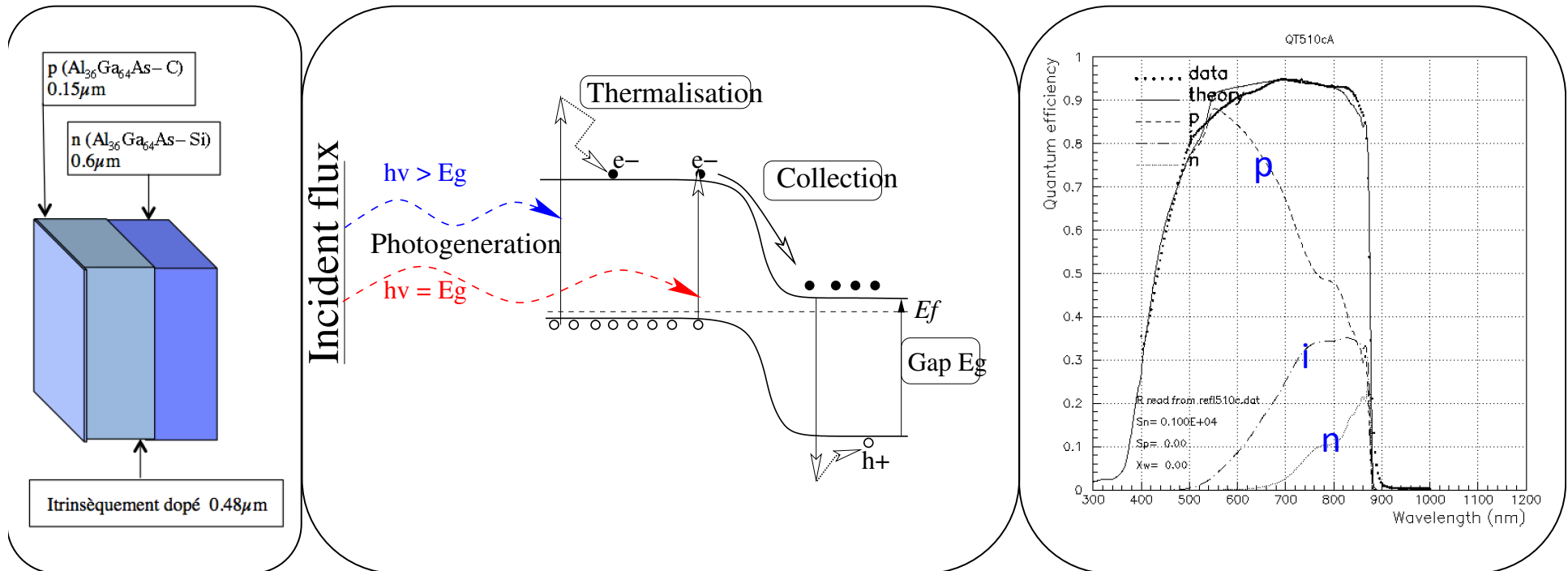
- **Perte de thermalisation:** Les porteurs tous livrés à l'énergie du gap.
- **Perte de transmission:** l'absorption complète au-delà du gap, transparente en dessous.



=> efficacité limite: **49%** pour un gap de **1.13eV** (près du Si à 1.12)

Limites: un exemple réel – la cellule GaAs

Les concepts de la **photogénération**:



La structure:
une jonction pin

La génération de photocourant:
Génération – Thermalisation – Collecte

Réponse spectrale et rendement quantique QE:
Le courant en fonction de la longueur d'onde.

$$J_{PH}(V) = q \int_{E_{g_{i-1}}}^{E_{g_i}} QE(\lambda, v) F(\lambda) \frac{\lambda}{hc} d\lambda$$

La réponse sous illumination: Le rendement quantique (QE) et le photocourant $J_{PH}(0V)$ (ou $J_{SC} = J_{PH}(0V)$)
La base de la conversion photovoltaïque.

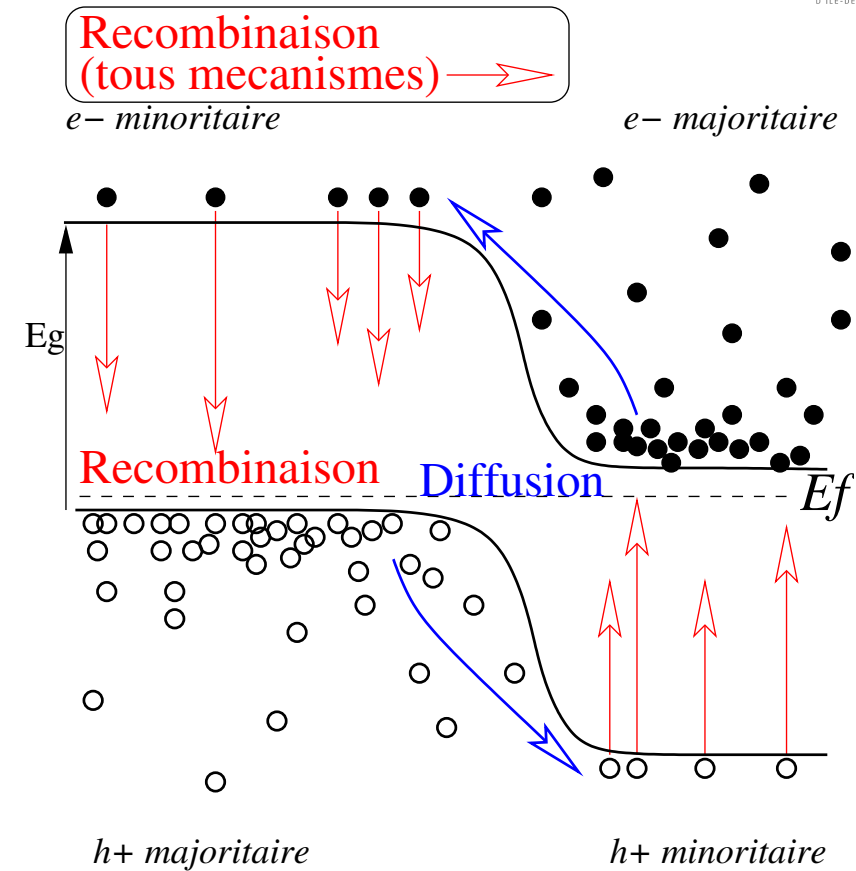
Limites: mécanismes réalistes à l'équilibre

Le concept de **mécanismes de perte**:

Le courant Ideal Shockley³

- Diffusion de majoritaires
- Recombinaison de minoritaires

=> équilibre dynamique à 0V:
diffusion <-> **recombinaison**



A noter: **L'idéal Shockley J_S n'est pas idéal**, et est incomplet:

- Il néglige la zone de charge d'espace
- Il ne différencie pas entre les mécanismes de recombinaison

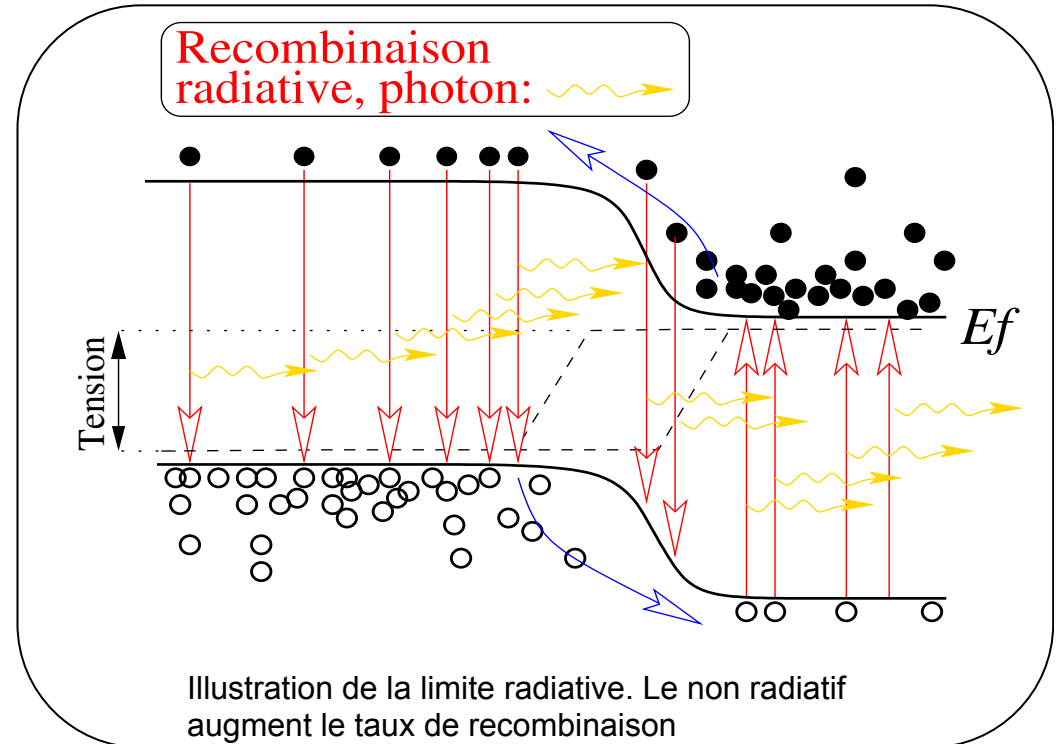
Limites: mécanismes réalistes sous illumination

Mécanismes sous illumination:

- Génération et collecte => Courant J_{SC}
- **Recombinaison radiative**⁴ - Planck: J_{RAD}
 "ce qui monte peut descendre"
 <=>
 "Ce qui absorbe doit émettre"
- **Recombinaison non-radiative**: J_{NR}
 Pertes assistées par défauts principalement.

La somme donne le courant sous illumination:

$$J_L(V) = J_{SC}(V) - J_{RAD}(V) - J_{NR}(V)$$

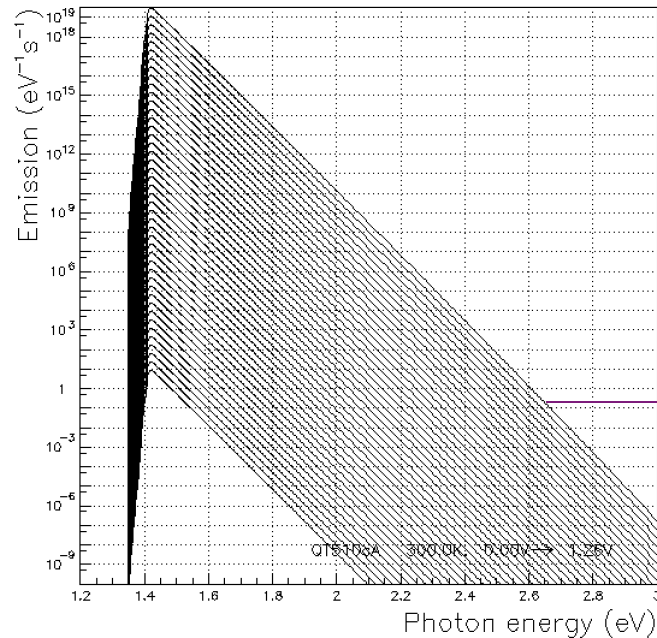


$$\text{Le rendement} \approx \text{Max} \left[\frac{(J_{SC} - J_{RAD} - J_{NR}) \cdot V_{mp}}{\text{Puissance incidente}} \right]$$

=> Réduire J_{RAD} et J_{NR} pour le haut rendement

Les pertes radiatives J_{RAD}

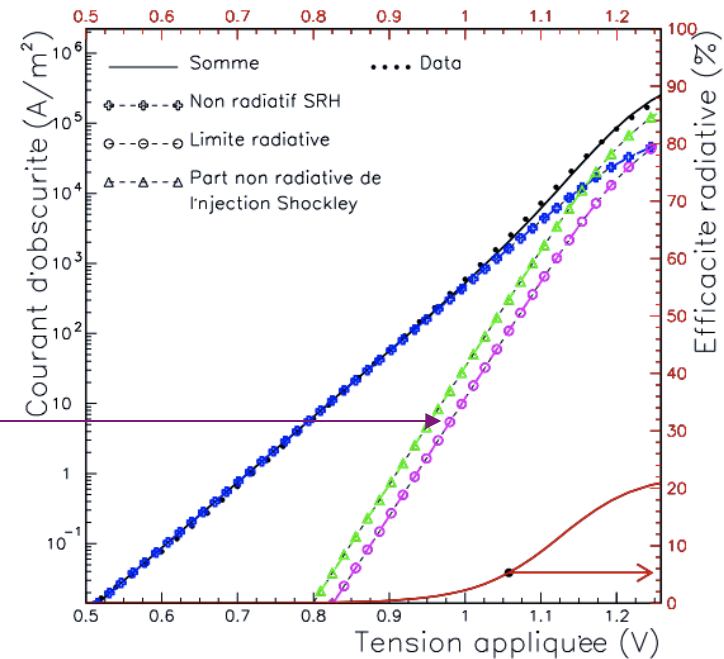
Le phénomène opposé à l'absorption: la **recombinaison radiative**⁵:



Luminescence en fonction d'énergie de photon émis pour tensions (V) appliquées. L'intégrale donne $J_{RAD}(V)$:

$$J_{RAD}(V) = q \int_0^\infty \left(\frac{2n^2}{h^3 c^2} \left(\frac{E^2}{e^{(E-q\Delta\phi)/k_b T}} \right) \int_S \alpha(E, \theta, S) dS \right) dE$$

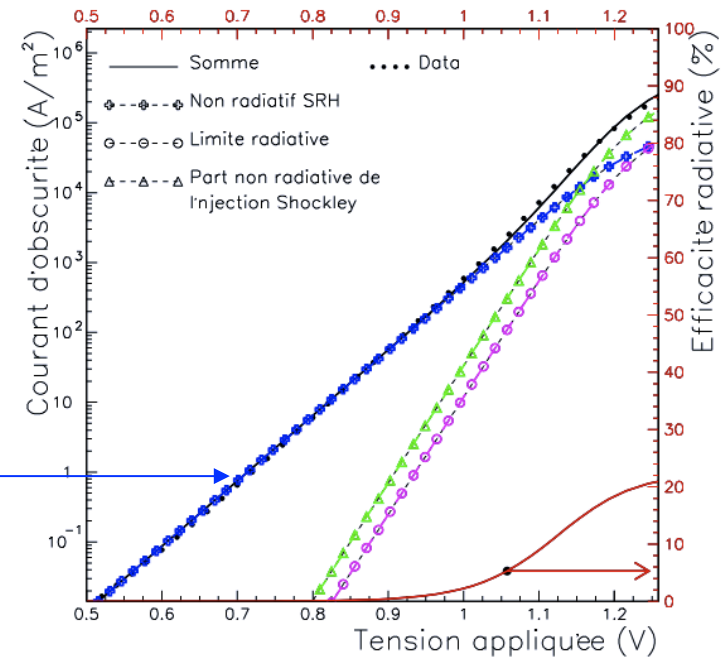
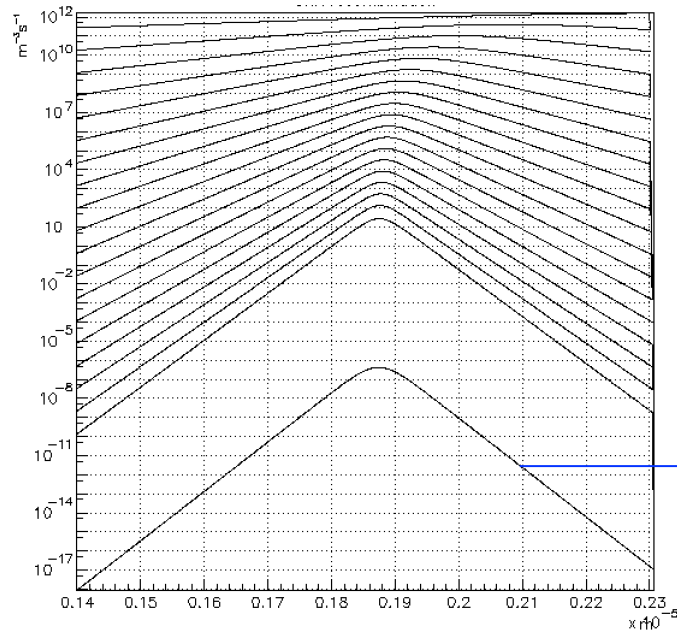
=> On retient: **réduire la lumière émise = réduire le courant de recombinaison radiatif.**



Le courant **radiatif** J_{Rad} est fonction de l'absorption

Les pertes non radiatives J_{SRH}

Le taux SRH: La recombinaison dans la zone de charge espace assistée par défauts dans le gap⁶:



Recombinaison non-radiative SRH en fonction position pour tensions (V) appliquées.

L'intégrale donne J_{SRH} :

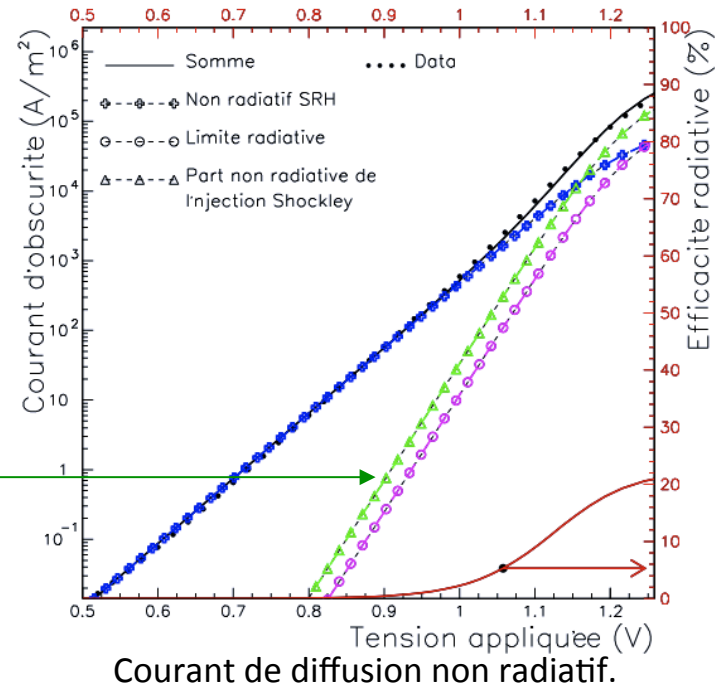
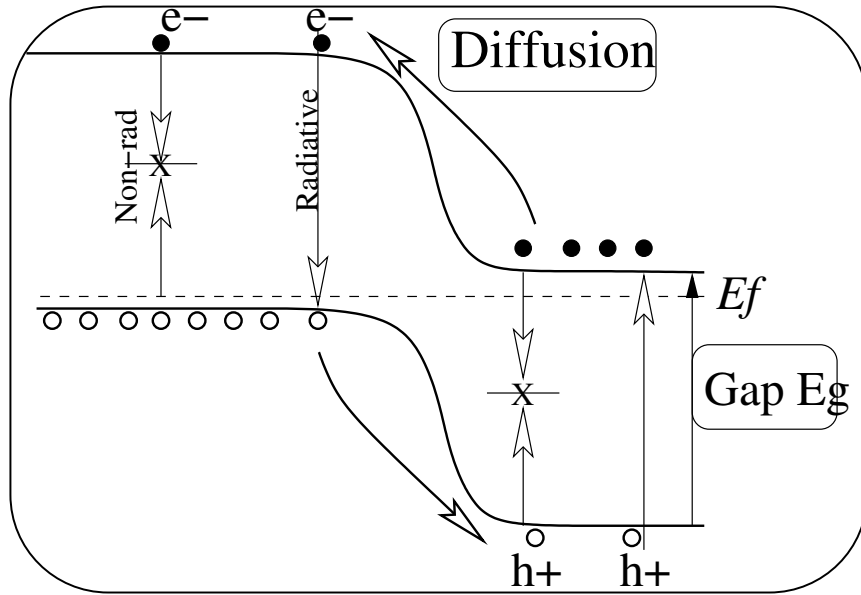
$$J_{SRH}(V) = q \int_{x_1}^{x_2} \left(\frac{p(x)n(x) - n_i^2}{\tau_n(p(x) + p_t) + \tau_p(n(x) + n_t)} \right) dx$$

Le courant non-radiatif est fonction la densité de porteurs de défauts, de durées de vie.

=> On retient: réduire les défauts en zone de charge espace = réduire le courant de recombinaison SRH

Les pertes non radiatives J_s

Courant d'injection Shockley $J_s(V)$ 'idéal' ⁷ : Courants radiatifs et non-radiatifs de zones neutres.
 Le calcul radiatif permet de distinguer ces contributions : => **Courant d'injection non radiatif**



Idéal Shockley *non radiatif* :

$$J_s(V) = q \left(e^{\frac{qV}{k_b T}} - 1 \right) \left[\frac{n_{ip}^2 D_n}{N_A L_n} \left(\frac{S_n L_n}{D_n} \cosh \frac{x_p}{L_n} + \sinh \frac{x_p}{L_n} \right) + \frac{n_{in}^2 D_p}{N_D L_p} \left(\frac{S_p L_p}{D_p} \cosh \frac{x_n}{L_p} + \sinh \frac{x_n}{L_p} \right) \right]$$

=> On retient: **réduire diffusion = réduire le courant de recombinaison principalement non radiatif.**

[7] James P. Connolly, Denis Mencaraglia, "III-V solar cells", chapitre (pp.135-159) du livre "Materials Challenges: Inorganic Photovoltaic Solar Energy", The Royal Society of Chemistry, editeur Stuart Irvine, 2015. DOI:10.1039/9781849733465-00209 - Preprint: <http://arxiv.org/abs/1312.2908>

Conclusions de ce survol de concepts clé:

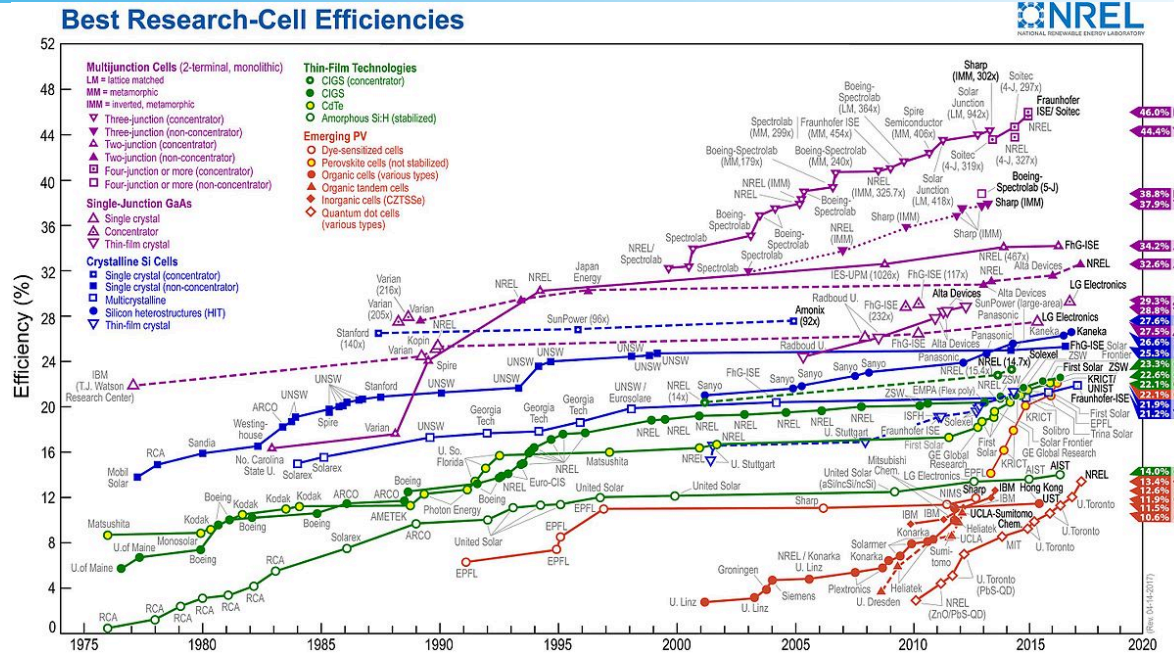
Nous avons survolé :

- La **conversion** photovoltaïque
- Pertes **optiques**.
- Pertes par **thermalisation**.
- Pertes par **recombinaison**.

La suite:

- Une **revue des technologies** les plus pertinentes
- Une examination de quelques **pistes à haut rendement**

Les rendement records actuels – l'état de l'art



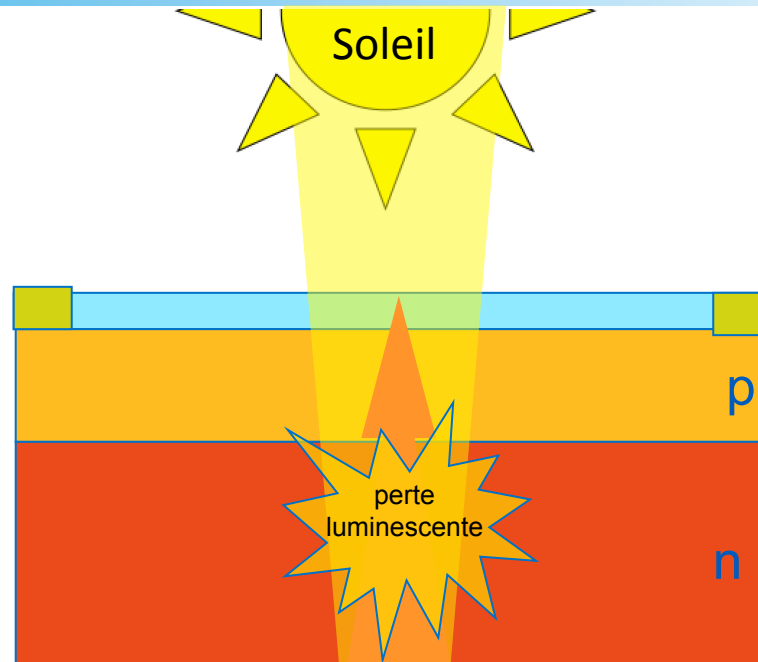
Classe	Types	Rdmt. (%)
Silicium	Crystallin, polycristallin, hétérojonction	26.6
Couches minces	CISG, CdTe, aSi	22.6
Organiques	À colorants, plastiques, perovskite	13.4
Matériau III-V	GaAs -> GaInAsP(N)	28.8
Multijonctions	Sous concentration	46
Émergents	Conversion de spectre, porteurs chauds, nanostructures (points quantiques)	13.4%

Pistes →

- Cas spéciaux Organique / inorganiques: les **perovskites** non stabilisées 22%
- Les **multijonction** loin en avant (sous concentration) – structures III-V, IV, II-VI et hybrides
- Cas spéciaux inorganiques: Les **structures quantiques**
En tête: les puits quantiques 27.3% (sous concentration)

- La **luminescence**
- La **thermalisation**

Réduire la luminescence:



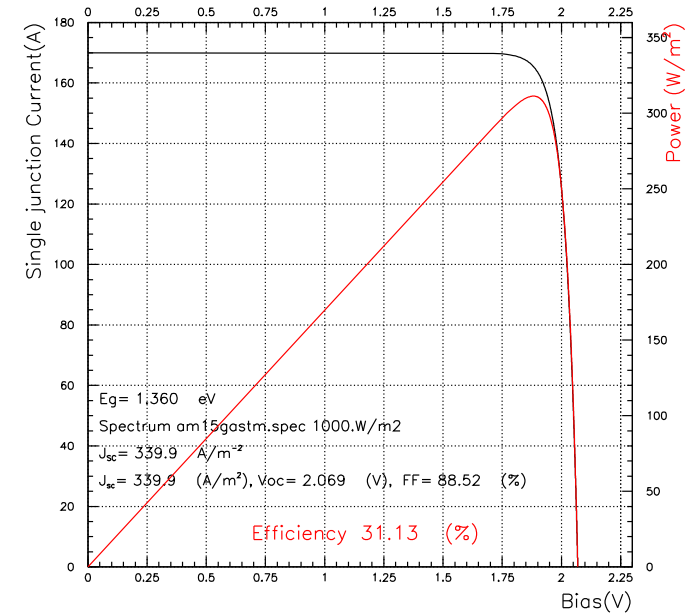
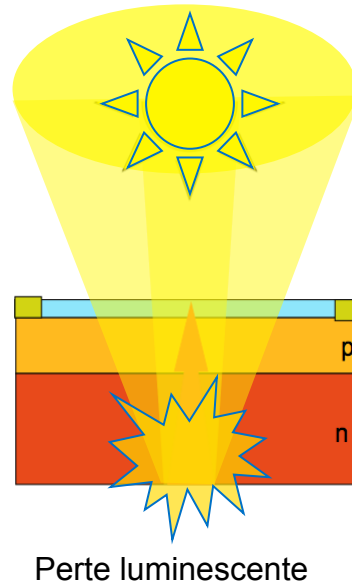
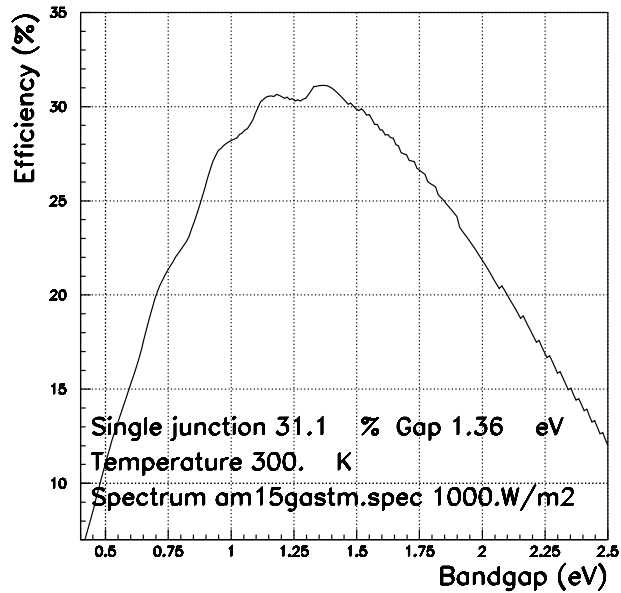
Réduction maximale des pertes radiatives luminescentes:



- **Restriction de l'émission** au minimum: Le nécessaire pour l'absorption. Équivaut à la réduction maximale de l'étendue de la lumière absorbée. Parallèles avec des concepts thermodynamiques d'entropie minimale.
- Solution: **Manipulation de l'étendue** – angle solide d'absorption et émission

=> **Méthode simple: Mettre une loupe – La concentration lumineuse.**

Example simple jonction

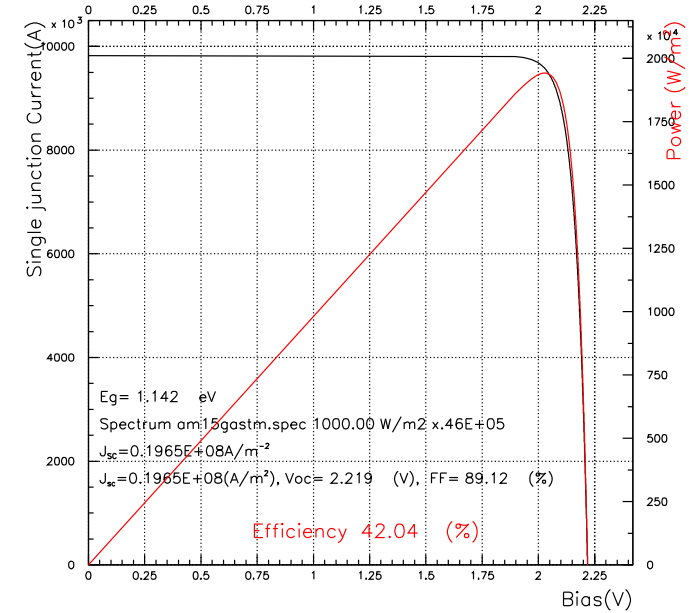
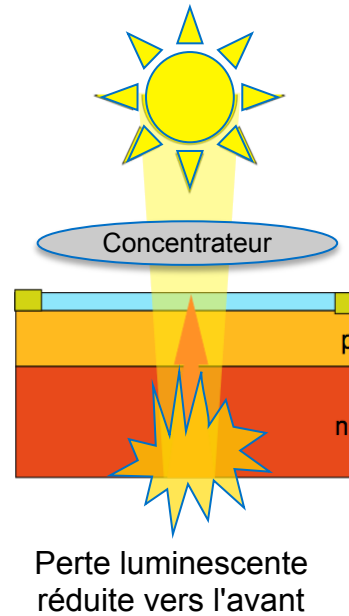
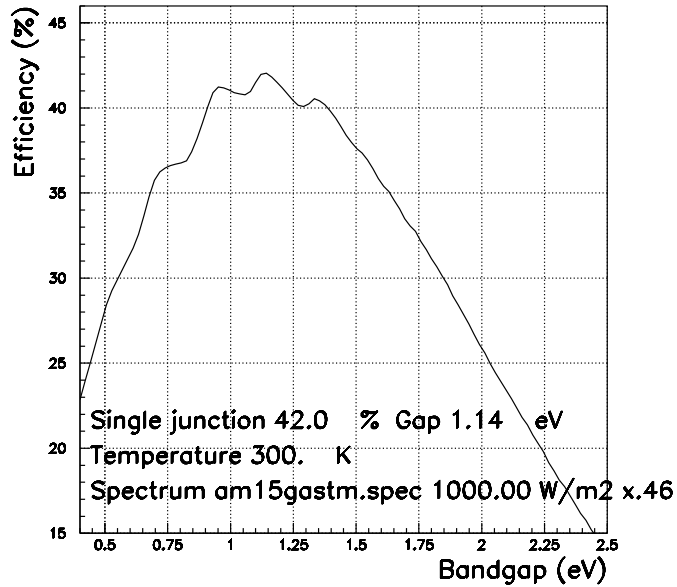


La limite Shockley-Queisser radiative : 31%

- L'Absorption: Angle solide défini par le soleil.
- L'émission: Angle solide défini par l'étendue (indice de réfraction)

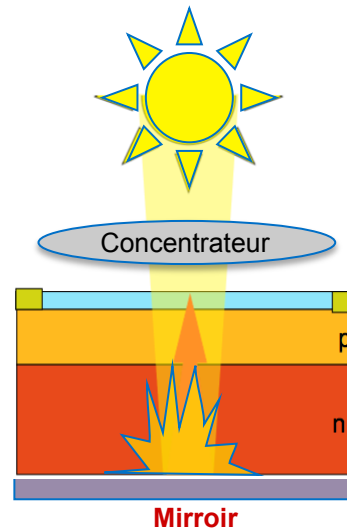
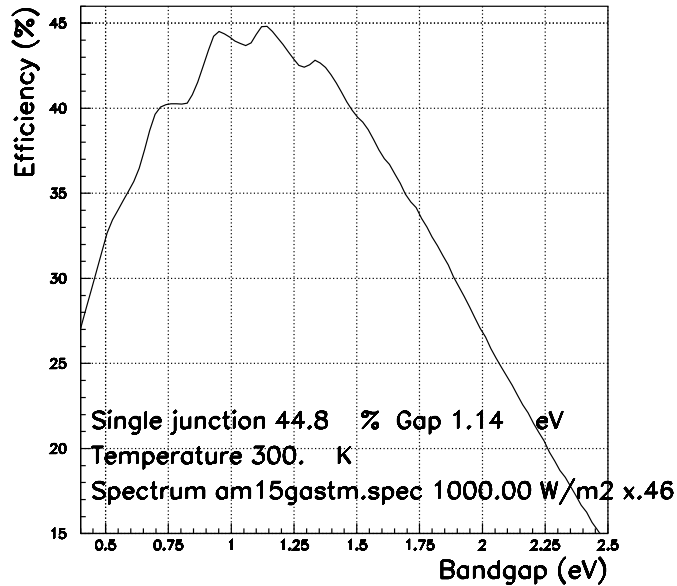
=> Large perte avant et arrière.

Concentrer la lumière dans la limite radiative

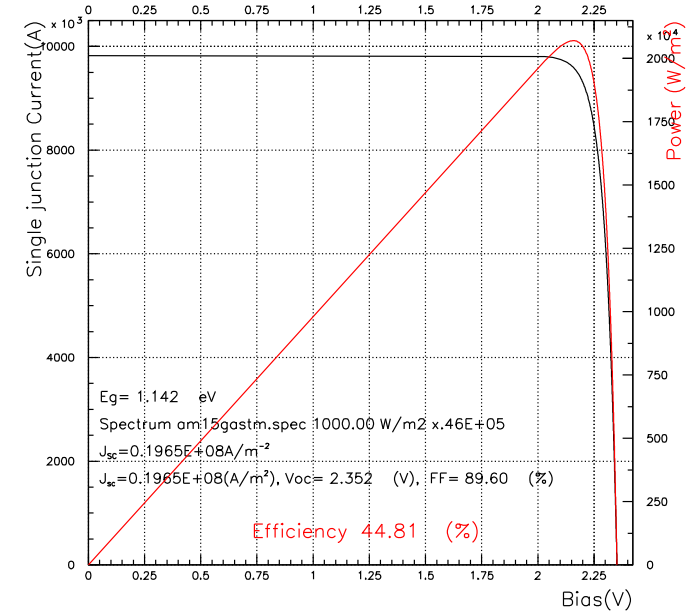


Concentration maximale: ≈ 46200 : 42.0%

Concentration lumineuse avec restriction d'émission



Perte lumineuse réduite vers l'avant et surtout vers l'arrière.



Concentration maximale avec miroir : **44.8%**

Remarques:

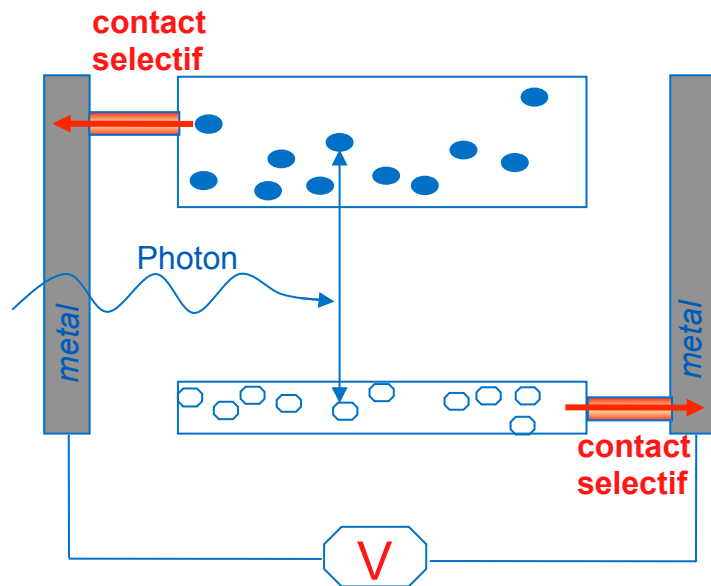
- Le courant d'une cellule idéale est saturé: I_{sc} est constant
- La recombinaison radiative baisse: La tension V_{oc} augmente

Un mot sur les porteurs chauds

La cellule à porteurs chauds:

Technologie de réduction de pertes de thermalisation a deux piliers conceptuels:

- Manipuler l'interaction électron / phonon afin de **ralentir la thermalisation**:
=> Population de porteurs chauds
- Extraire les porteurs à une énergie optimale: **Contacts sélectifs en énergie**.



Proposition élégante: Collecte sans thermalisation

=>

Simple jonction - rendement de **multijonction infinie!**

Rendement sans concentration $\leq 67\%$

Points à résoudre

- Thermalisation beaucoup plus rapide que collecte
- Technologiquement: Contacts sélectifs non démontrés

Liens avec les nanostructures quantiques:

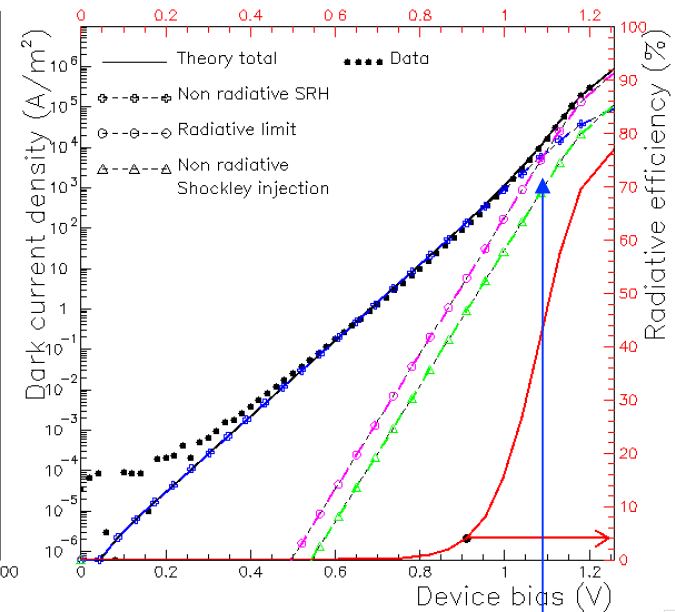
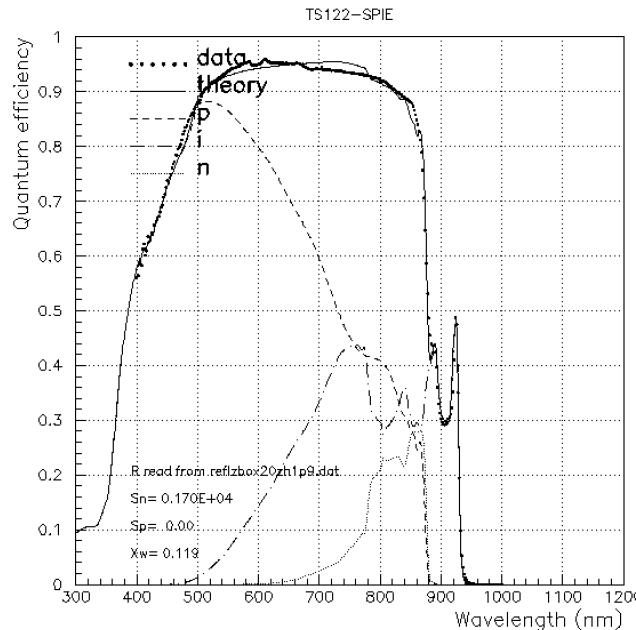
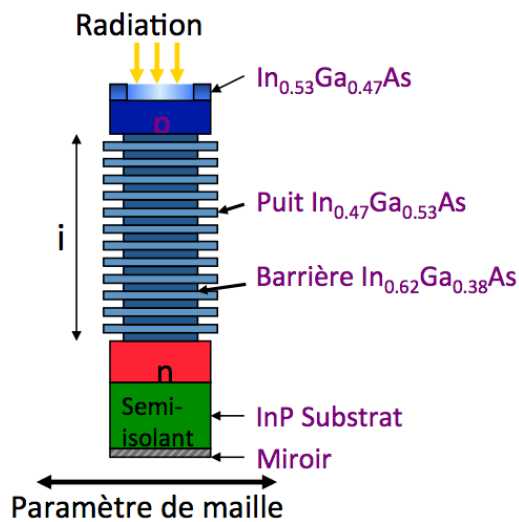
Contacts sélectifs • points quantiques • puits quantiques.

Phénomènes de porteurs chauds observés dans les nanostructures.

Un mot sur les structures quantiques

Atout principaux:

- large gamme de matériaux – l'ingénierie de bandes facilitée⁸
- Approche de la limite radiative (car le gap des puits est plus bas)



On s'approche de la limite radiative

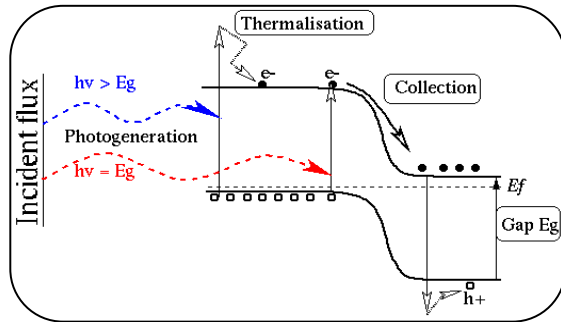
Record⁹: 27.5 ± 0.5%

[8] J.P. Connolly, Analytical models of bulk and quantum well solar cells and relevance of the radiative limit, in *Advanced Solar Cell Materials, Technology, Modeling, and Simulation*, IGI Global, pp. 59 (2012). DOI:10.4018/978-1-4666-1927-2.ch005 - Preprint <https://arxiv.org/abs/1110.1561>

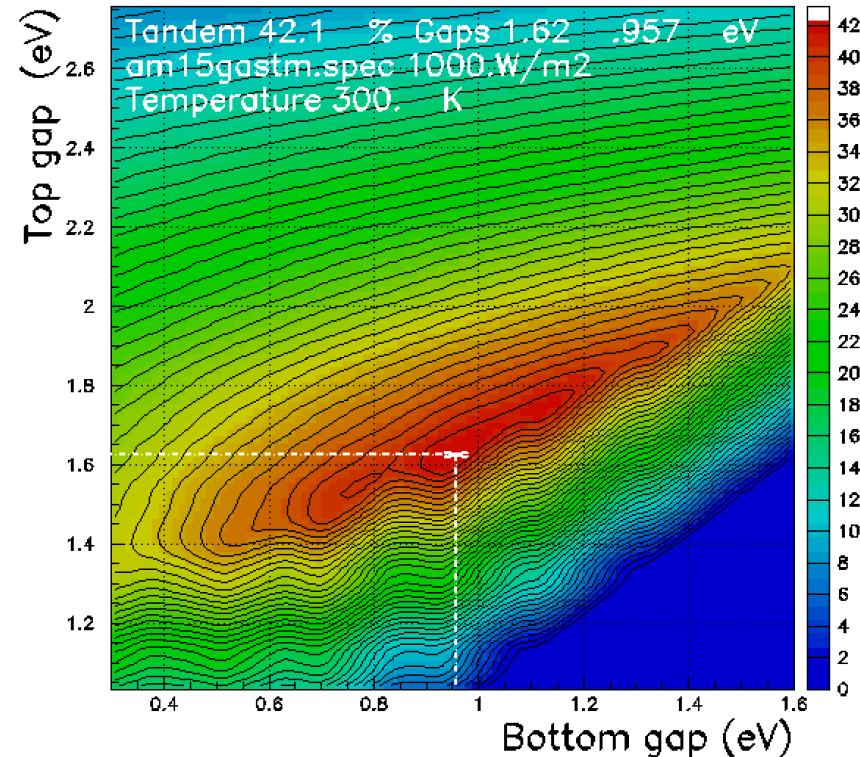
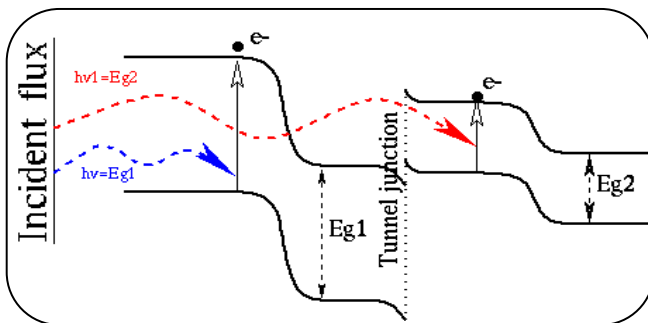
[9] N. J. Ekins-Daukes *et al.* *Appl. Phys. Lett.* 75, 4195 (1999); DOI: 10.1063/1.125580

Le mot final: les cellules multijonctions

La simple jonction p-i-n



La cellule multispectrale



Limite de rendement pour une cellule tandem avec seule recombinaison radiative: 42% (spectre AM1.5G terrestre)

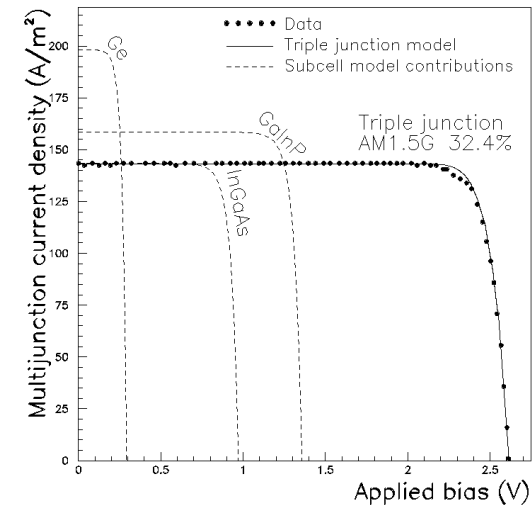
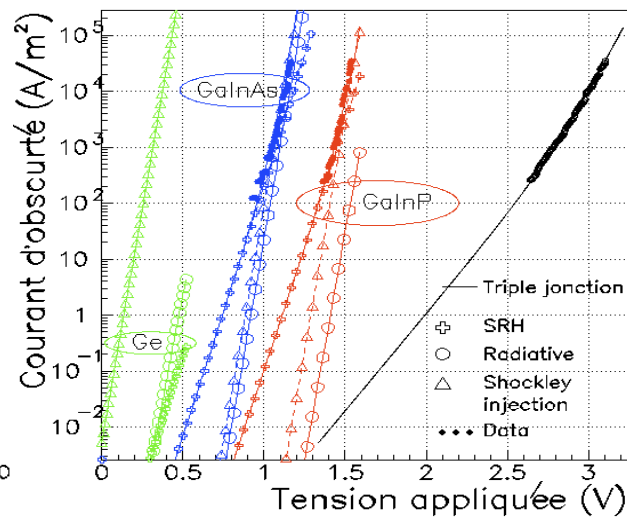
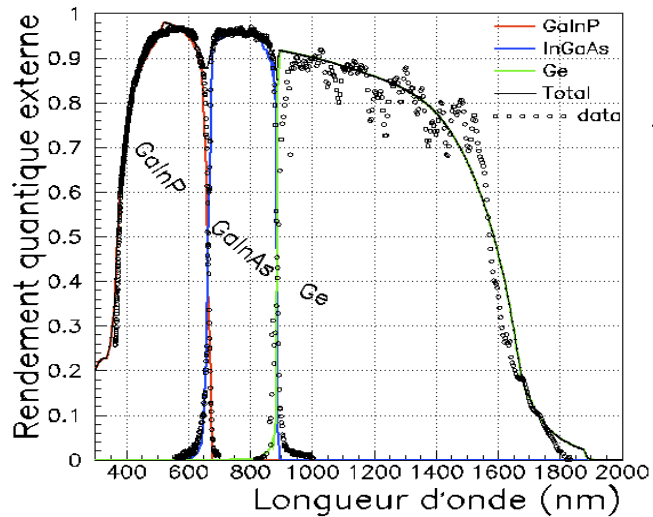
Gaps infinis: Limite de 72% (Henry⁵) 68% (de Vos⁶)

[10] C.H. Henry "Limiting efficiency of ideal single and multi energy gap terrestrial solar cells", J.Appl. Phys. **32**(3) March 1946 pp. 510

[11] Alexis De Vos "Detailed balance limit of the efficiency of tandem solar cells", J. Phys D, 13 (1980) 839-46

Les cellules multijonctions : statut 2017

Compréhension des ces structures: modélisation détaillée de génération, pertes, et rendement:



Spectre AOD1.5, concentration 240 soleils¹²: Record: **40.7 ± 2.5 %**

Reste le premier dispositif haut rendement et les meilleurs rendements réalisés

Record multijonction actuel¹³ : **46%**

[12] James P. Connolly, Denis Mencaraglia, "III-V solar cells", chapitre (pp.135-159) du livre "Materials Challenges: Inorganic Photovoltaic Solar Energy", The Royal Society of Chemistry, editeur Stuart Irvine, 2015. DOI:10.1039/9781849733465-00209 - ArXiv: <http://arxiv.org/abs/1312.2908>

[13] Communiqué de presse, 2014, 4 jonctions, 508 soleils, Soitec/CEA/FhG-ISE.

<https://www.ise.fraunhofer.de/en/press-media/press-releases/2014/new-world-record-for-solar-cell-efficiency-at-46-percent.html>

Conclusions

Un tour d'horizon de concepts du photovoltaïque à haut rendement dans un contexte où:

- Le photovoltaïque devient **compétitif**.
- Le rendement cède sa place aux systèmes cependant **l'intérêt de hauts rendements augmente**.
- Tous les **acquis** reposent sur des **technologies "classiques"**
- Nous avons éfleuré le sujet: restent la conversion de spectres, les anisotropies de propriétés et autres.

=> **L'intérêt et les ressources pour la recherche augmentent.**
Le potentiel des concepts de demain ne fait qu'augmenter.
Des concepts au coeur de l'Institut Photovoltaïque de l'Île de France

Pour conclure, **participations proposées** au projet COST sur ces thèmes: MultiscaleSolar.

La Suisse est partenaire.

Site web: <http://multiscalesolar.eu/>

Chair: **J. Connolly**

