

Micro-photoluminescence de nanotubes de carbone individuels aux longueurs d'onde des télécommunications : développement de nouvelles sources pour l'optique quantique

Vincenzo Ardizzone

Géraud Delport, Isabelle Robert, Jean-Sébastien Lauret

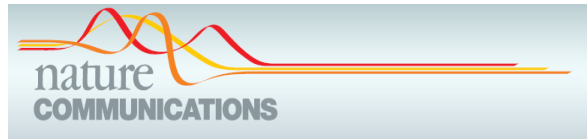


NanoSaclay



Les Sources de Photons Uniques

➔ Amélioration des propriétés des sources existantes : intensité, injection électrique adaptation aux longueurs d'ondes télécommunications dans l'infrarouge...



PHYSICAL REVIEW B 84, 195302 (2011)

Single InAs_{1-x}P_x/InP quantum dots as telecommunications-band photon sources

D. Elvira, R. Hosten, B. Fain, L. Monniello, A. Michon, G. Beaudoin, R. Braive, I. Robert-Philip, I. Abram, I. Sagnes, and A. Beveratos

CNRS-UPR20, Laboratoire de Photonique et Nanostructures, Route de Nozay, FR-91460 Marcoussis, France

(Received 29 April 2011; revised manuscript received 13 September 2011; published 3 November 2011)

ARTICLE

Received 14 Aug 2013 | Accepted 10 Jan 2014 | Published 5 Feb 2014

DOI: 10.1038/ncomms4240

OPEN

Deterministic and electrically tunable bright single-photon source

A.K. Nowak¹, S.L. Portalupi¹, V. Giesz¹, O. Gazzano^{1,†}, C. Dal Savio², P.-F. Braun², K. Karrai², C. Arnold¹, L. Lanco^{1,3}, I. Sagnes¹, A. Lemaître¹ & P. Senellart¹

➔ Recherche de nouveaux systèmes et matériaux capables de délivrer des photons uniques

METAL DICHALCOGENIDES

Two dimensions and one photon

Single-photon sources have been demonstrated in two-dimensional semiconductors.

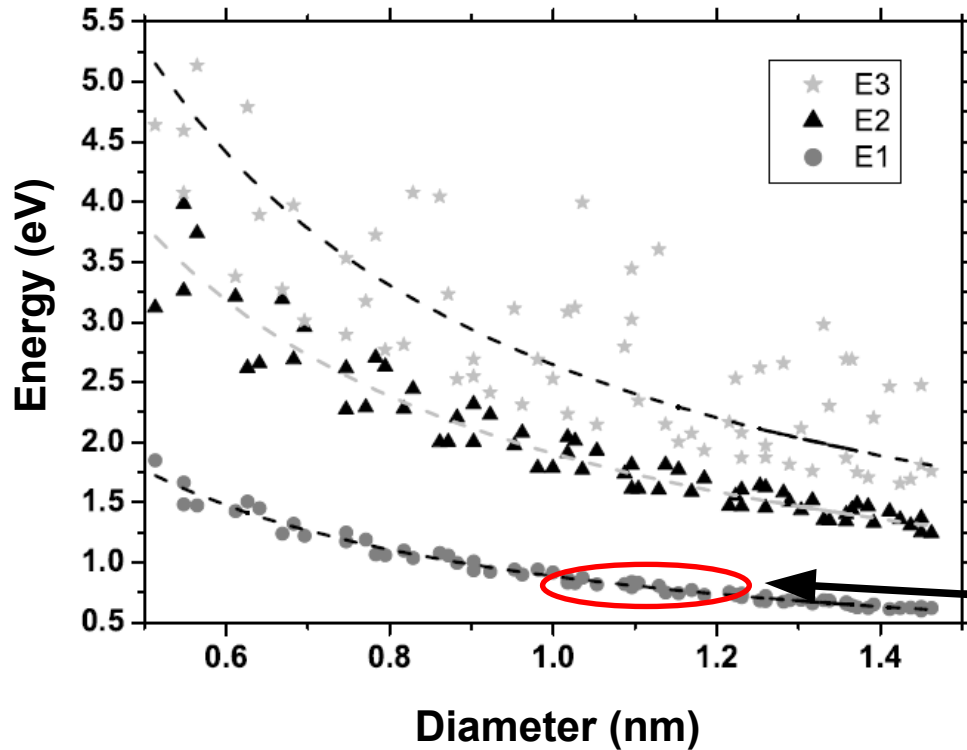
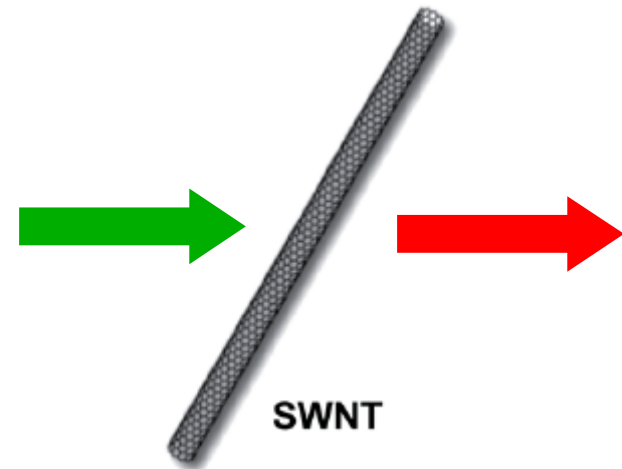
V. Perebeinos

NATURE NANOTECHNOLOGY | VOL 10 | JUNE 2015 | www.nature.com/naturenanotechnology

Les Nanotubes de Carbone

Feuille de graphène enroulée :
nanostructure semiconductrice 1D

Émission de lumière par
Photoluminescence



Variation du diamètre du nanotube

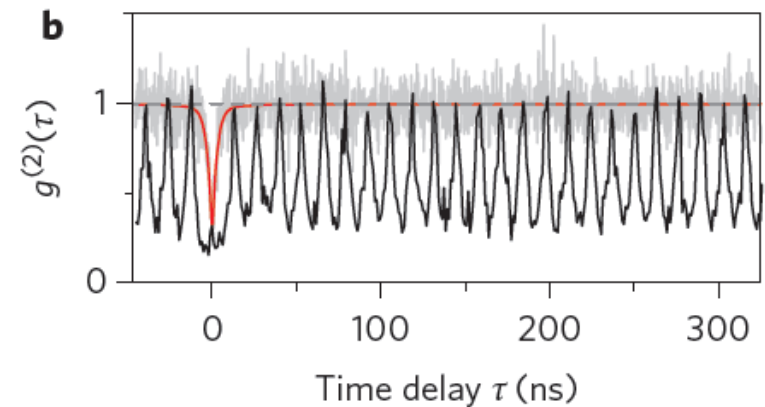
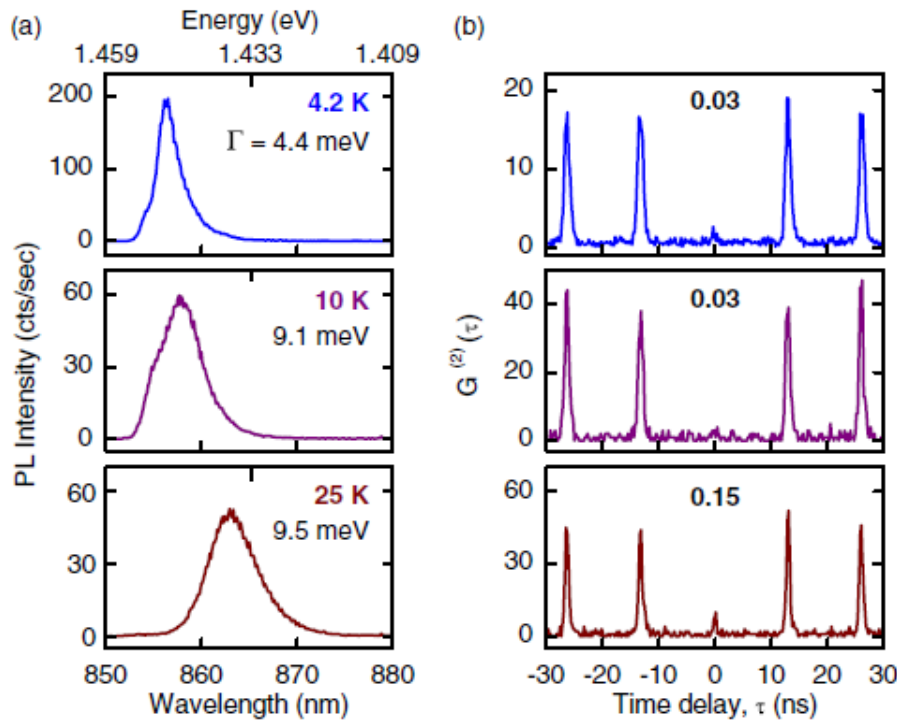


Variation longueur d'onde d'émission

Émission à 1.5 um

Photons uniques

Observation du dégroupement de photons à basse température
Nanotubes de petit diamètre



*MS. Hofmann et al Nature
Nanotechnology 8, 502 (2013)*

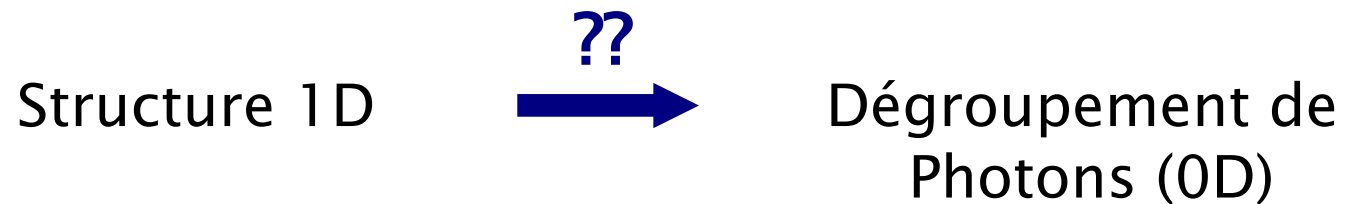
*A. Högele et al, Phys. Rev. Lett. 100,
217401 (2008)*

Tester le potentiel des nanotubes de carbone
comme sources de photons uniques sur une large
plage de longueurs d'ondes

Photons uniques

Observation du dégroupement de photons à basse température
Nanotubes de petit diamètre

Difficulté d'interprétation



Probable rôle des défauts dans le confinement des excitons :
le confinement serait involontaire (non contrôlé)

Plan de l'exposé

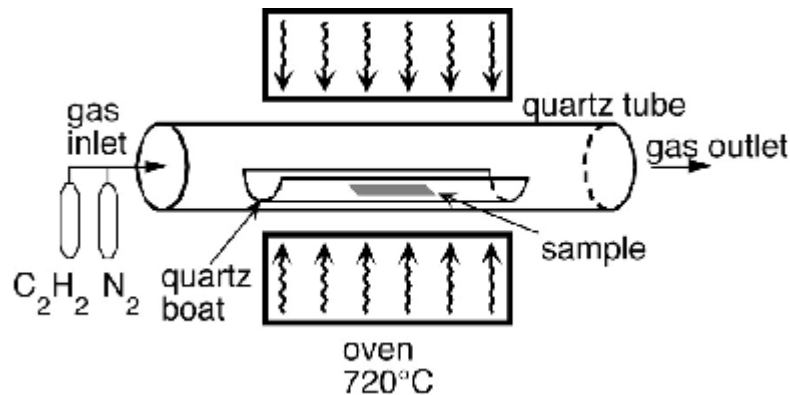
- ➔ Étudier des nanotubes de carbone synthétisés avec une méthode haute température et qui ont une faible densité de défauts.
- ➔ Signatures des effets de localisation des excitons dans les spectres De PL de NT individuels
- ➔ Comparaison NT haute qualité cristalline vs NT standard
- ➔ Est-il possible de contrôler la localisation des excitons ?
- ➔ Questions ouvertes et perspectives

Plan de l'exposé

- ➔ Étudier des nanotubes de carbone synthétisés avec une méthode haute température et qui ont une faible densité de défauts.
 - ➔ Signatures des effets de localisation des excitons dans les spectres De PL de NT individuels
 - ➔ Comparaison NT haute qualité cristalline vs NT standard
-
- ➔ Est-il possible de contrôler la localisation des excitons ?
 - ➔ Questions ouvertes et perspectives

La synthèse des CNTs

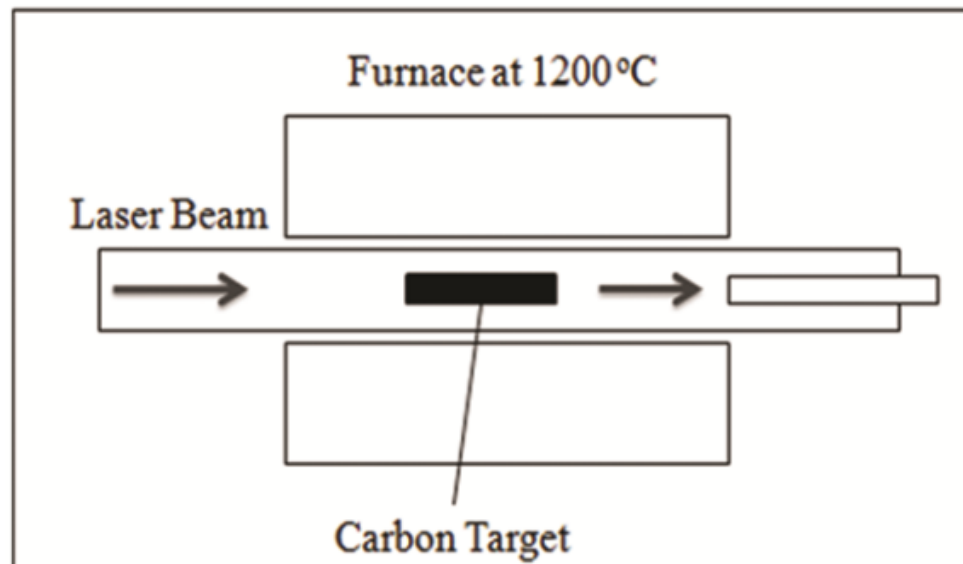
Méthodes communément utilisées : chemical vapor deposition → **SWNT**



$$350\text{ °C} < T < 1000\text{ °C}$$

Petits diamètres favorisés,
repérables facilement dans le
commerce

Méthodes haute Température : Laser Ablation → **L-SWNT**



$$T > 3200\text{ °C}$$

Diamètres de 1-1.2 nm,
faible densité de défauts cristallins

A. Thess et al, Science 273, 483 (1996)

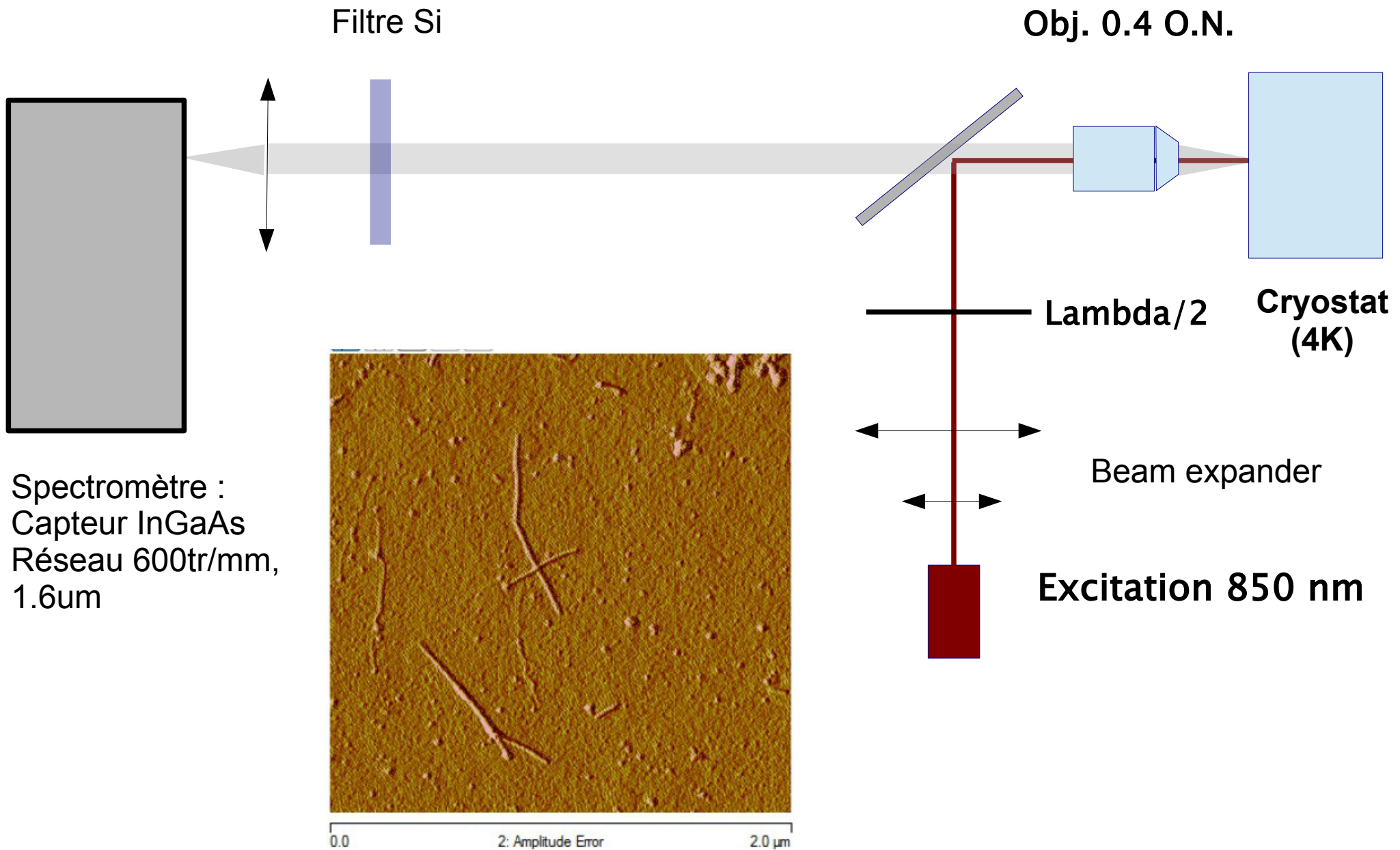
C. Journet et al, Nature (London) 388, 756 (1997).

E. T. Thostenson et al, Compos. Sci. Technol. 61, 1899 (2001).

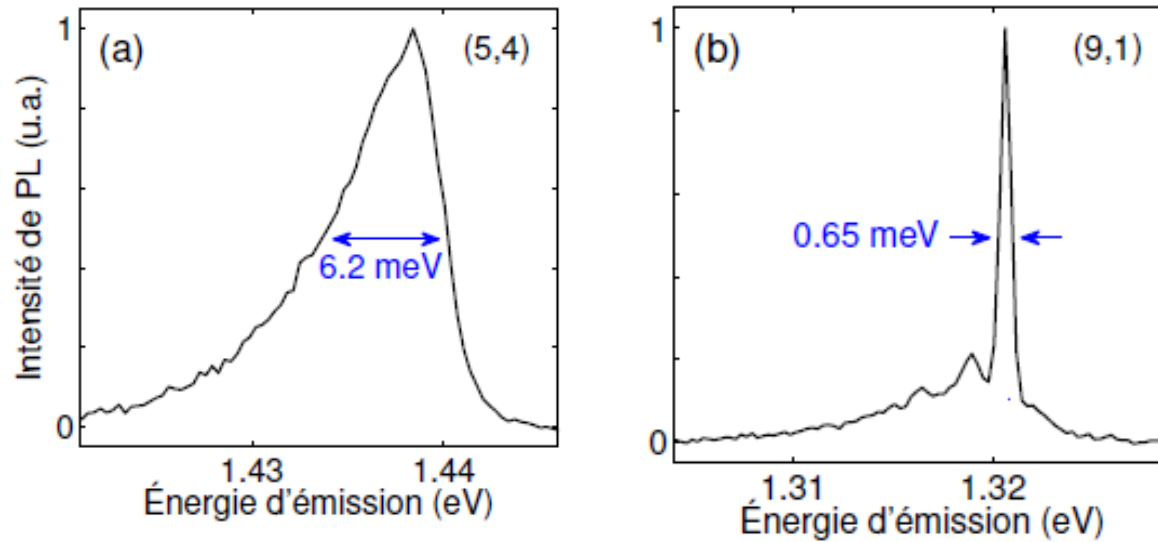
C. Journet et al, Appl. Phys. A 67, 1 (1998).

C. Journet et al Nanotechnology 23, 142001 (2012).

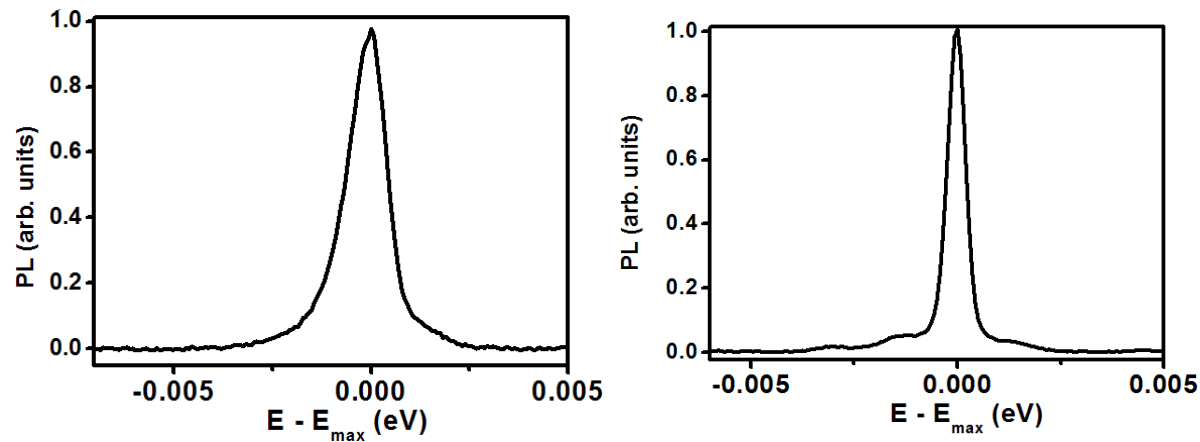
Dispositif expérimental



Variété de profils d'émission dans les SWNT

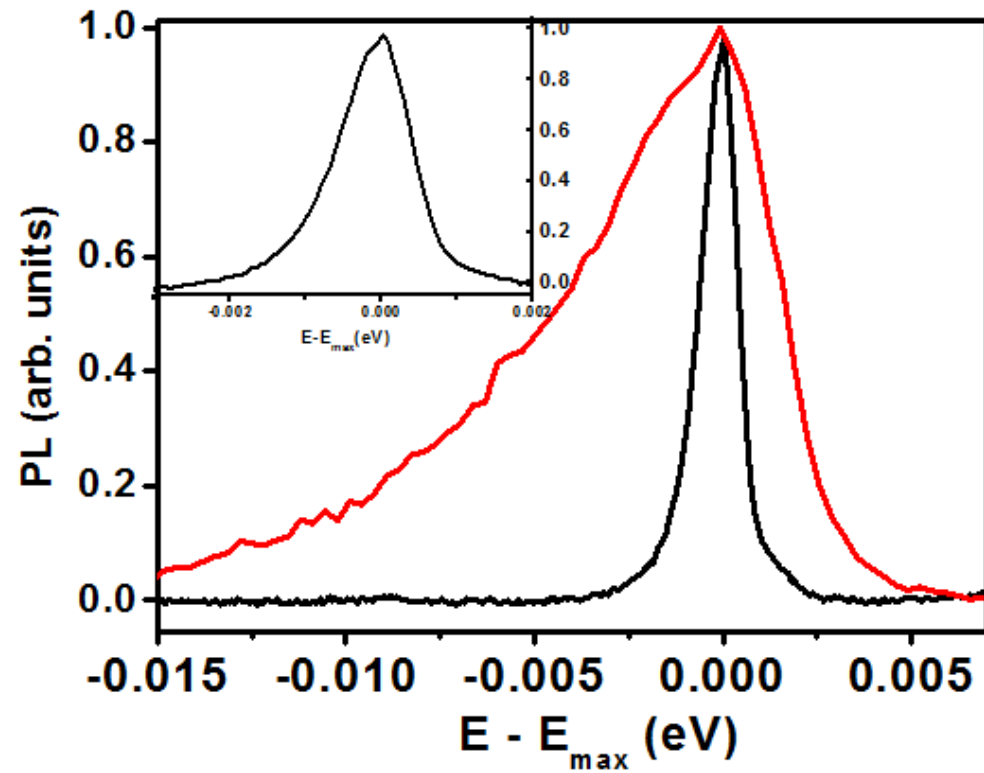
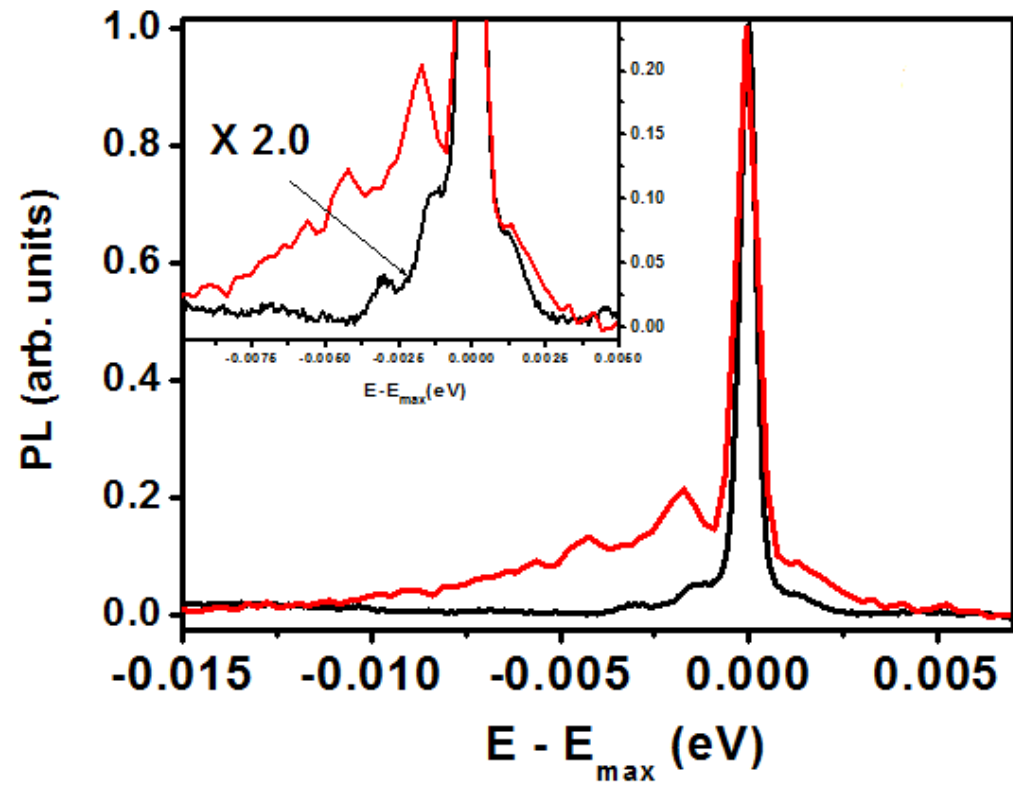


Variété de profils d'émission dans les L-SWNT



Comparaison L-SWNTs vs SWNTs

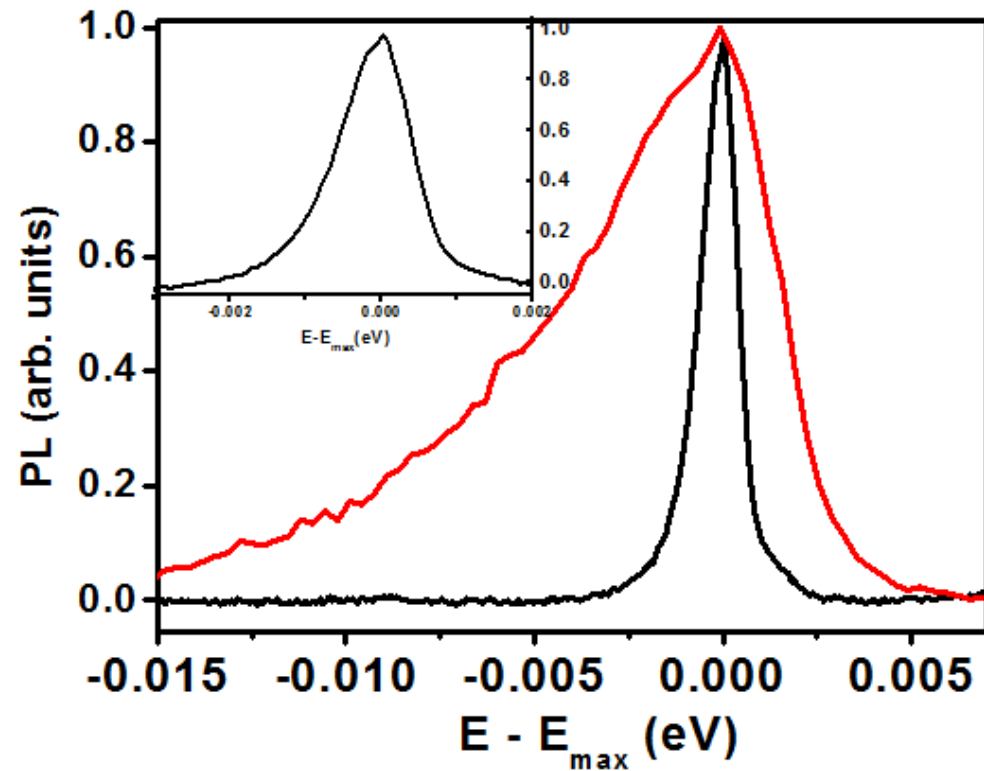
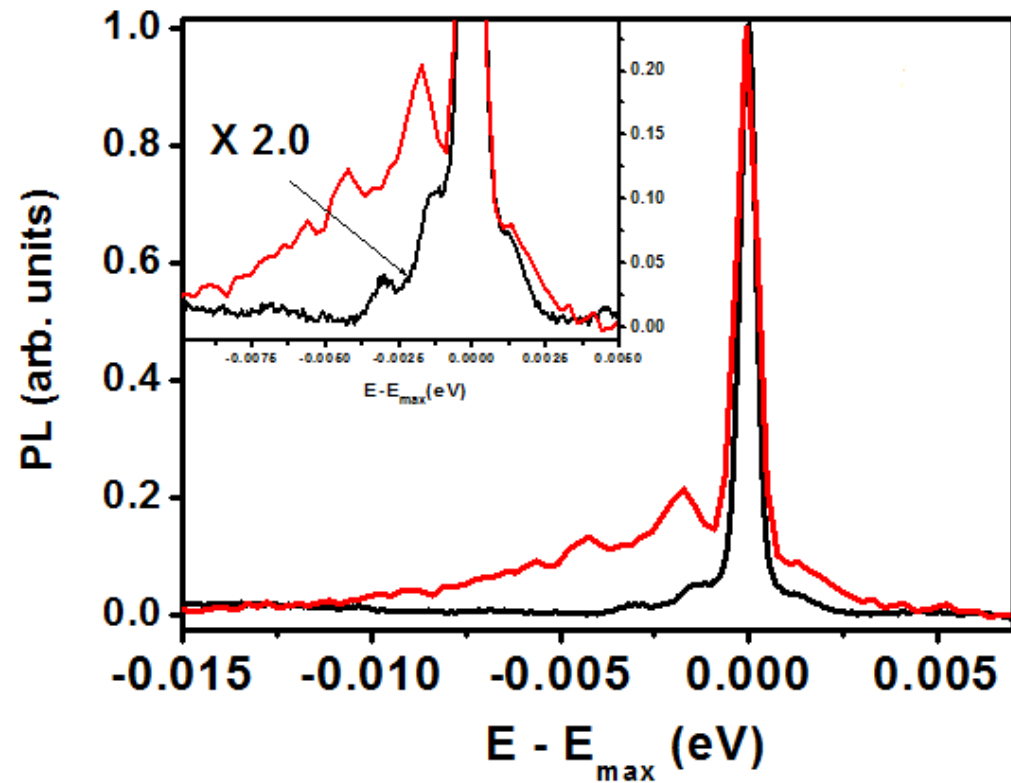
— SWNT
— L-SWNT



V. Ardizzone et al., *PRB Rapid Comm.* (choisi comme Editor's Suggestion), 91, 121410, 2015.

Comparaison L-SWNTs vs SWNTs

— SWNT
— L-SWNT



Même variété de profils dans les deux cas

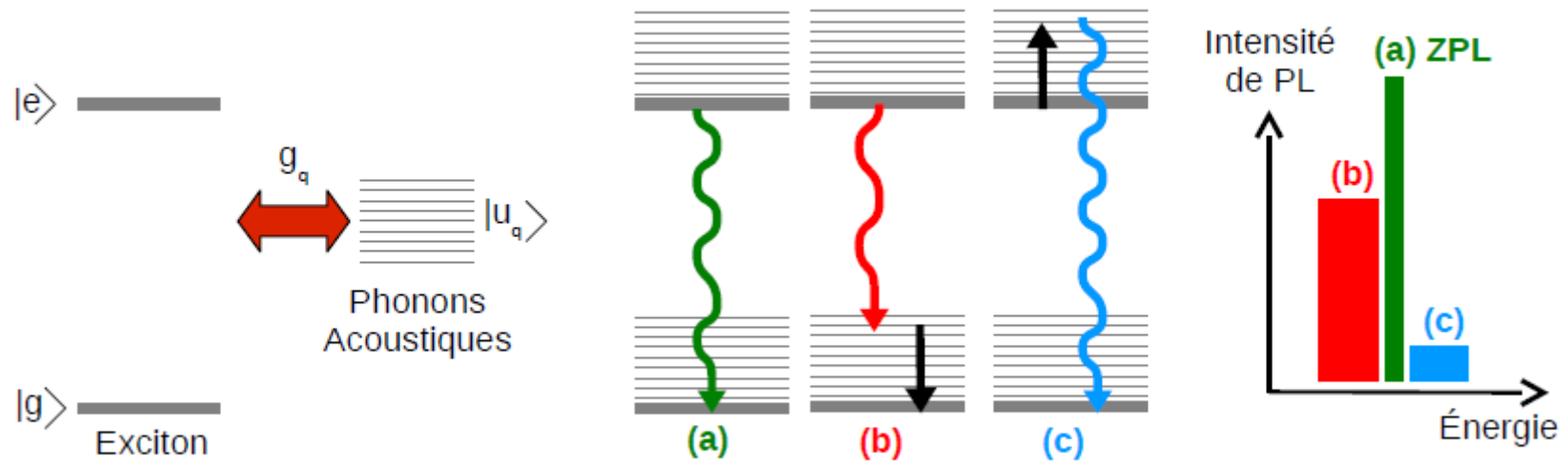


Signature du même mécanisme d'élargissement (moins efficace dans les L-SWNTs)

L'interaction électron-phonon

Interprétation qualitative

➔ Modèle : exciton comme système à deux niveaux en interaction avec 1 mode effectif de phonons acoustiques



F. Vialla, Thèse, 2014

L'interaction électron-phonon

Hamiltonien du système :

$$H = \hbar\Omega|e\rangle\langle e| + \sum_{\vec{q}} \hbar\omega_q b_q^\dagger b_q + |e\rangle\langle e| \underbrace{\sum_{\vec{q}} \hbar g_q (b_q + b_q^\dagger)}_{\omega_q = vq}$$

Interaction exciton - phonon

Amplitude de l'interaction : $\hbar g_q = \sqrt{\frac{\hbar\omega_q}{2\rho Lv^2}} F(\omega_q)$

Enveloppe gaussienne de la fonction d'onde excitonique $\psi(z) \propto e^{-\frac{z^2}{2\sigma^2}}$

Forme analytique du facteur de forme : $F_0(\omega_q) = D \exp[-(\omega_q\sigma/2v)^2]$

Conservation du
vecteur d'onde

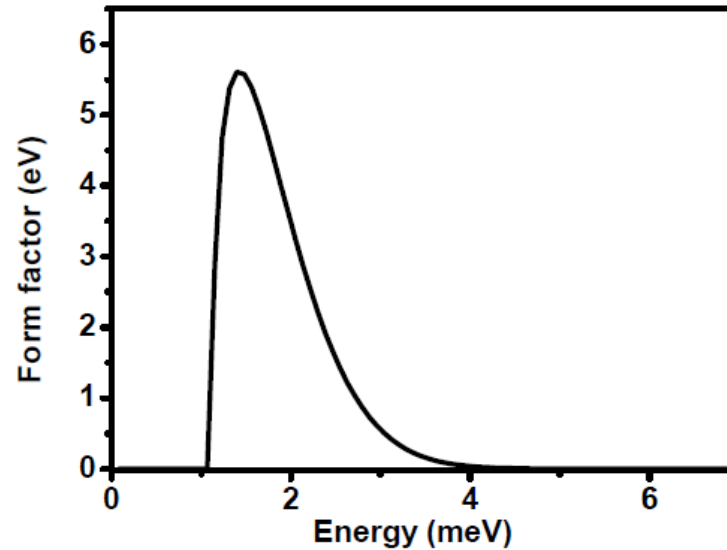
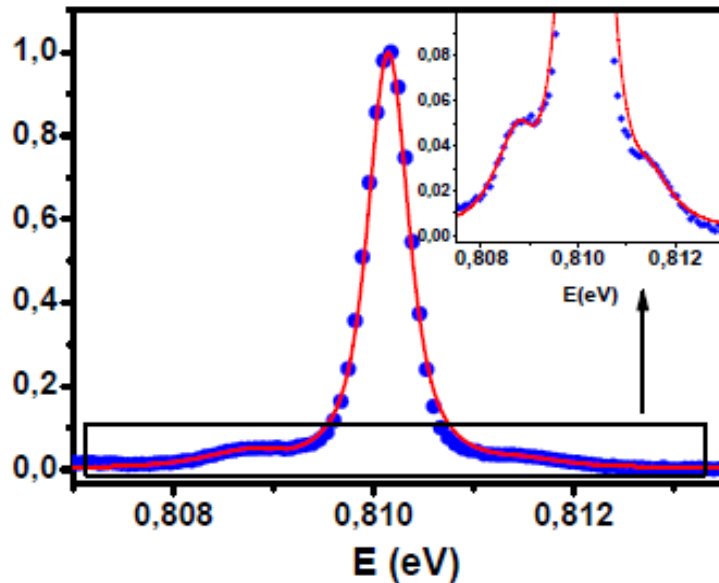
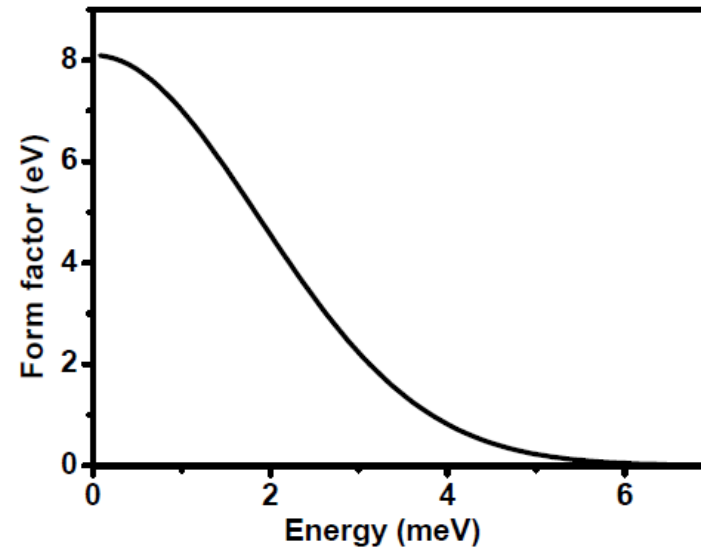
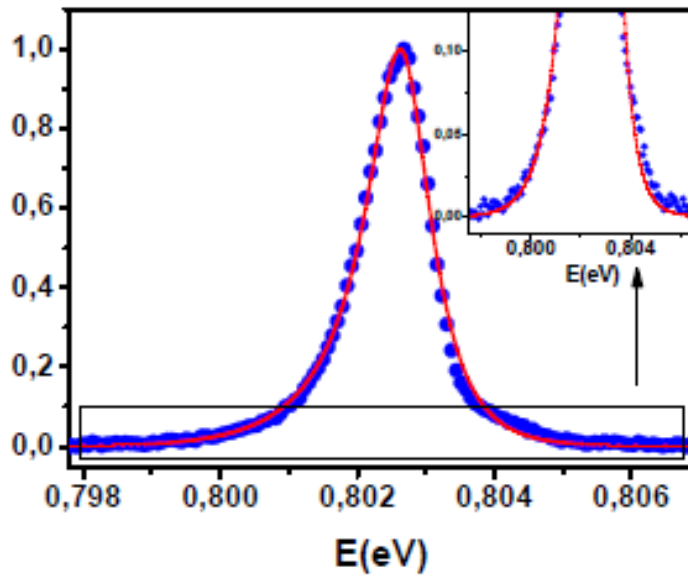


Energie de
coupure

$$\hbar\omega_\sigma \approx 2\hbar v/\sigma$$

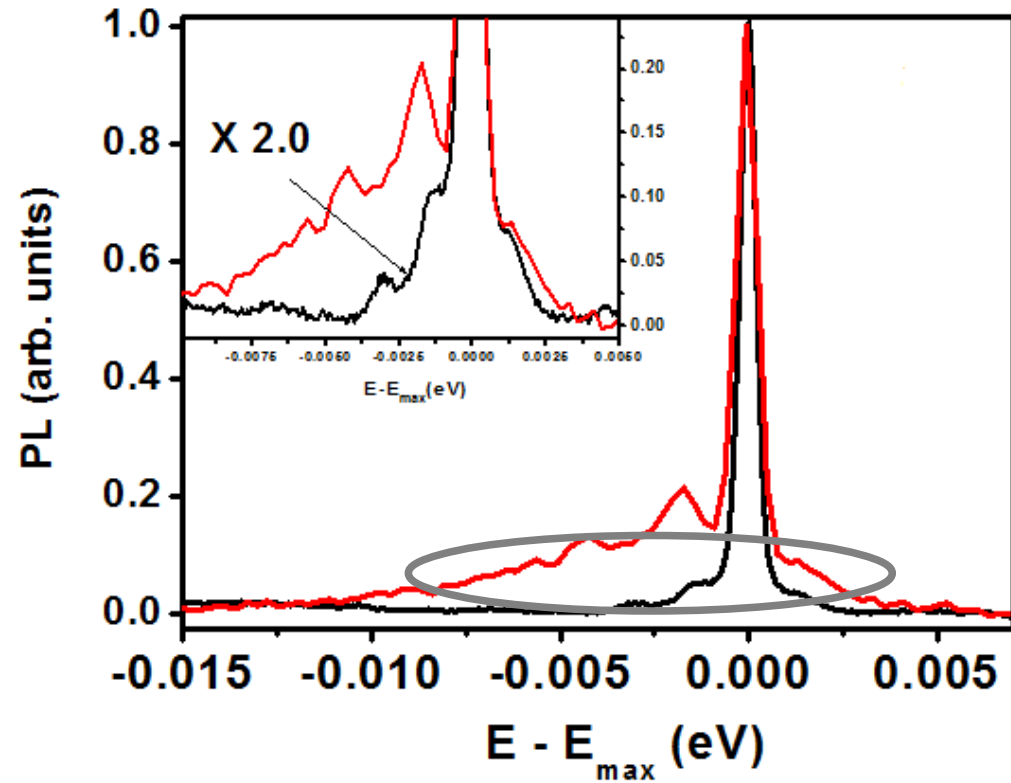
Ajustement des profils de PL

L-SWNT



V. Ardizzone et al., PRB Rapid Comm. (choisi comme Editor's Suggestion)

Localisation des excitons

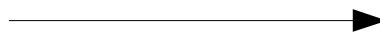


L-SWNTs

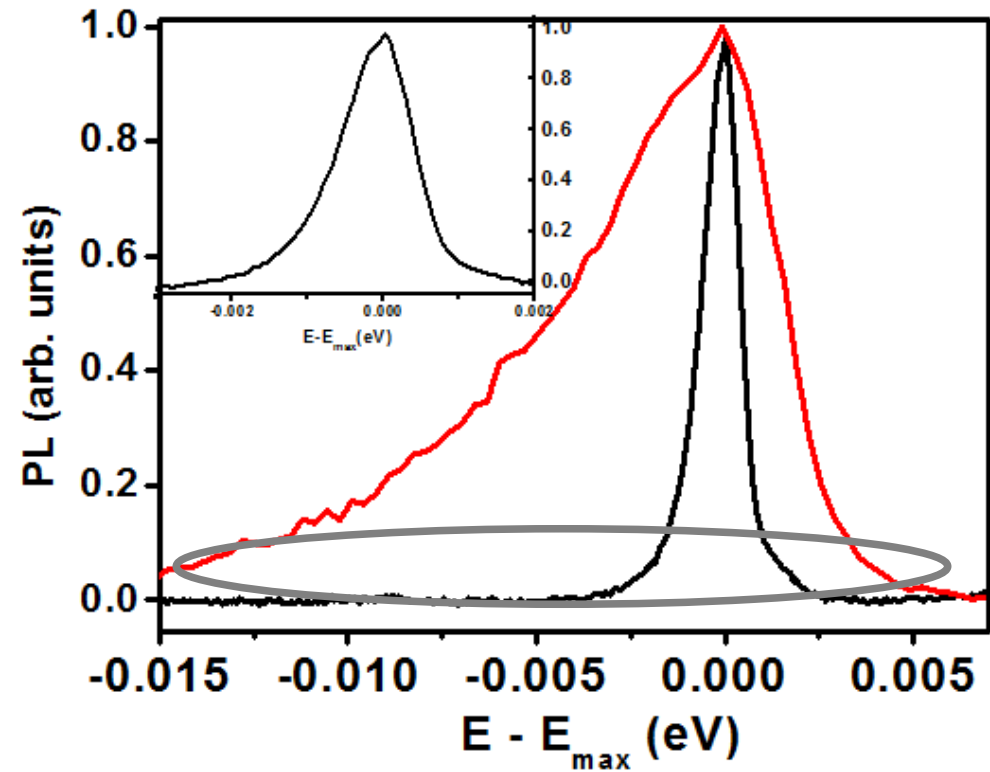


$$\sigma = 10 - 16 \text{ nm}$$

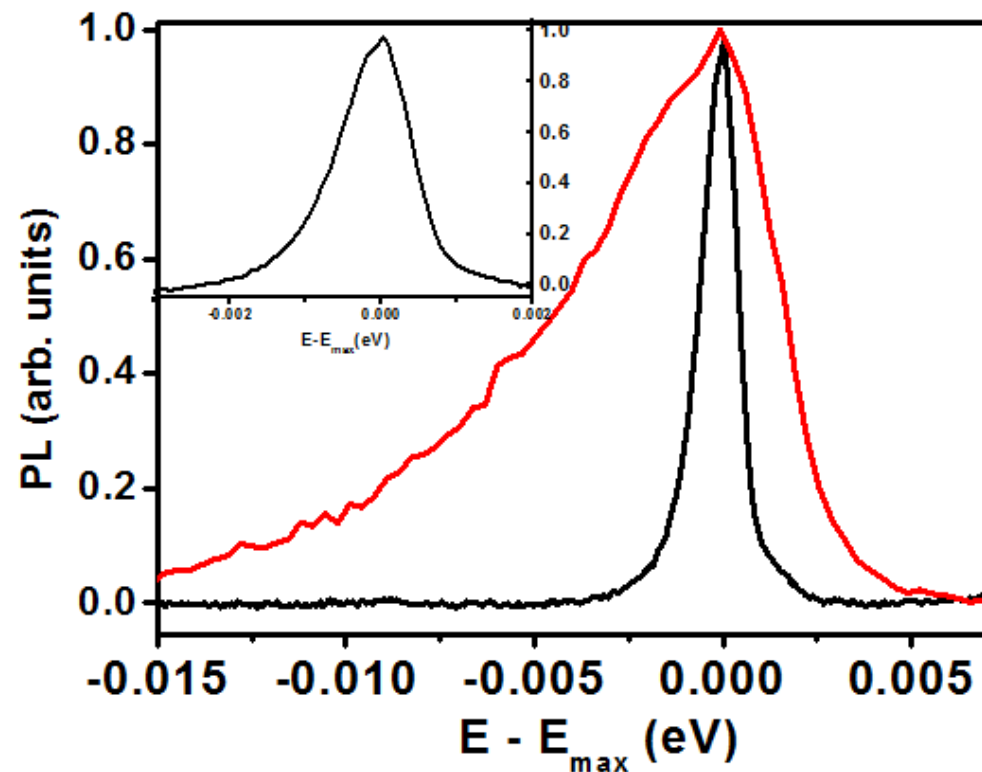
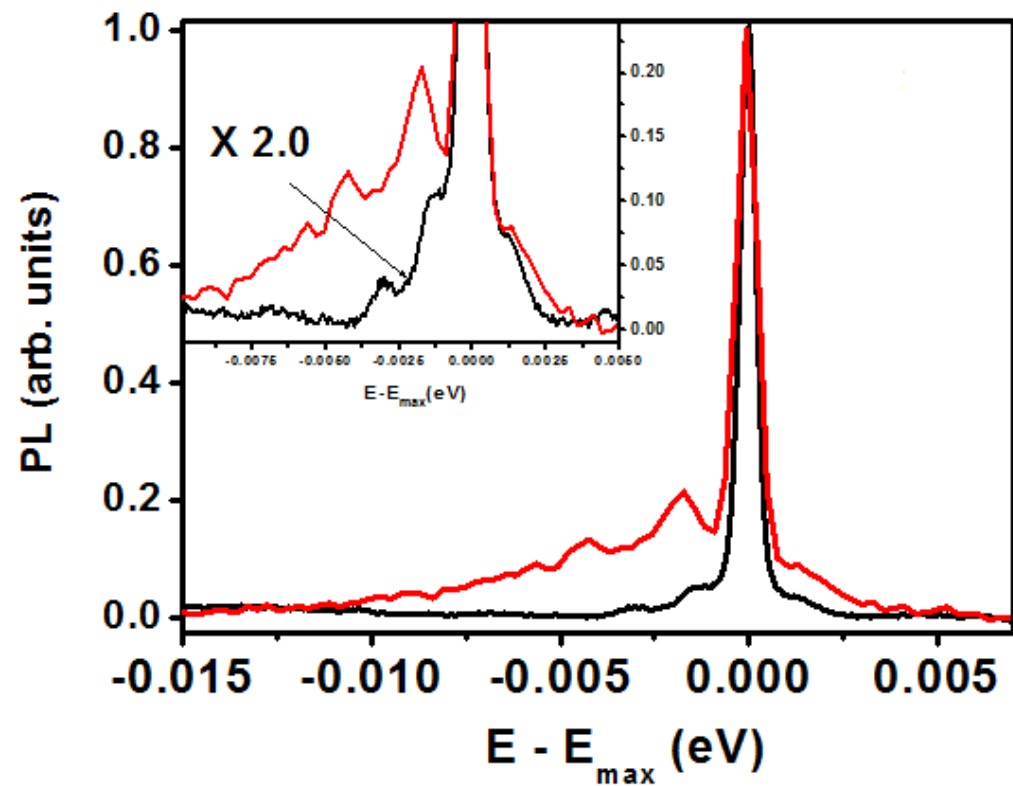
SWNTs



$$\sigma = 3 - 5 \text{ nm}$$



Conclusions



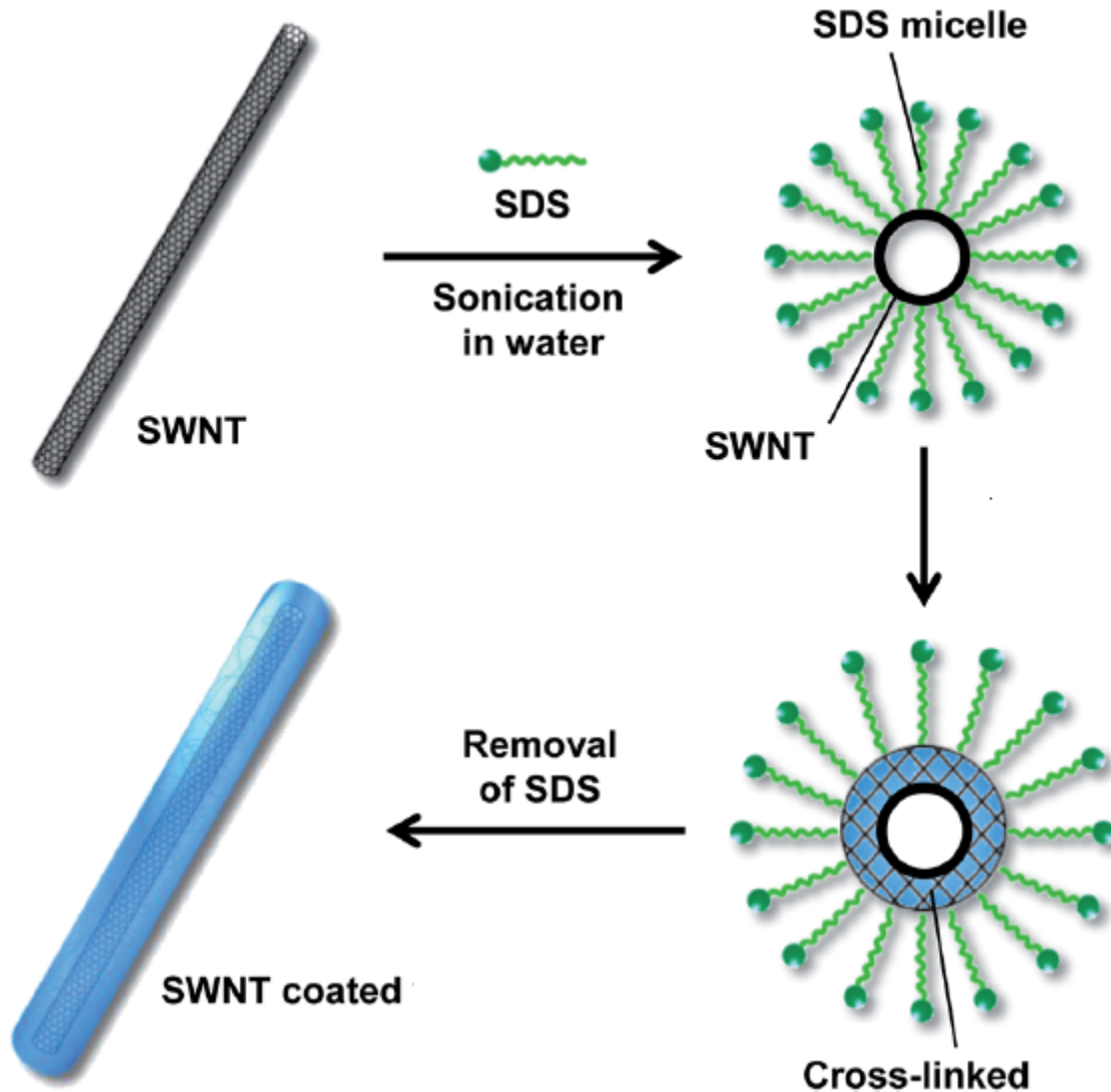
- ➔ Grâce à un modèle de l'interaction électron-phonon, nous pouvons déduire une plus grande délocalisation des excitons dans les L-SWNT par rapport au SWNT
- ➔ Nous observons une corrélation entre la densité de défauts et la localisation des excitons

Plan de l'exposé

- ➔ Étudier des nanotubes de carbone synthétisés avec une méthode haute température et qui ont une faible densité de défauts.
- ➔ Signatures des effets de localisation des excitons dans les spectres De PL de NT individuels
- ➔ Comparaison NT haute qualité cristalline vs NT standard
- ➔ Est-il possible de contrôler la localisation des excitons ?
- ➔ Questions ouvertes et perspectives

Contrôle de la localisation des excitons

Polymérisation
du styrène en
micelle



Collaboration :

S. Campidelli
(LICSEN)

G. Allard (LAC)

Contrôle de la localisation des excitons

Polymérisation
du styrène en
micelle

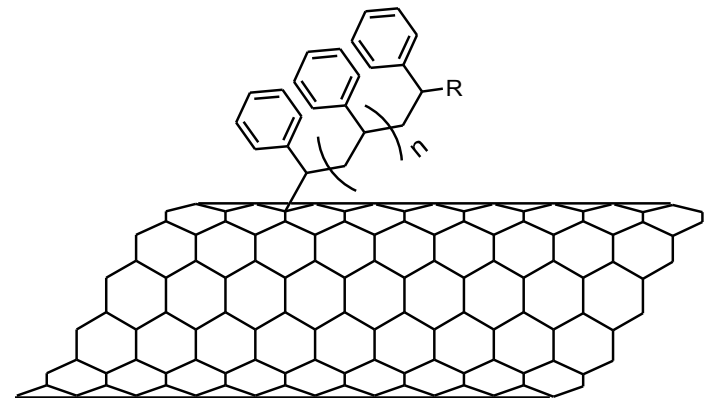


Collaboration :

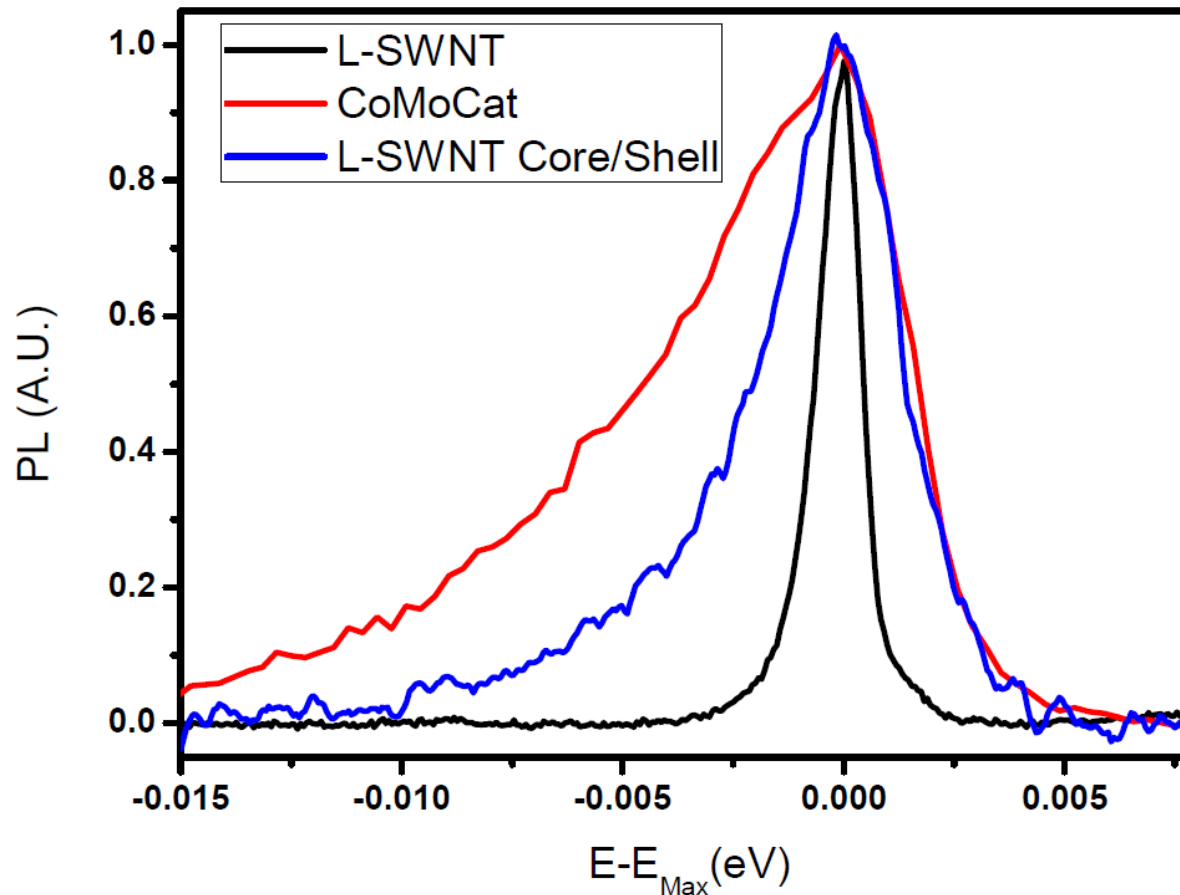
S. Campidelli
(LICSEN)

G. Allard (LAC)

Création de
quelques
défauts par
formation de
liens covalents

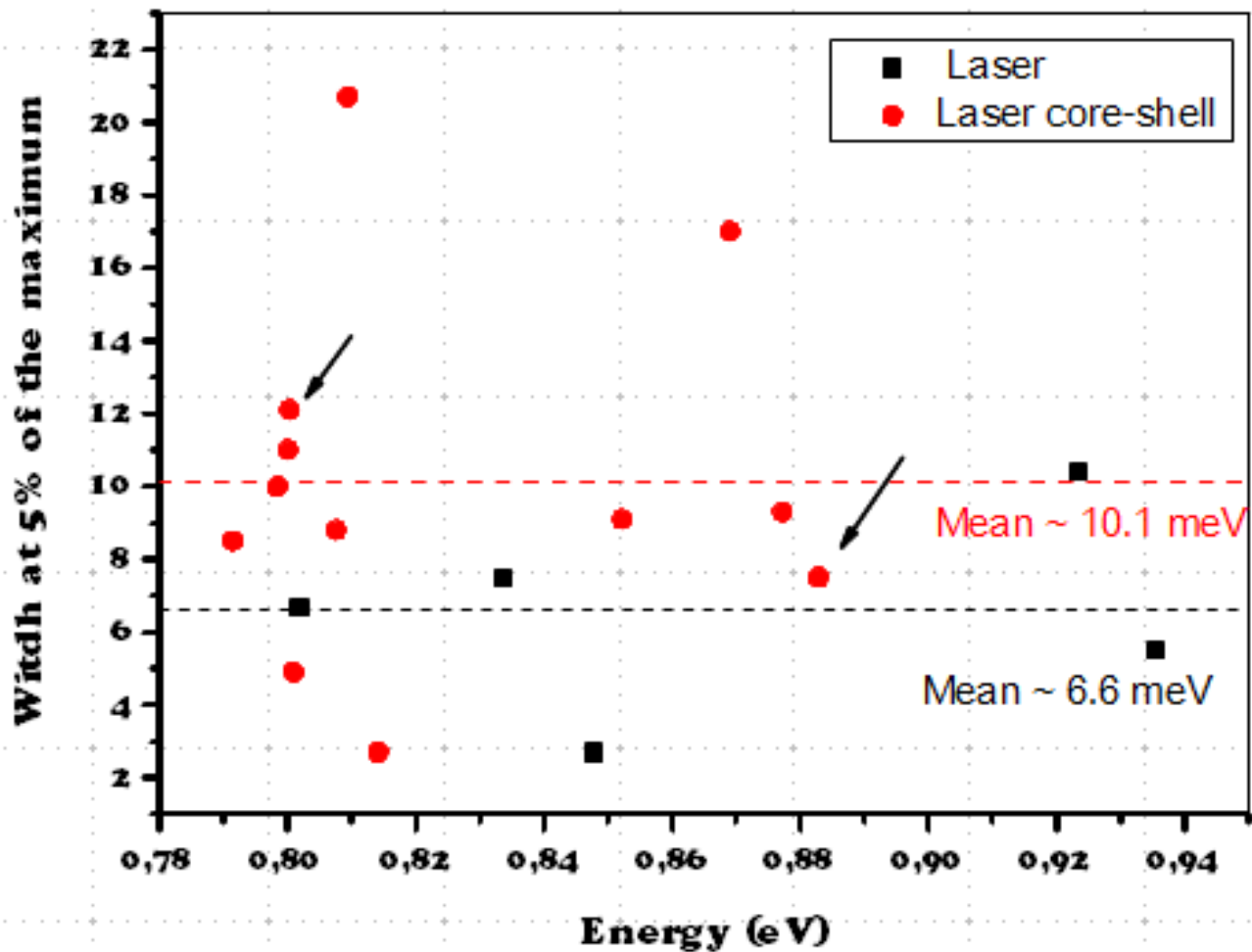


Contrôle de la localisation des excitons



La fonctionnalisation des L-SWNTs avec une coquille en polymère semblerait agir sur la localisation des excitons

Contrôle de la localisation des excitons



- ➡ En moyenne les complexes NT/polymère montrent des excitons plus localisés
- ➡ Grande dispersion dans les données, création des défauts inhomogène. Nécessité de confirmer ces résultats avec des techniques complémentaires.

Plan de l'exposé

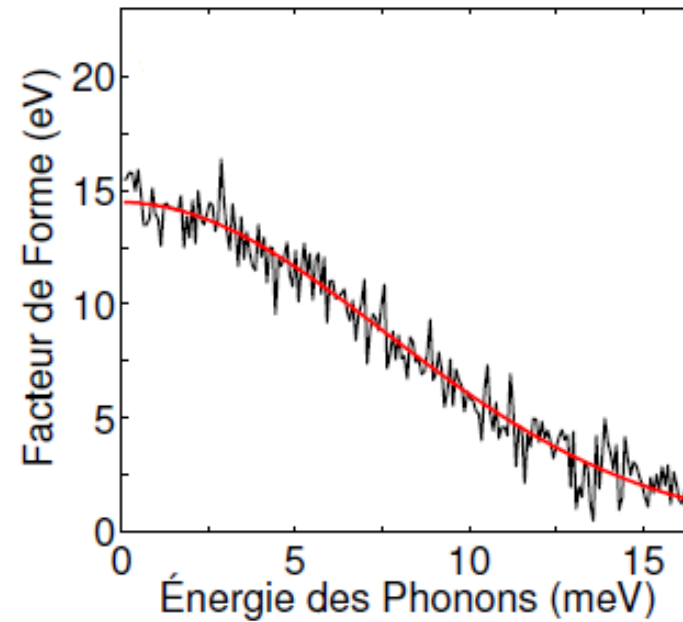
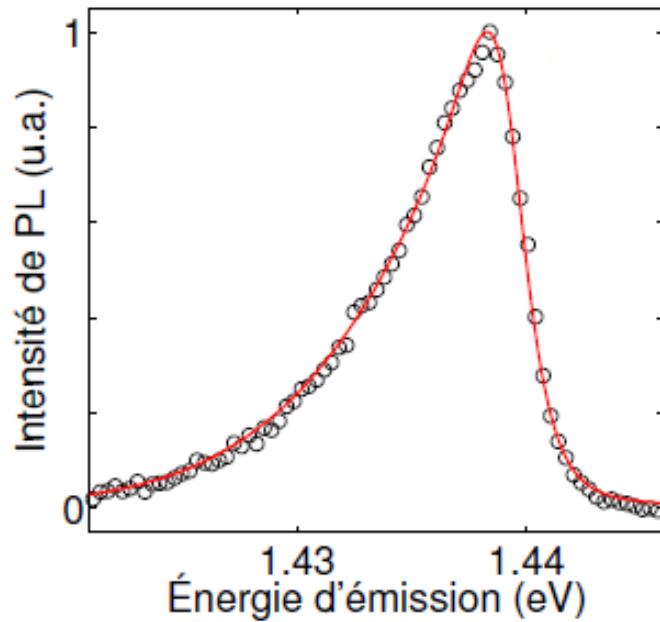
- ➔ Étudier des nanotubes de carbone synthétisés avec une méthode haute température et qui ont une faible densité de défauts.
- ➔ Signatures des effets de localisation des excitons dans les spectres De PL de NT individuels
- ➔ Comparaison NT haute qualité cristalline vs NT standard
- ➔ Est-il possible de contrôler la localisation des excitons ?
- ➔ Questions ouvertes et perspectives

Questions ouvertes et perspectives

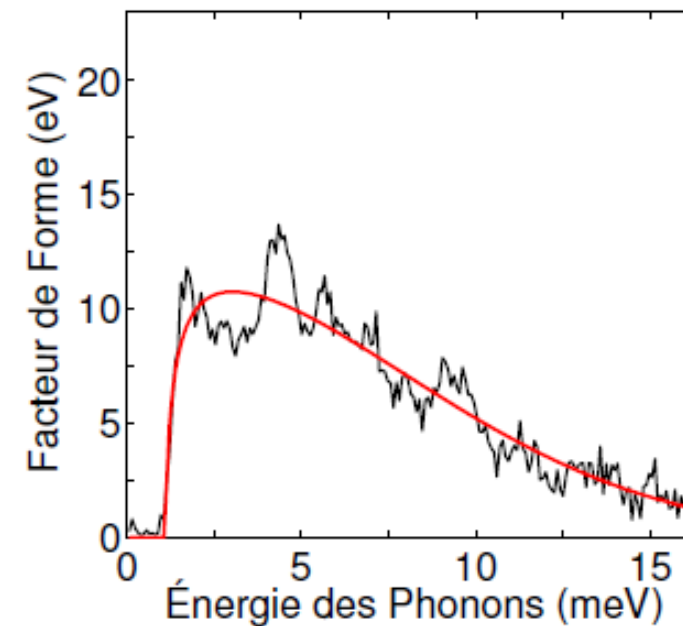
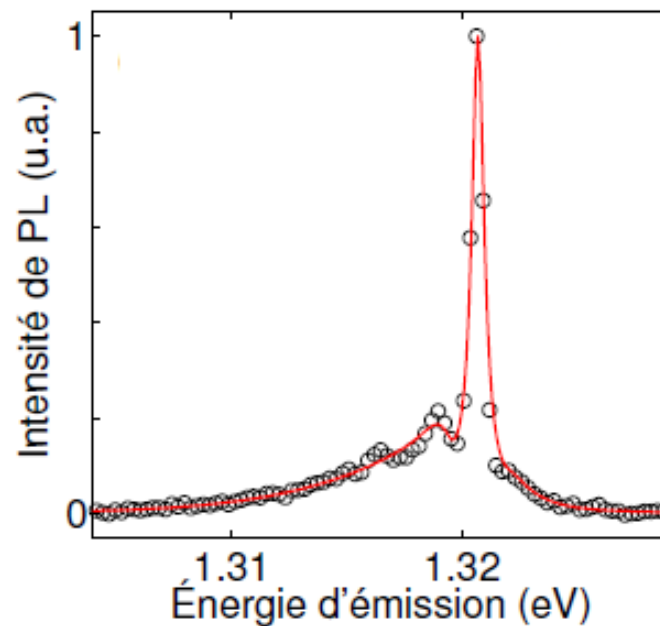
- ➔ Tester l'émission de photons uniques à 1.5 μm avec des détecteurs supra-conducteurs
- ➔ Vérifier la corrélation entre excitons plus ou moins localisés et l'émission de photons uniques
- ➔ Etudier les propriétés des complexes nanotubes/polymère.

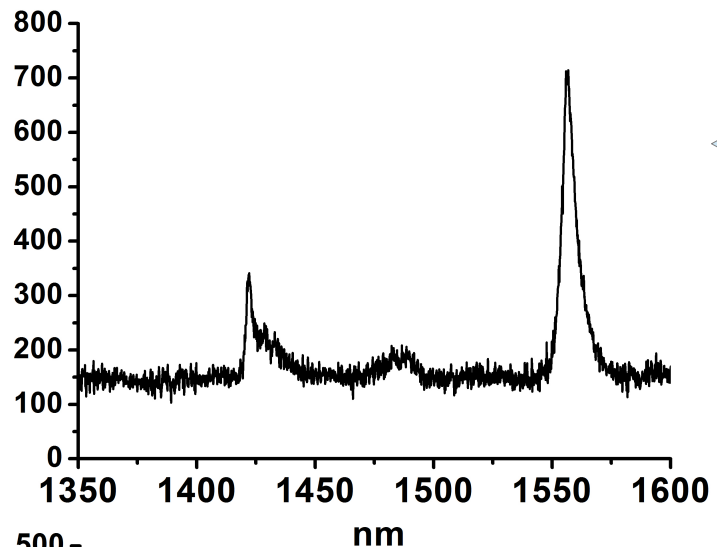
Merci pour votre attention !!

Ajustement des profils de PL



SWNT

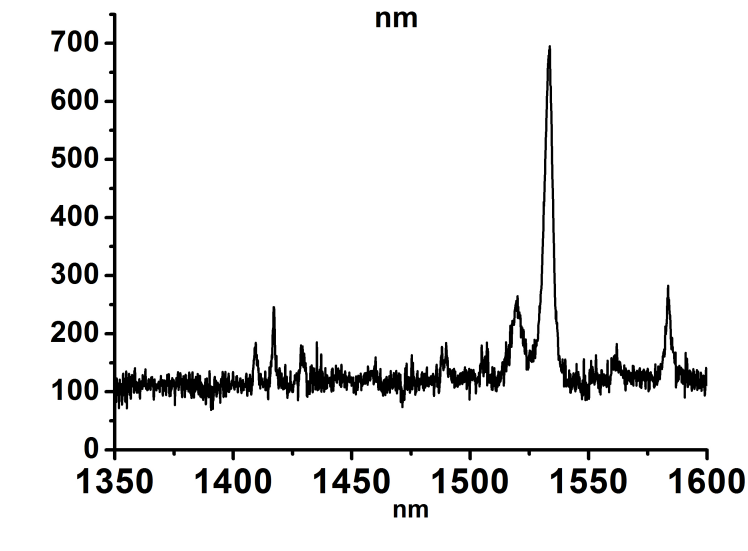
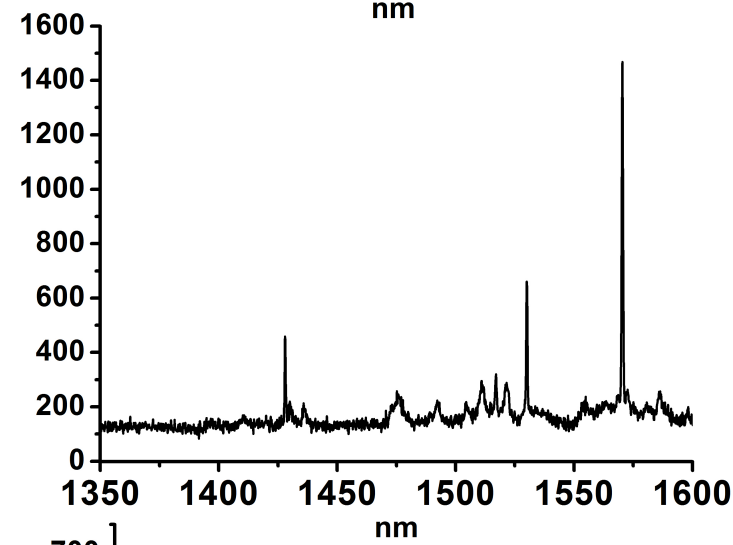
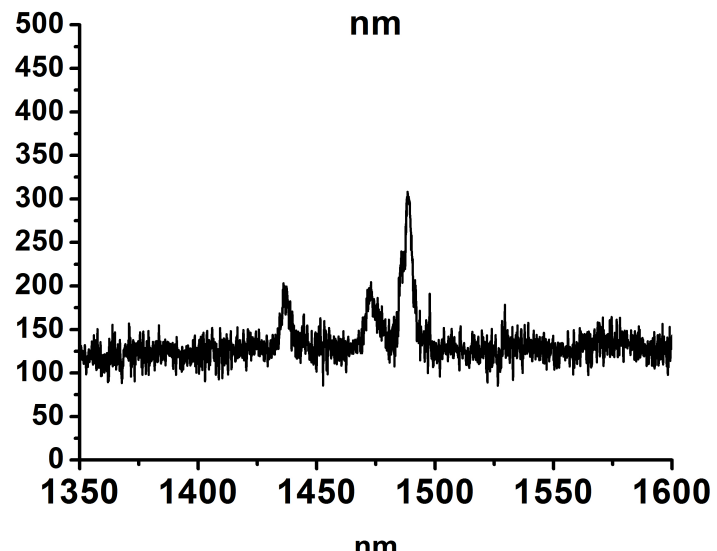
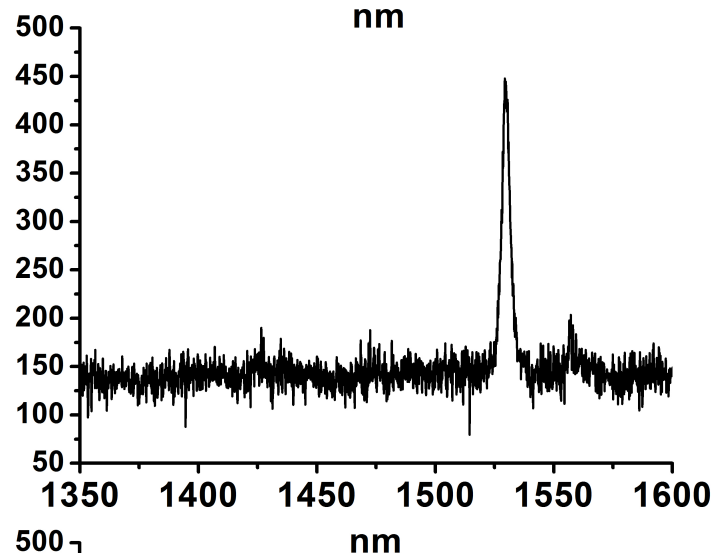
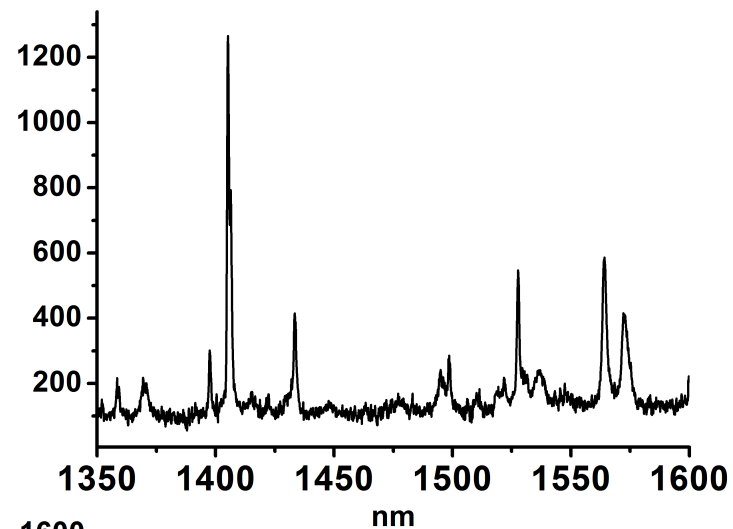




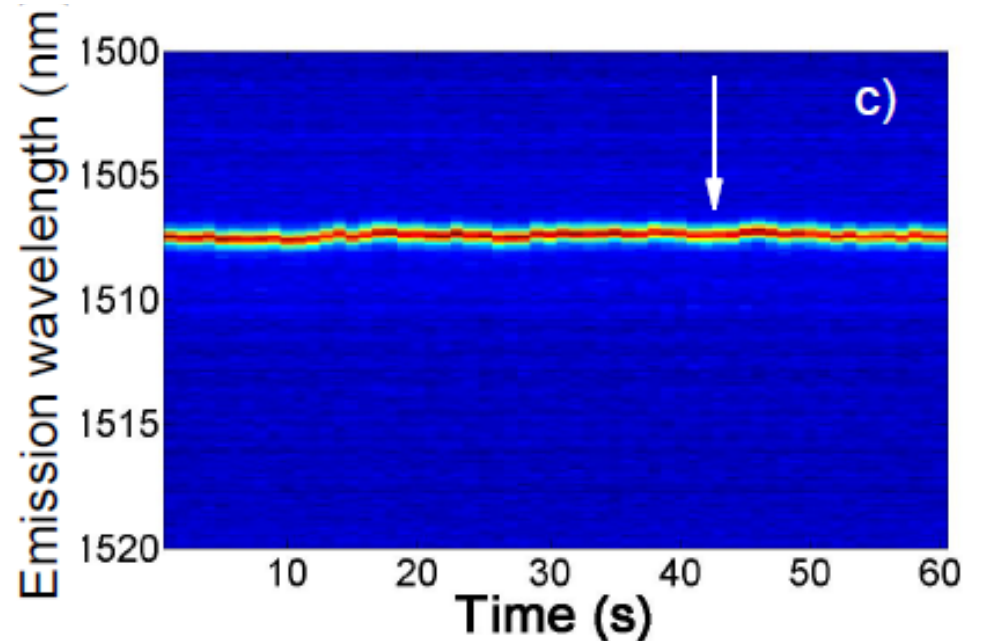
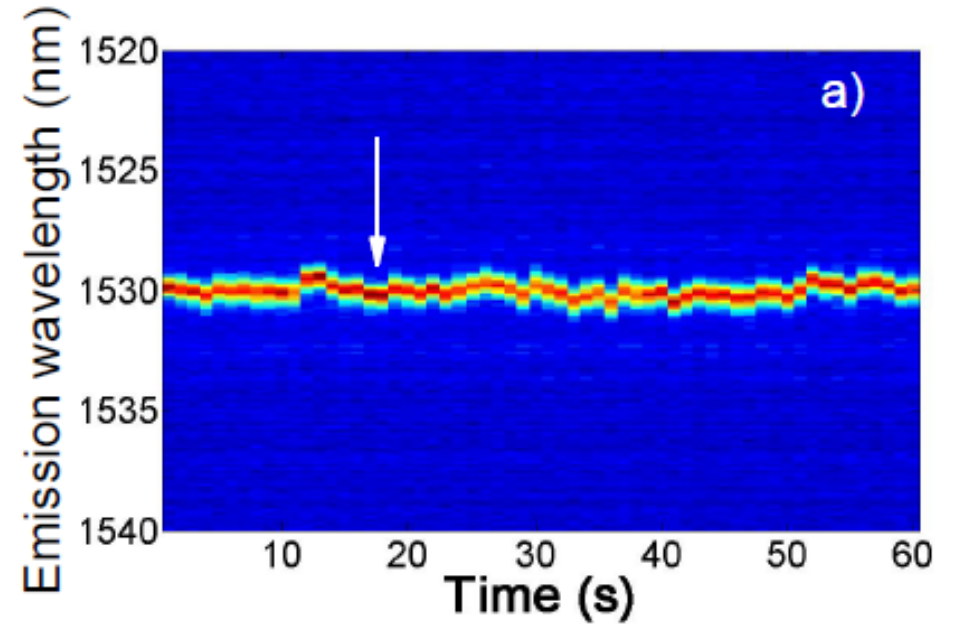
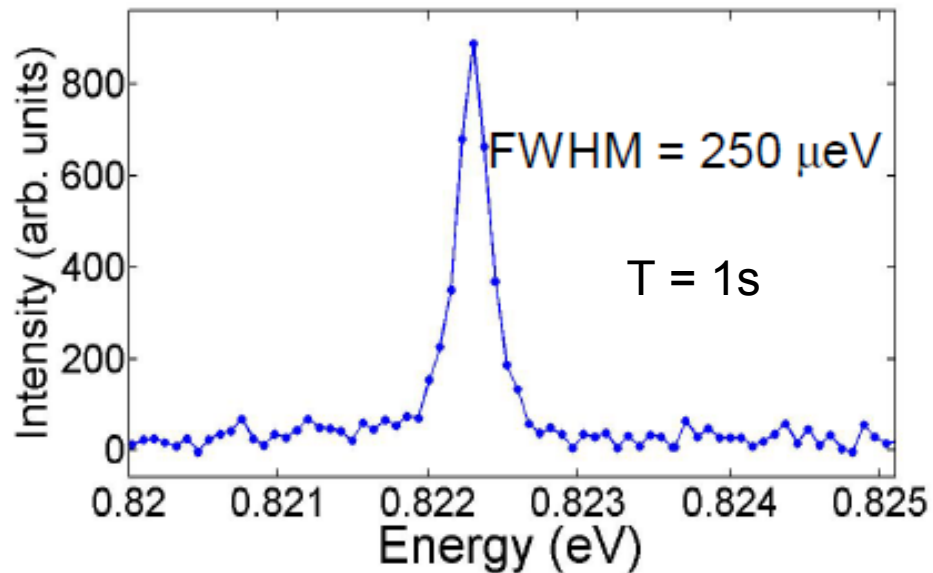
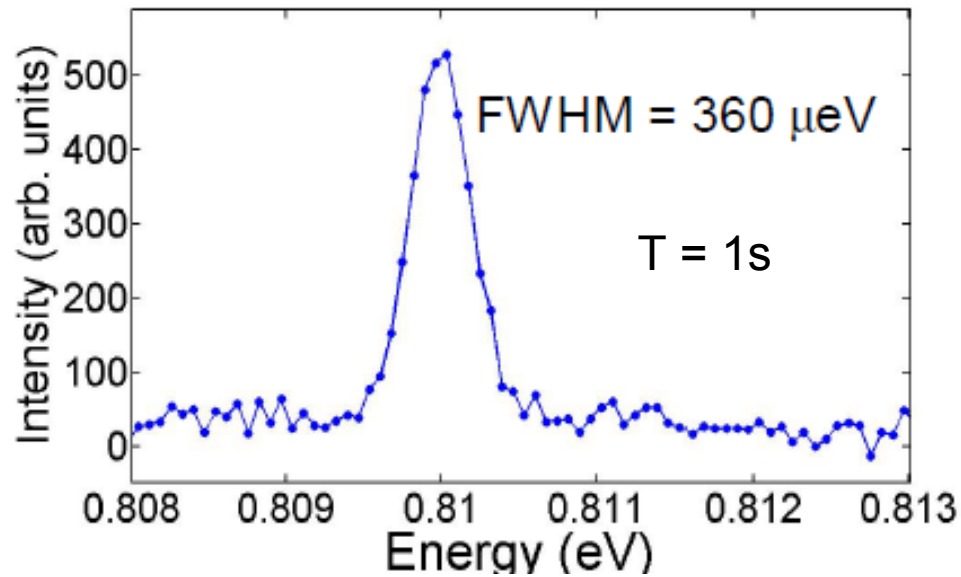
Coquille



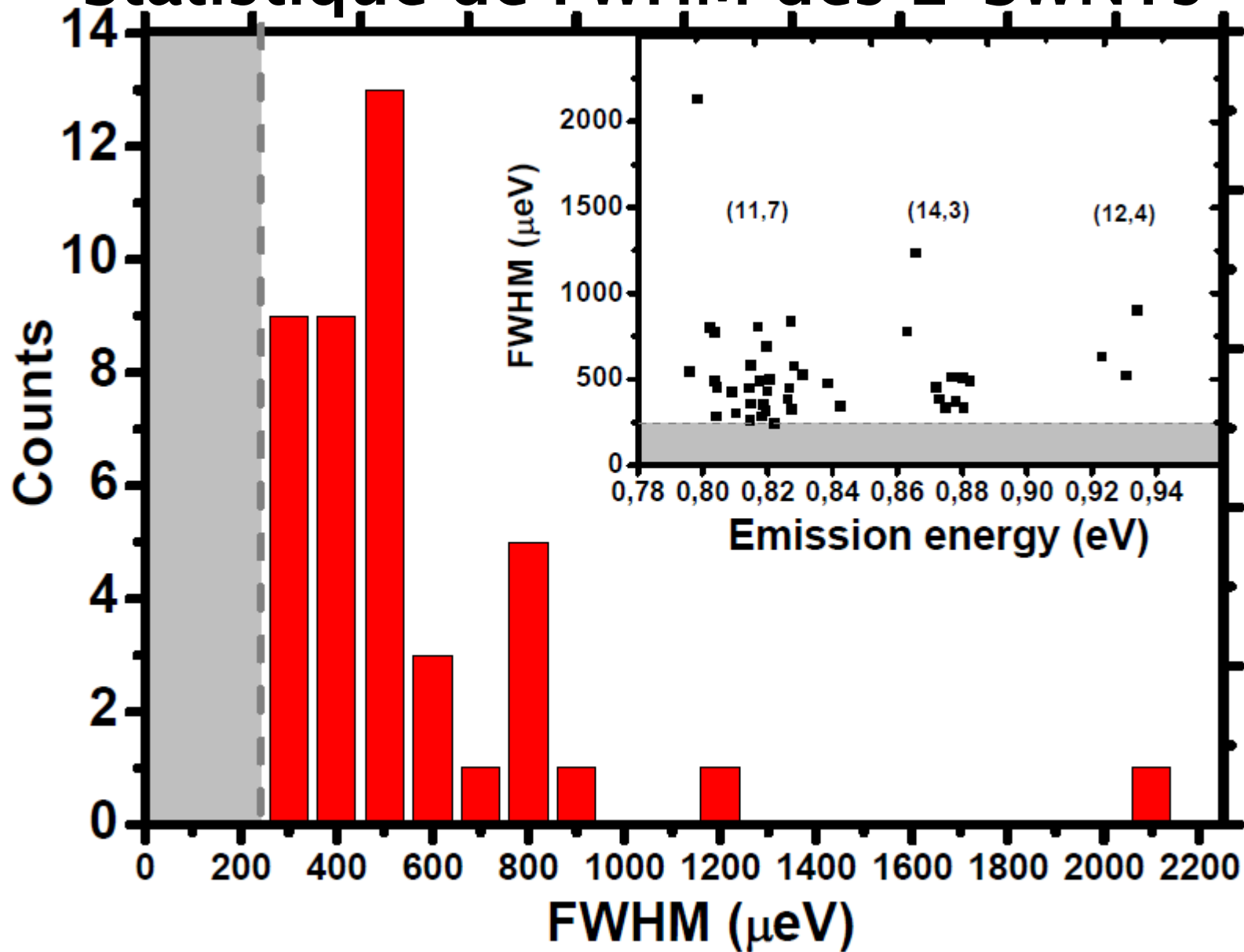
L-SWNTs



PL sur des L-SWNTs individuels

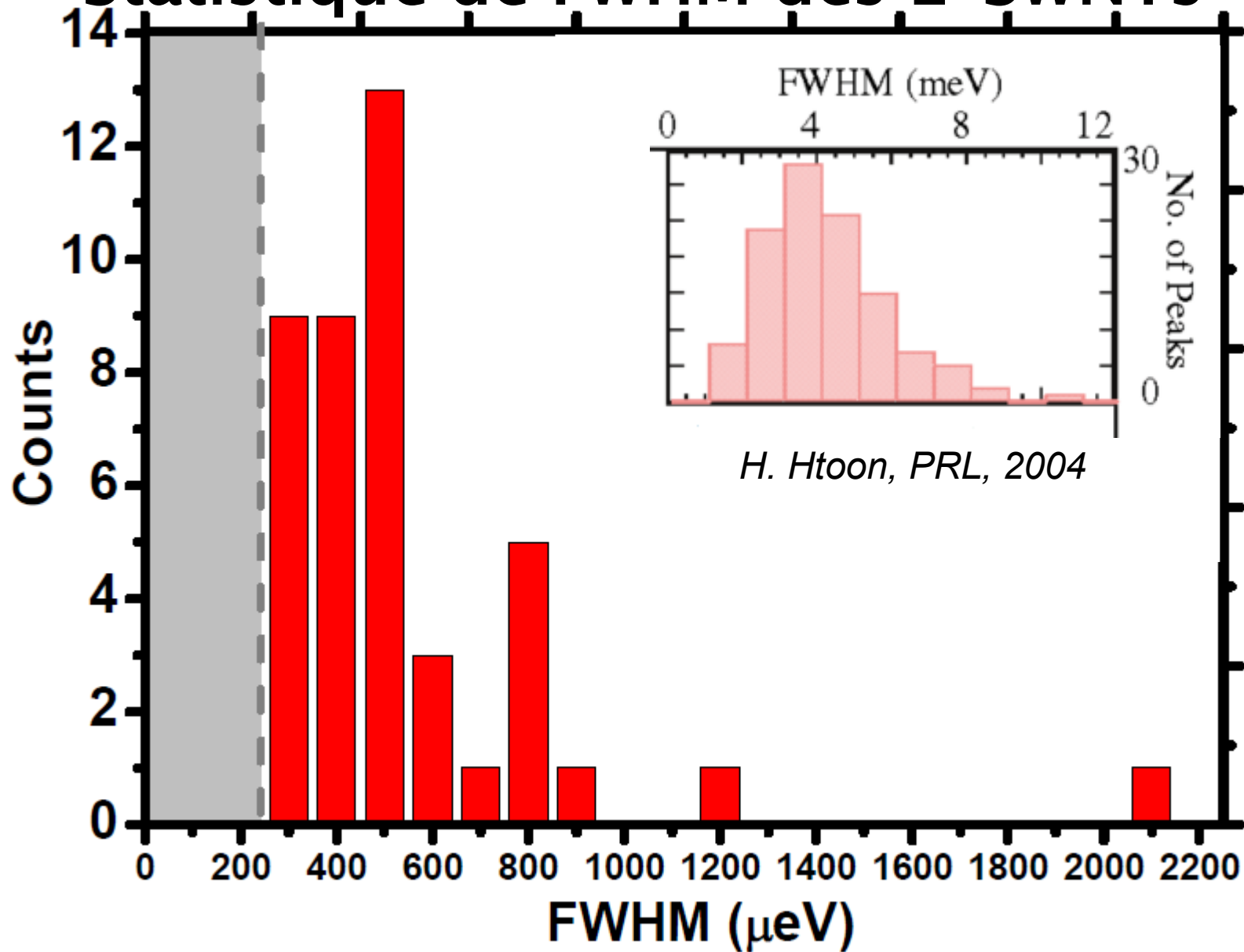


Statistique de FWHM des L-SWNTs



V. Ardizzone et al., PRB Rapid Comm. (choisi comme Editor's Suggestion)

Statistique de FWHM des L-SWNTs



Les L-SWNTs montrent des raies statistiquement plus fines

L'interaction électron-phonon

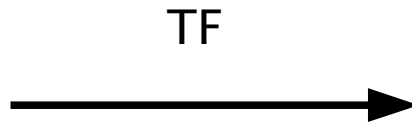
Une étendue finie de la fonction d'onde excitonique le long de l'axe du tube introduit une énergie de coupure dans le couplage aux phonons

$$\sigma \longleftrightarrow \frac{h\nu}{\pi\sigma}$$

Conséquence de la conservation du vecteur d'onde dans l'interaction exciton-phonon

Calcul des spectres

$$\chi(t)$$



Spectre de PL

Rapport de branchement

$$RB = \frac{|\langle 1 | D_{\xi}^{\dagger} | 0 \rangle|^2}{|\langle 0 | D_{\xi}^{\dagger} | 0 \rangle|^2}$$



$$RB \propto \omega_q^{Dim-2}$$

Probabilité de recombinaison avec émission
d'un phonon basse énergie

Probabilité de recombinaison directe

Diverge aux basses énergies dans le cas 1D !!

Barrières acoustiques

