

Diodes électroluminescentes blanches pour l'éclairage

Julien Brault, Benjamin Damilano, Jean Massies

CRHEA-CNRS, UPR010
Rue Bernard Grégory, 06560 Valbonne



J3N – 21 octobre 2008
MMNT, Grenoble



L'Eclairage

- Lampes à combustion → lampes à incandescence → lampes à décharge
rendement de conversion lumière/électricité $\leq 25\%$ ($\leq 100 \text{ lm/W}$)

→ saturation de l'efficacité lumineuse

- **Rupture technologique**

→ impact environnemental

faible consommation d'énergie :

rendement de conversion $\geq 50\%$ ($\geq 200 \text{ lm/W}$)

durée de vie élevée :

5 à 100 fois supérieures aux sources traditionnelles

→ éclairage par source à l'état solide (« *Solid-State Lighting* »)

➡ **La diode électroluminescente (DEL)**

Les diodes électroluminescentes III-N

➤ Développement des semi-conducteurs nitrures (Ga,Al,In)N

- Matériaux à bande interdite directe
- Emission dans le visible (Ga,In)N

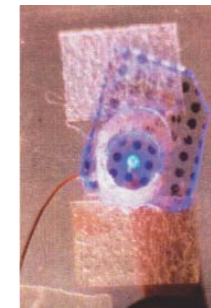
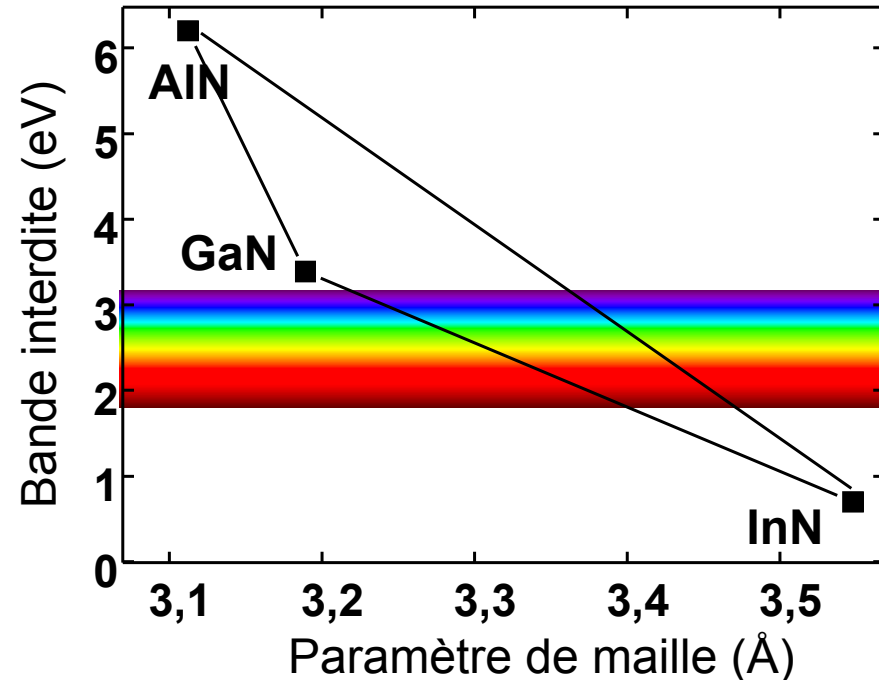
Difficultés :

- Croissance hétérogène
(absence de substrats massifs)
- Dopage p
(concentration résiduelle $n > 10^{19} \text{ cm}^{-3}$)

Avancées majeures:

- Couche tampon basse température
- Dopage p (Mg, activation thermique)

➤ Première diode électroluminescente bleue (réalisée par épitaxie en phase vapeur – EPV)



Jonction p-n GaN
H. Amano et al.,
Jpn. J. Appl. Phys.
28 (1989) L2112

Lumière blanche & figures de mérite

➤ Principe d'additivité des couleurs :

Bleu ($\lambda = 450 \text{ nm}$) & Jaune ($\lambda = 570 \text{ nm}$) \rightarrow Blanc

• Puissance lumineuse (lm)

(flux lumineux)

Tube fluorescent $\sim 600\text{-}900 \text{ lm}$

Ampoule incandescente $\sim 700\text{-}850 \text{ lm}$

• Rendement Lumineux (lm/W)

(efficacité lumineuse)

Ampoule incandescente $\sim 15 \text{ lm/W}$

Tube fluorescent $\sim 60\text{-}80 \text{ lm/W}$

• Indice de rendu des couleurs (IRC)

Ampoule incandescente }
Lampe à halogène } IRC = 100

• Température de couleur

flamme bougie $\sim 1850\text{-}1900\text{K}$

lampe à halogène $\sim 3000\text{K}$

lumière jour $\sim 6500\text{K}$

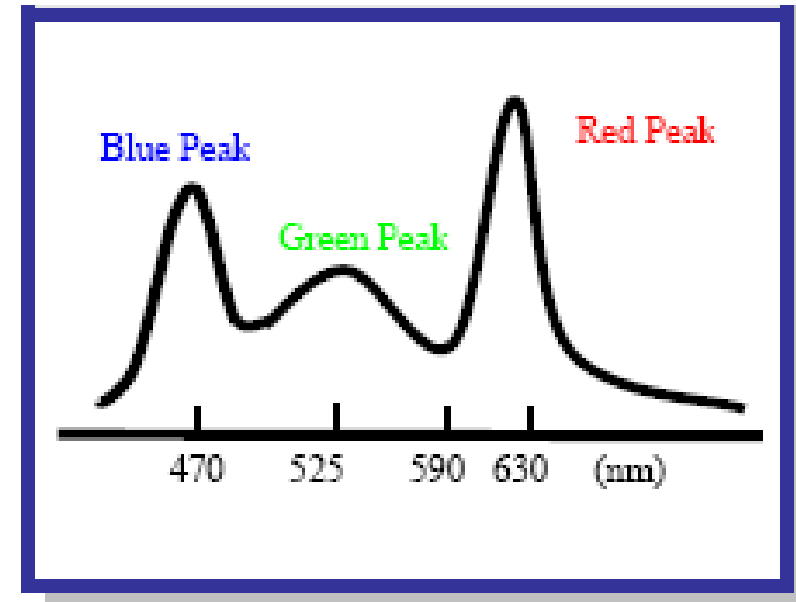
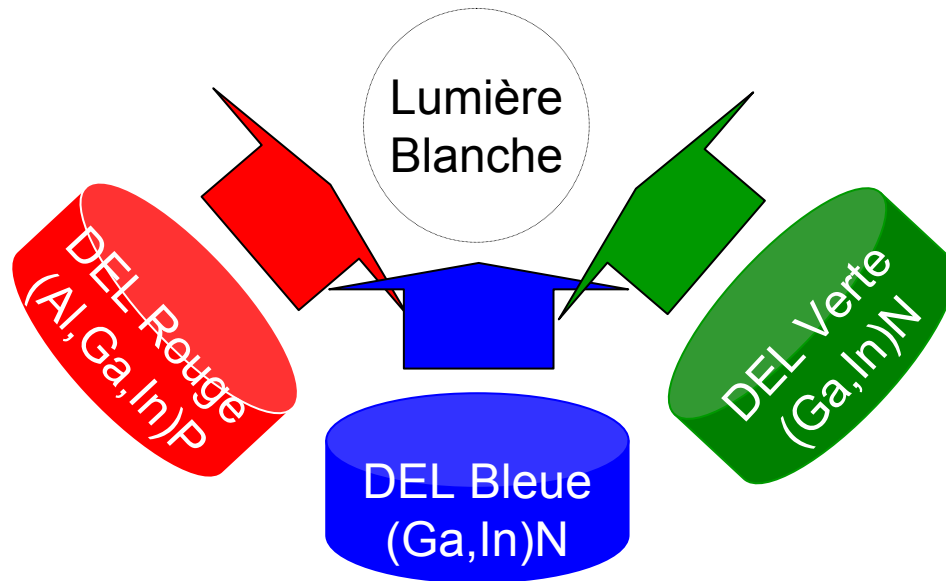


3200K

8000K

Diodes Blanches – DEL multi-puces

➤ Assemblage de 3 DELs (bleue, verte, rouge)



Points Forts :

- Rendement Lumineux → 200 lm/W
- Variation des différentes ambiances (température de couleur)
- Indice de rendu des couleurs >80

Limitations :

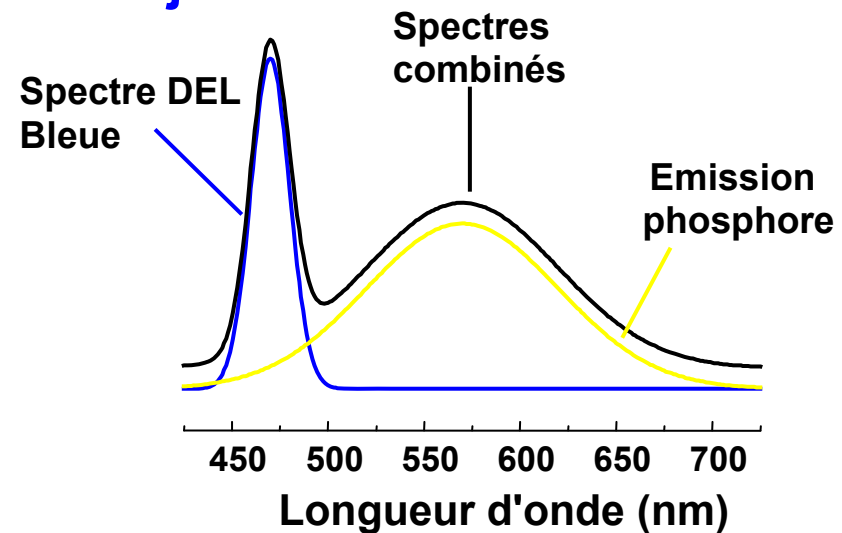
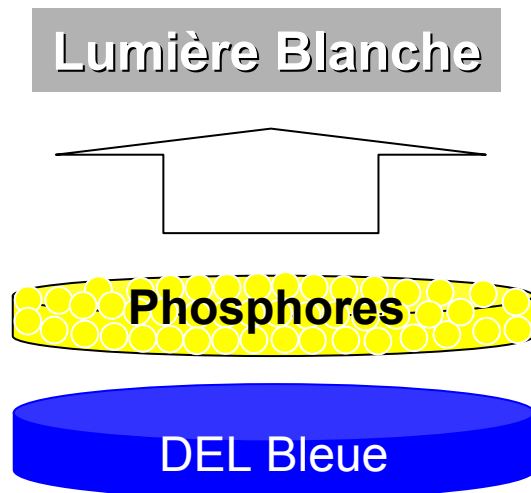
- Évolution différente des matériaux en fonction de la température
- Complexité (syst. contrôle indépendants)
- Coût

Diodes Blanches – DEL à conversion de couleur

➤ DEL bleue + luminophore (S. Nakamura, Nichia Corporation)

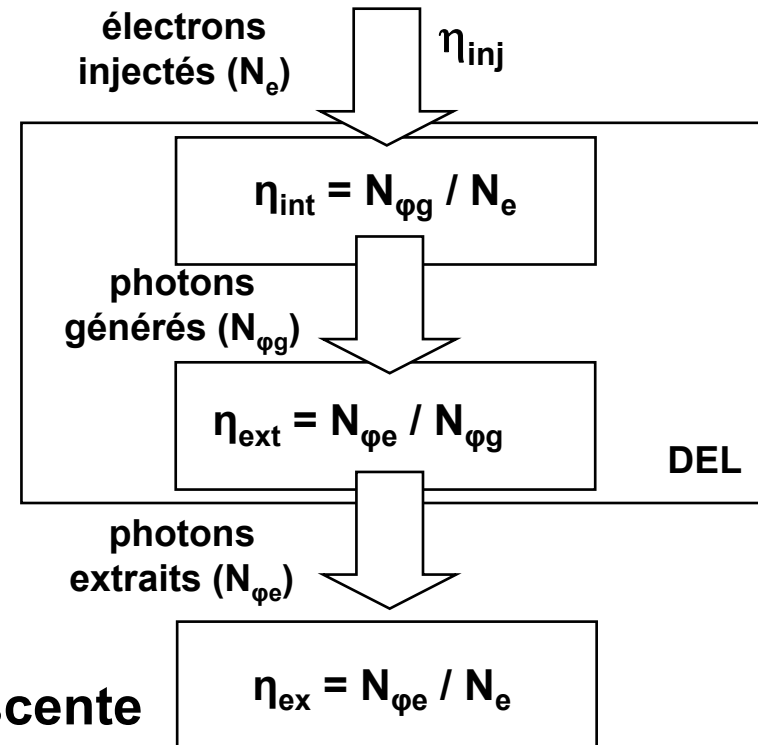
- DEL à puits quantiques (In,Ga)N (460-470 nm)
- Luminophore (phosphore)
 - Matrice cristalline YAG:Ce (~ 570-600 nm)
(grenat d'yttrium gadolinium aluminium dopé Cérium)

➤ Conversion photons bleus → photons jaunes



Efficacité globale du dispositif

- Rendement quantique interne (η_{int})
photons générés dans le matériau
- Rendement d'extraction ($\eta_{extract}$)
photons émis dans l'air
- Rendement quantique externe (η_{ext})



→ $\eta_{ex} = \eta_{int} \times \eta_{ext}$

- Puissance d'une diode électroluminescente

→ $P_{opt} = \eta_{ex} \times I \times (E / e)$

I = courant (A) de la DEL
E = énergie (eV) des photons émis

- Rendement global ("à la prise")

→ $\eta_{global} = P_{opt} / P_{elec}$

P_{elec} = puissance électrique injectée (W)

Quelques performances

➤ DEL bleue + luminophore (Technologie industrielle actuelle) exemple Nichia Corp.

- **Les 1^{ères} diodes blanches :**

puiss. $\sim 1\text{mW}$, rendement lum. $\sim 5\text{ lm/W@20mA}$

S. Nakamura, G. Fasol, *"The Blue Laser Diode"*, Springer-Verlag, Heidelberg (1997)

- **Diodes commercialisées (2007)^[1] :**

puiss. $\sim 30\text{mW}$, rendement lum. $\sim 100\text{ lm/W}$, flux lum. $\sim 6\text{ lm@20mA}$

(IRC 60-70, temp. couleur $\sim 6000\text{K}$)

[1] Y. Narukawa et al., JJAP **46**, No. 40, L963 (2007)

- **Résultats R&D (2007)^[1] :**

DEL bleue (443nm) : puiss. $\sim 40\text{mW}$, $\eta_{\text{ex}} \sim 75\%$, $\eta_{\text{global}} \sim 68\%$ @20mA

DEL blanche : rendement lum. $\sim 161\text{ lm/W}$, $\eta_{\text{global}} \sim 48\%$

→ Ampoule à incandescence : rendement lum. $\sim 16\text{ lm/W}$, $\eta_{\text{global}} \sim 5\%$

→ Tube fluorescent : rendement lum. $\sim 85\text{ lm/W}$, $\eta_{\text{global}} \sim 25\%$

Les Diodes de puissance pour l'éclairage

Limite principale : coût (0,4\$/klm ampoule incan. - 1,5\$/klm tube fluo.)

flux ~ 900 lm → DELs ~ 6 lm@20mA → ~20 \$/klm (2007)

➤ Dispositifs à forts rendements et forts flux lumineux

• Dimension des DELs : $(0,35 \times 0,35) \mu\text{m}^2$ → $(1 \times 1) \text{mm}^2$

→ Réduction densité de courant

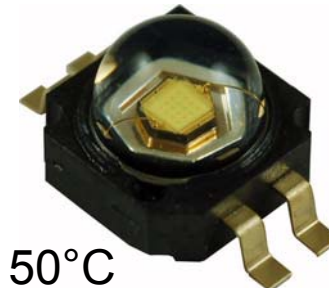
• Courant de fonctionnement : 20 mA → 350 mA à 1A

→ Puissances de 1 à 5 W

• Temp. jonction ($> 100^\circ\text{C}$) → Evacuation de la chaleur

→ Technologie de conditionnement

LUMILEDS
LUXEON K2
(nov. 2007)



fonctionnement → 1,5 A et 150°C

➤ Les substrats GaN (ex. LUMILOG) →

Forts courants

Durée de vie > 50000 h

?

Performances R&D et feuille de route

Recent results from the Lumileds chip lab

Drive current (mA)	Efficiency (lm/W)	Flux (lm)
350	140.1	138.0
1000	111.7	339.8
1500	100.0	478.8
2000	86.0	562.5

OSRAM :

155 lm @350mA (136 lm/W)
 380 lm @1A (100 lm/W)
 500 lm @1,4A (90 lm/W)

Résultats présentés dans
 LEDs magazine – octobre 2008

Feuille de Route :

Caractéristiques	2012	2020	Amp. Incan.	Tube fluo.
Rendement Lumineux	150 lm/W	200 lm/W	16 lm/W	85 lm/W
Durée de vie	> 50 000 h	> 50 000 h	1000h	10 000h
Puissance lumineuse (/lampe)	1000 lm	1500 lm	1200 lm	3400 lm
Puissance fonctionnement	6,7 W	7,5 W	75 W	40 W
Prix par lumen	< 3,7 €/klm	< 1,5 €/klm	0,4 €/klm	1,5 €/klm
Indice Rendu des Couleurs	> 80	> 80	95	75

Source : GLOBAL WATCH MISSION REPORT, LED lighting technology: lessons from the USA, MARCH 2006
 (source OIDA – Optoelectronics Industry Development Association)

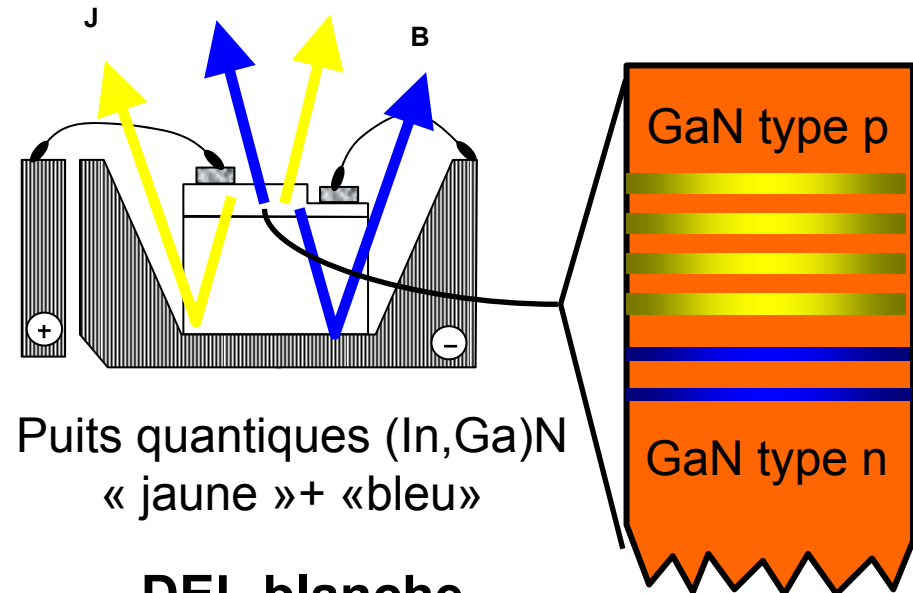
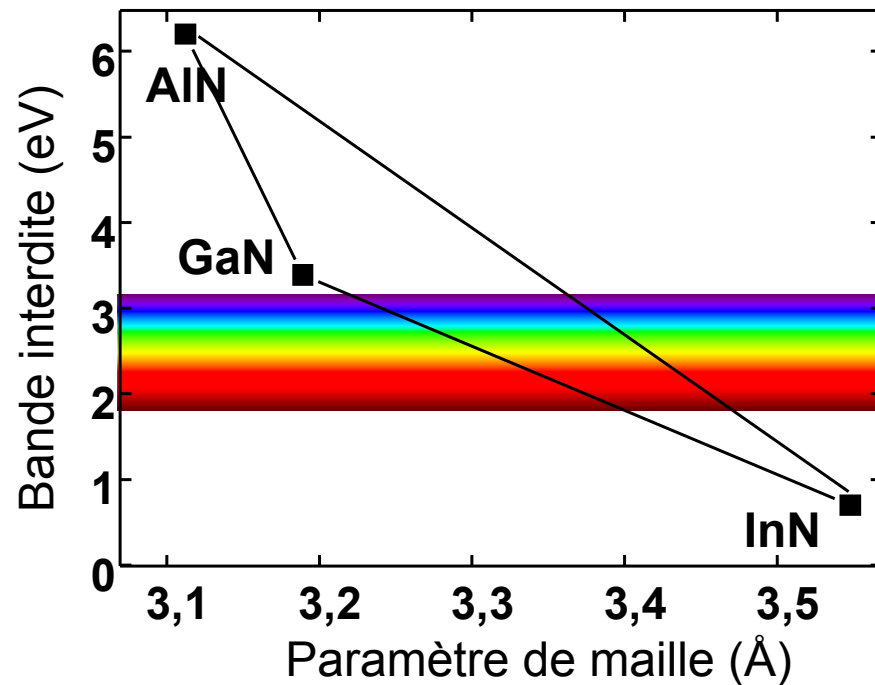


J3N – 21 octobre 2008
 MMNT, Grenoble



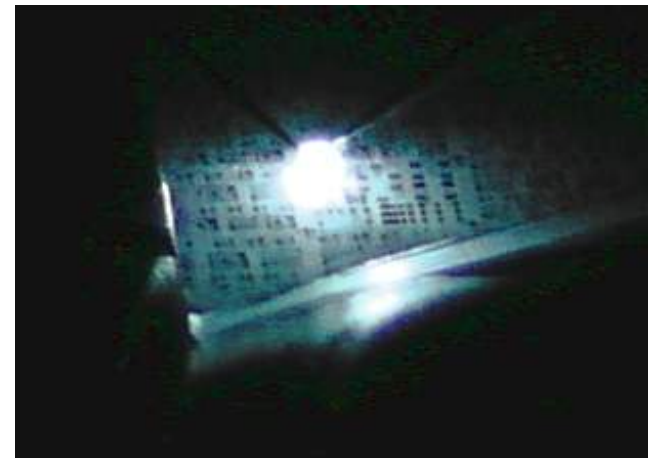
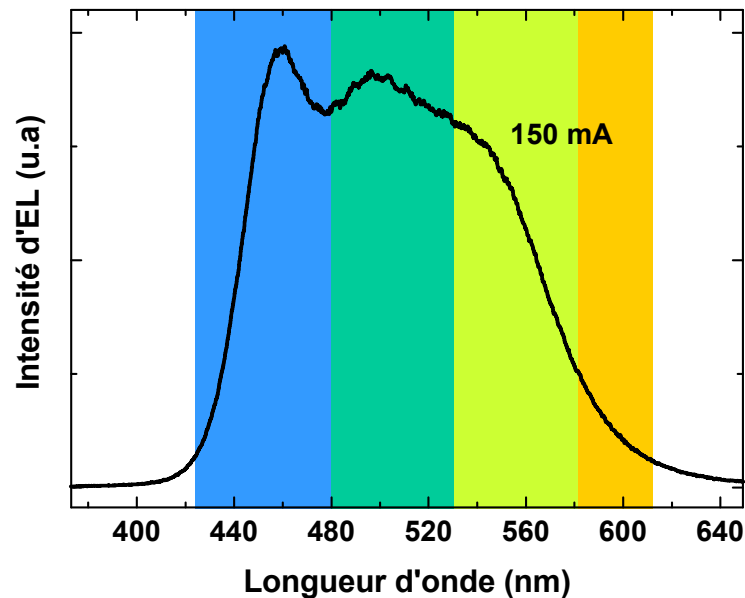
Diode Electroluminescente Blanche Monolithique

➤ Principe DEL monolithique CRHEA



- CRHEA/CNRS :
B. Damilano *et al.*,
Jpn.J. Appl. Phys., **40**, L918, (2001)
- repris par Nichia R&D :
M. Yamada *et al.*,
Jpn. J. Appl. Phys., **41**, L246, (2002)

DEL blanche monolithique



DEL blanche @ 20 mA

A. Dussaigne et al., PSS(c) 4, No. 1, 57 (2007)

Points Forts :

- **Suppression d'une étape** (phosphore)
- **Diminution du coût** (phosphore)
- **Fiabilité** (phosphore)
- **Rupture technologique** (structure & procédé de fabrication)

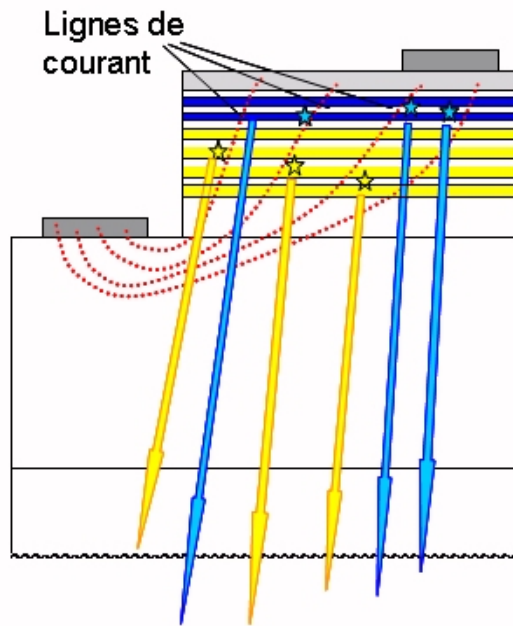
Limitations :

- **Puissance**
(rendement puits jaunes)
- **IRC ≤ 80**

Nouveau concept monolithique

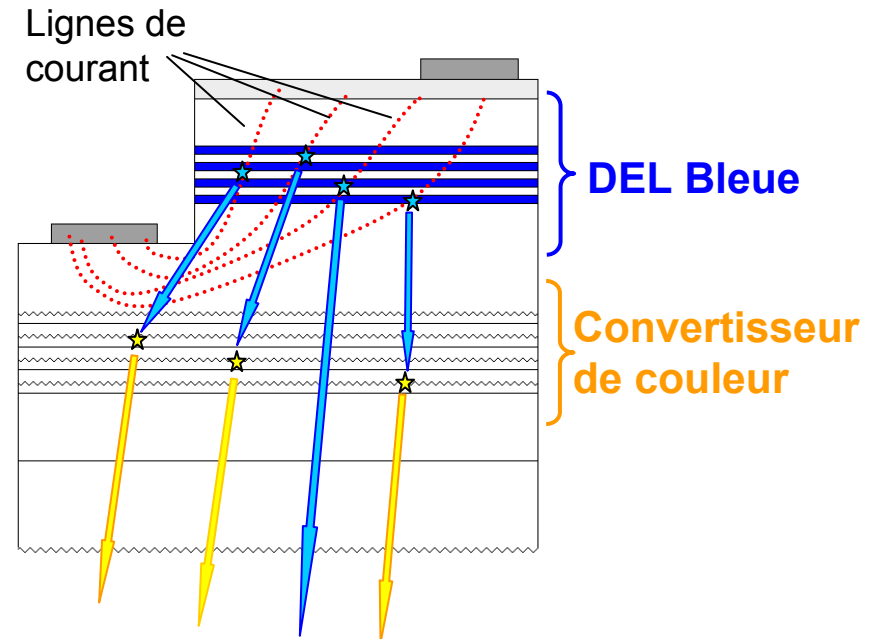
- **Projet ANR-PNANO « DEMONI » (CRHEA/CNRS, LUMILOG, RIBER)**
- **Nouveau concept monolithique (Brevet CNRS/CRHEA Mars 2006)**

1^{er} modèle (2001)
Puits (bleus + jaunes)
insérés dans une jonction p-n



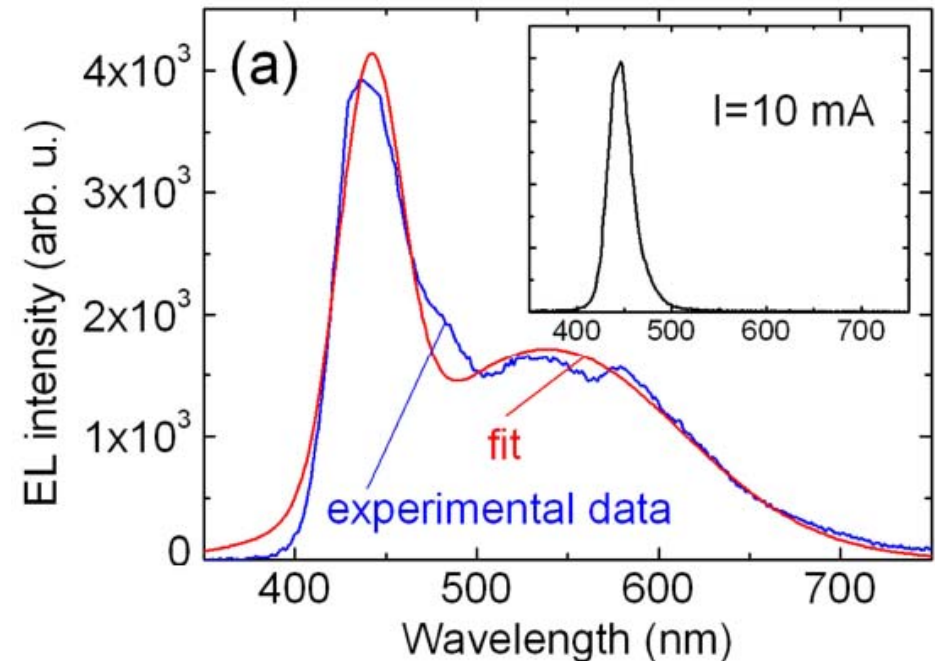
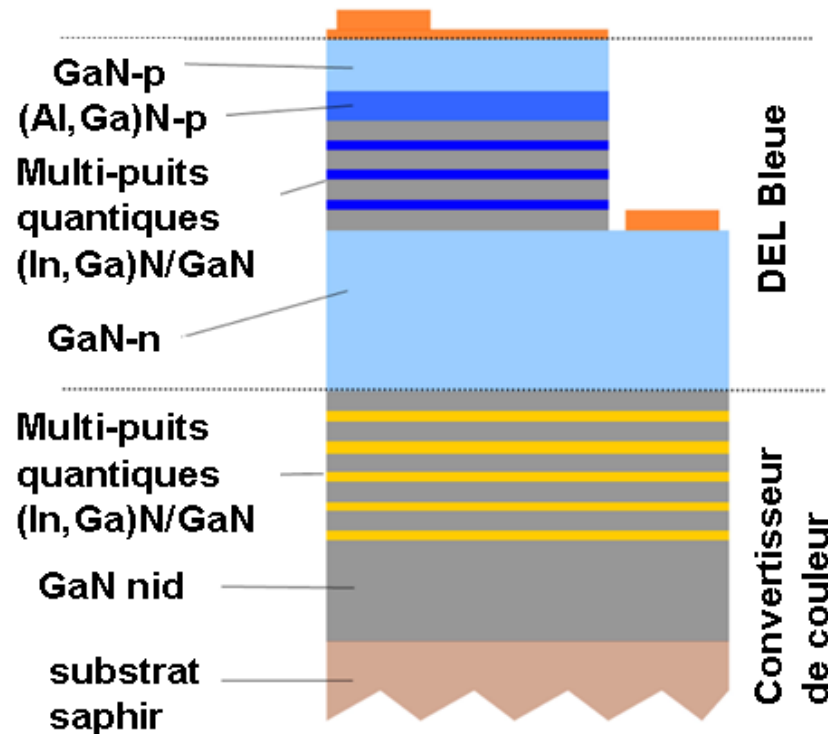
- **Limitation du rendement (puits jaunes)**
- **Problème d'injection dans l'ensemble des puits quantiques (limitation nombre)**

2^{ème} modèle
DEL bleue + convertisseur passif
{boîtes ou puits (Ga,In)N/(Al,Ga)N}



- **Puissance (DEL bleue de « pompe »)**
- **Stabilité de la couleur en fonction du courant**
- **Indice de Rendu des Couleurs**

DEL monolithique – Projet ANR-PNANO DEMONI



B. Damilano et al.,
'Appl. Phys. Lett. **93**, 101117 (2008)

- **2 composantes dans le spectre d'émission : 440 nm (DEL bleue)
540 nm (convertisseur)**
- **Coordonnées chromatiques (0,26; 0,25) et Indice de Rendu des Couleurs = 89**
- **Objectifs : coordonnées chromatiques ($x=0,33$; $y=0,33$) et IRC ≥ 80**

Conclusions / Perspectives

- Une rupture technologique → éclairage par source à l'état solide
- Une technologie en très forte progression :
rendement quantique externe ~ 54% (350 mA), rendement global ~ 48% (2008)
- Un potentiel d'applications très large
signalisation, automobile, architecture...
éclairage (\$5 milliards (2006) → \$17.4 milliards (2013))
- L'impact environnemental...

E. Fred Schubert et al.,
Rep. Prog. Phys. **69**,
3069 (2006)

~ 20% électricité utilisée pour l'éclairage
utilisation de DELs (rendement lumineux 150 lm/W):
réduction de la consommation électrique de ~ 10%
si 80% de l'éclairage est réalisé par les DELs

Remerciements

Etude financée par l'ANR-PNANO 06 Projet "DEMONI"



J3N – 21 octobre 2008
MMNT, Grenoble

