

# Décharges impulsionsnelles dans les liquides application à la synthèse de nanoparticules

19/10/2016

13èmes Journées d'Echanges du Réseau des Plasmas Froids, La Rochelle

**Cédric NOËL, Thierry BELMONTE, Hiba KABBARA**

Institut Jean Lamour – UMR CNRS – Université de Lorraine  
NANCY, FRANCE



# Plan

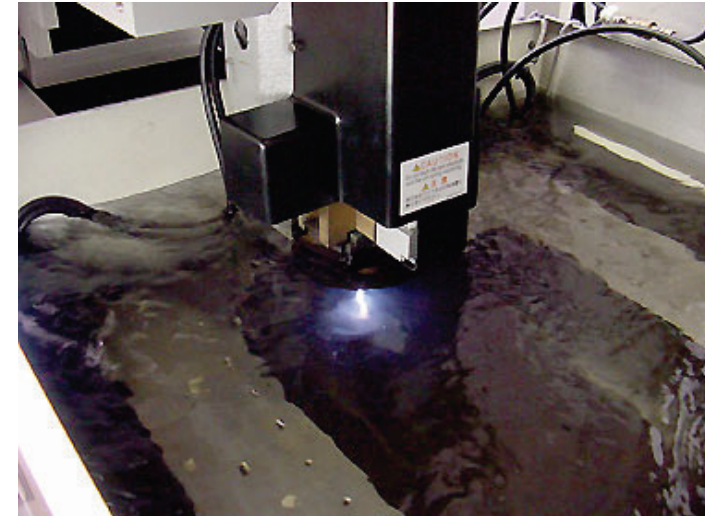


- Introduction
- Classification des décharges dans les liquides
- Claquage dans les liquides
- Synthèse de nanoparticules
- Caractérisation des décharges
- Conclusion

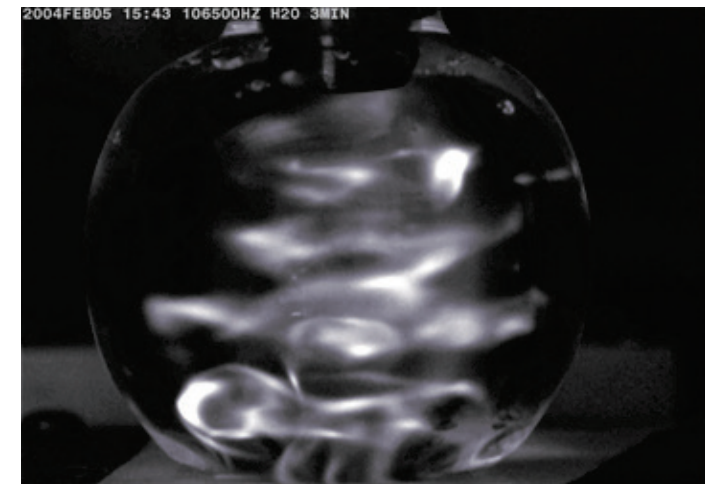
# Introduction

## Les applications des décharges dans les liquides

- Disjoncteurs haute-tension
- Oxydation par plasma électrolytique (PEO)
- Usinage par électro-érosion (Electro-Discharge Machining (EDM))
- Synthèse de Nanomatériaux
- Plasma médecine
- Lithotripsie
- Sonoluminescence
- Explosions sous-marines
- Synthèse par explosion
- Cavitation, etc.



See <http://www.alcomanufacturinginc.com>



See <http://www.grc.nasa.gov/>

# Introduction

- Nanoparticules : sujet de recherche important des dernières décennies
  
- Propriétés uniques :
  - *Électriques*
  - *Optiques*
  - *Magnétiques*
  - *Catalytiques*
  - ...
  
- Applications :
  - *Microélectronique*
  - *Optoélectronique*
  - *Catalyse*
  - *Magnétisme*
  - *Energie (fuel cells, électrodes)*
  - ...
  
- Matériaux :
  - *Métaux purs*
  - *Alliages*
  - *Oxydes*
  - ...
  
- Synthèse
  - *Chimiques*
  - *Mécaniques*
  - *Physico-chimiques* → *Plasmas* → **Plasmas dans les liquides**

⇒ **Avantages** : simplicité du dispositif, faible coût, ...

# Décharges dans les liquides - Classification

Plusieurs critères de classification :

1. Géométrie
2. Alimentation électrique
3. Liquide / Electrodes
4. Distance inter-électrode

# Décharges dans les liquides - Classification

## Géométrie

- Dans un gaz entre une électrode et la surface d'un électrolyte
- Dans un électrolyte à la surface d'une électrode
- Entre deux électrodes immergées

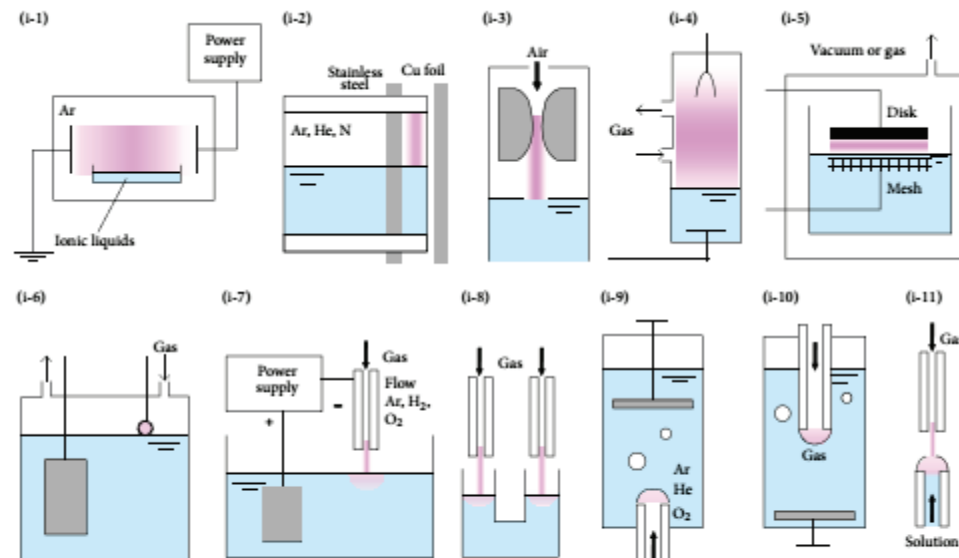


FIGURE 1: Gas discharge between an electrode and the electrolyte surface (Group i). (i-1) Influence of glow discharge plasma and dielectric barrier discharge [18–24]. (i-2) Dielectric barrier discharge in quartz tube [25]. (i-3) Gliding arc discharge [26]. (i-4) Gas-liquid interfacial plasma, plasma electrochemistry in ILs, and so forth [27–39]. (i-5) Glow discharge formation over water surface [40]. (i-6) Discharge electrolysis [41–56, 76, 77]. (i-7) Microplasma [15, 57–67]. (i-8) Dual plasma electrolysis [78]. (i-9) Plasma in and in contact with liquids [68, 69]. (i-10) Microplasma discharge [70]. (i-11) Glow discharge generated in contact with a flowing liquid cathode [71–75].

# Décharges dans les liquides - Classification

## Géométrie

- Dans un gaz entre une électrode et la surface d'un électrolyte
- **Dans un électrolyte à la surface d'une électrode**
- Entre deux électrodes immergées

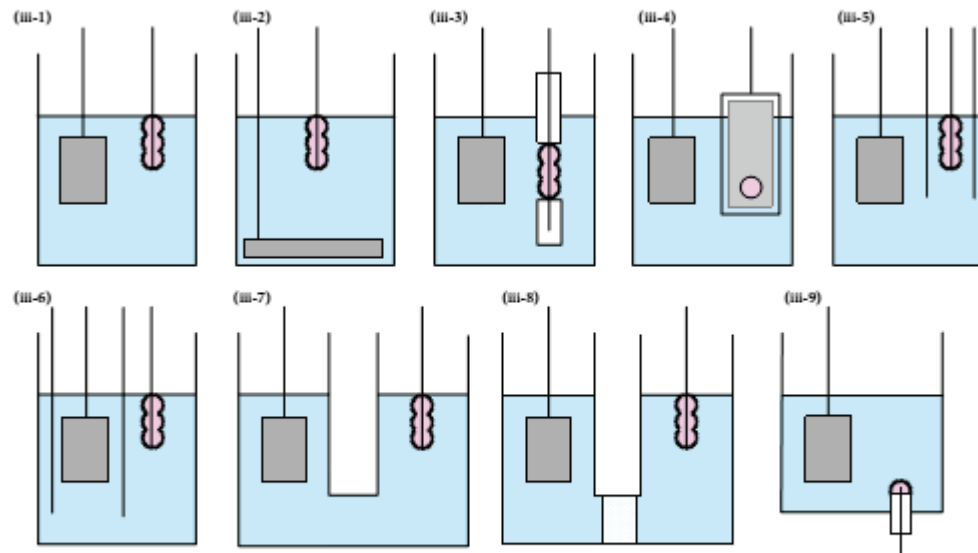


FIGURE 3: Contact discharge between an electrode and the surface of surrounding electrolyte, (iii-1) contact glow discharge [171-194], (iii-2) electrical discharges [195-197], streamer discharge plasma in water [198], (iii-3) solution plasma [177, 179, 185, 199], electric discharge plasma [200], (iii-4) contact glow discharge [199, 201, 202], (iii-5) contact glow discharge [203], (iii-6) contact glow discharge electrolysis [204-206], (iii-7) high-voltage cathodic Polarization [207], (iii-8) contact glow discharge electrolysis [204, 208-211], and (iii-9) electrical discharge [212-214].

# Décharges dans les liquides - Classification

## Géométrie

- Dans un gaz entre une électrode et la surface d'un électrolyte
- Dans un électrolyte à la surface d'une électrode
- **Entre deux électrodes immergées**

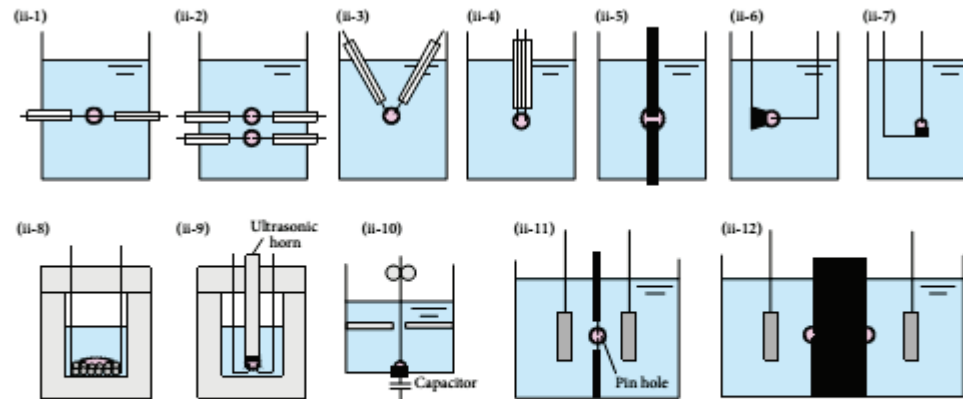


FIGURE 2: Typical electrode configuration for direct discharge between two electrodes (Group ii). (ii-1) Solution plasma [79-114]. (ii-2) Solution plasma with pair electrodes [115]. (ii-3) pulsed plasma in a liquid [116-119], arc process [120, 121], and solution plasma [122, 123]. (ii-4) Solution plasma [124-129]. (ii-5) arc discharge [130-137], submerged arc nanoparticle synthesis system (SANSS) [138-140], electric spark discharge [141]. (ii-6) arc discharge [142-152]. (ii-7) arc discharge [153-165]. (ii-8) spark discharge method in liquid media [166, 167]. (ii-9) electric plasma discharge in an ultrasonic cavitation field, (ii-10) wire explosion process in water [168]. (ii-11) DC diaphragm discharge [169], and (ii-12) AC capillary discharge [170].

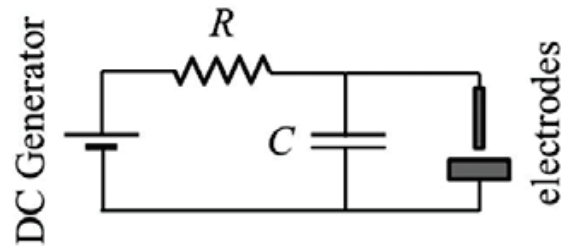


# Décharges dans les liquides - Classification

## Alimentation électrique

### *Temps de relaxation*

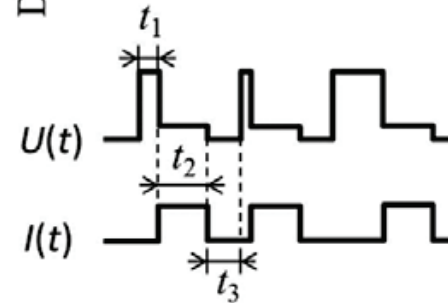
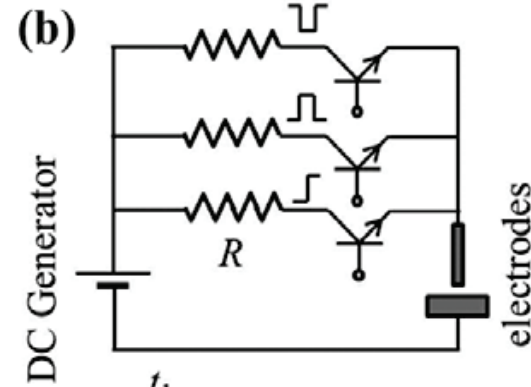
(a)



Pic de courant de forte intensité et courte durée mais fréquence et énergie délivrée variables (charge du condensateur et tension de claquage variable)

### *Transistor*

(b)



Meilleur contrôle de la fréquence et de l'énergie délivrée mais difficile d'obtenir des impulsions courtes

# Décharges dans les liquides - Classification

## Alimentation électrique

Radiofréquence ou micro-ondes, généralement pour des décharges de puissance modérée (absorption du liquide)

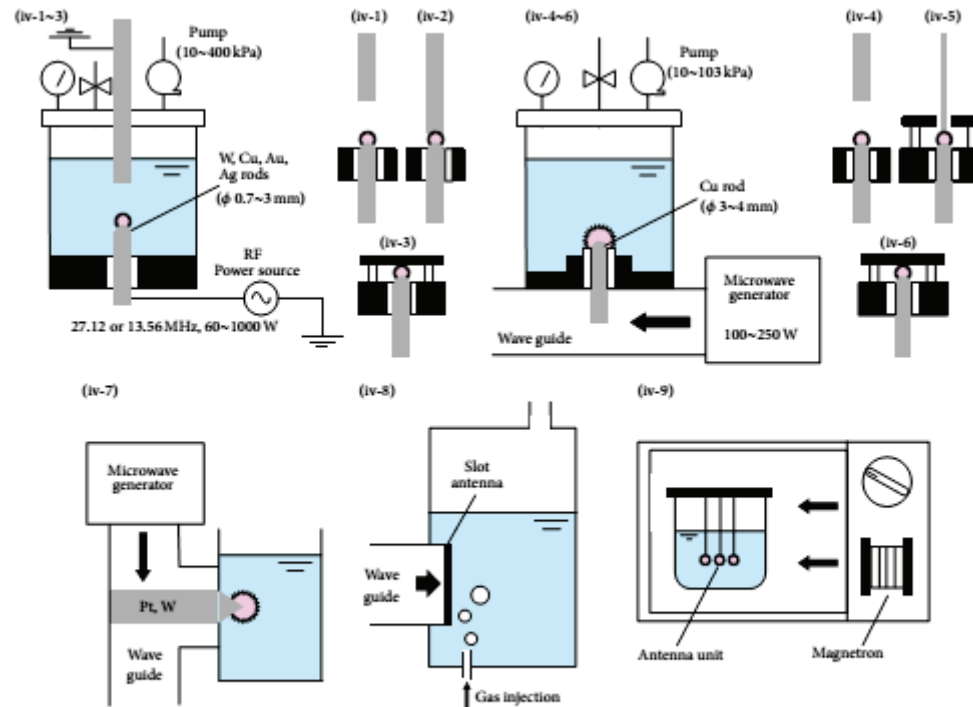


FIGURE 4: Showing configurations of radio frequency and microwave plasma in liquid techniques; (iv-1) [215-222], (iv-2) [223-225], and (iv-3) [226], (iv-4) [220, 227-232], (iv-5) [233, 234], and (iv-6) [235], (iv-7) MW-induced plasma in liquid [236, 237], (iv-8) slot-excited MW discharge [238], and (iv-9) MW irradiation by MW oven [239, 240].

Saito et al. *Journal of Nanomaterials* 123696 (2015)

# Décharges dans les liquides - Classification

## Liquide / Electrodes

Le choix du liquide et/ou des électrodes est essentiel :

- Composition élémentaire
- Pureté
- Masse moléculaire, structure
- Viscosité
- Température d'ébullition, fusion
- Conductivité électrique
- Permittivité
- ...

Table 1. Examples of electrical characteristics found for discharges in liquids.

Shape	Liquid	Applied voltage (kV)	Current (A) and pulse width	Gap distance (mm)	Reference
Relaxation	Distilled water	+112	Unknown (~500 ps)	4	Starikovskiy <i>et al</i> (2011)
Relaxation	Distilled water	-35	250 (~200 ns)	0.4	Schoenbach <i>et al</i> (2008)
Relaxation	Oil ITO 100	+4-6	100 (~1.2 $\mu$ s)	0.3	Kudalcik <i>et al</i> (2010)
Relaxation	Liquid Helium	23	280 (2.5 ms)	5	Hayakawa <i>et al</i> (1995)
Relaxation	n-Hexane	15	140 (10 ns)	1	Fuhr <i>et al</i> (1986)
Relaxation	n-Decane	0.022	$8 \times 10^{-8}$ (0.6 s)	$2 \times 10^{-5}$	Virwani <i>et al</i> (2007)
Transistor	Oil Daphne Cut HL-25	+0.110	4.2 (~250 ns)	0.25-1	Kurnia <i>et al</i> (2008)
Transistor	Liquid nitrogen	$\pm 0.220$	10.5 (32 $\mu$ s)	0.3	Muttamara and Fukuzawa (2012)

Table 2. Some physical data of dielectric liquids at 1 atm and 293 K (except for liq.N<sub>2</sub> (75 K), liq.He (5 K) and liq.Ar (85 K)); m.p.: melting point; b.p.: boiling point; B.S.: breakdown strength.

Liquid	$\epsilon_r$	Ion mobility (m <sup>2</sup> V <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> )	$\lambda$ (W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	m.p.-b.p. (K)	$\mu$ (kg m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> )	B.S. (MV cm <sup>-1</sup> )	Reference
<i>Non-polar liquids</i>							
Liquid N <sub>2</sub>	1.44	$2.50 \times 10^{-7}$	0.137	63.1-77.4	$1.66 \times 10^{-4}$	1.6-1.9	Henson (1964)
Liquid He	1.05	$4.62 \times 10^{-6}$	0.0198	b.p.: 4.2	$3.32 \times 10^{-6}$	0.7	Donnelly and Barenghi (1998)
Liquid Ar	1.6	$6.00 \times 10^{-8}$	0.132	83.8-87.2	$2.78 \times 10^{-4}$	1.1-1.42	Henson (1964)
Hexane	2.0	$1.90 \times 10^{-8}$	0.124	177.9-341.8	$3.09 \times 10^{-4}$	1.1-1.3	Gray and Lewis (1969)
Benzene	2.3	$2.76 \times 10^{-7}$	0.167	279.2-353.2	$6.50 \times 10^{-4}$	1.1	Huang and Freeman (1980)
Vegetal (castor) oil	3.2	$1.60 \times 10^{-10}$	0.17	260 - >660	0.985	1.0	Yang <i>et al</i> (2012)
Mineral (white) oil	2.2	$2.60 \times 10^{-9}$	0.11	264-648	0.020	1.0	Yang <i>et al</i> (2012)
<i>Polar liquids</i>							
Pure water	80	$2.00 \times 10^{-7}$	0.609	273.2-373.2	$1.00 \times 10^{-3}$	0.65	Light and Licht (1987)
Ethanol	23	$2.10 \times 10^{-7}$	0.171	159.2-351.5	$1.20 \times 10^{-3}$	1.65	Atten and Gosse (1969)
Chlorobenzene	5.69	$2.54 \times 10^{-8}$	0.132	228.2-404.6	$1.06 \times 10^{-3}$	0.95	Barret <i>et al</i> (1975)
Nitrobenzene	35	$2.00 \times 10^{-7}$	0.149	278.8-484.1	$1.96 \times 10^{-3}$	0.5-1	Atten and Gosse (1969)
Propylene carbonate	64.4		0.165	224-515	$2.48 \times 10^{-3}$	2.2	Atten and Gosse (1969)

Belmonte *et al. J. Phys. D: Appl. Phys.* 47 (2014) 224016

# Décharges dans les liquides - Classification

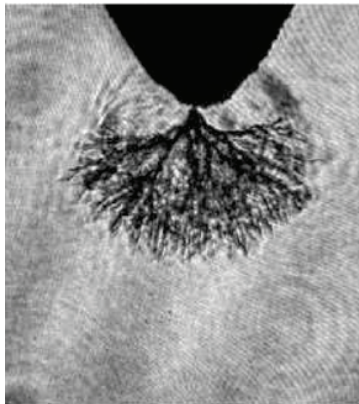
Distance inter-électrodes

mm

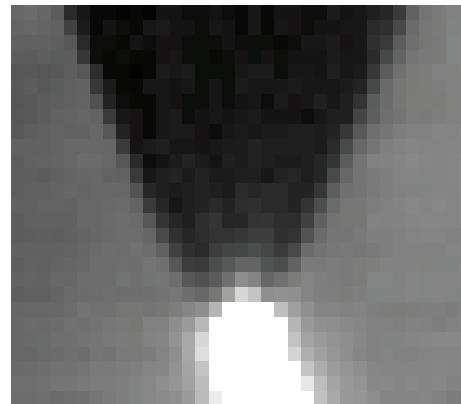
$\mu\text{m}$

nm

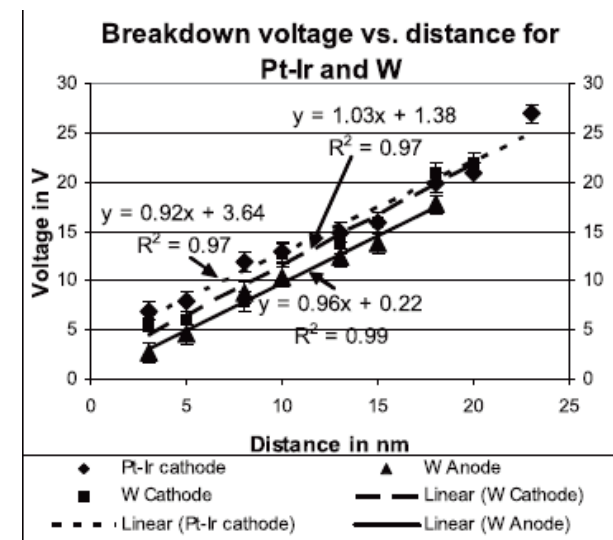
Structures bush-like



Structures filamenteuses



Structures ?

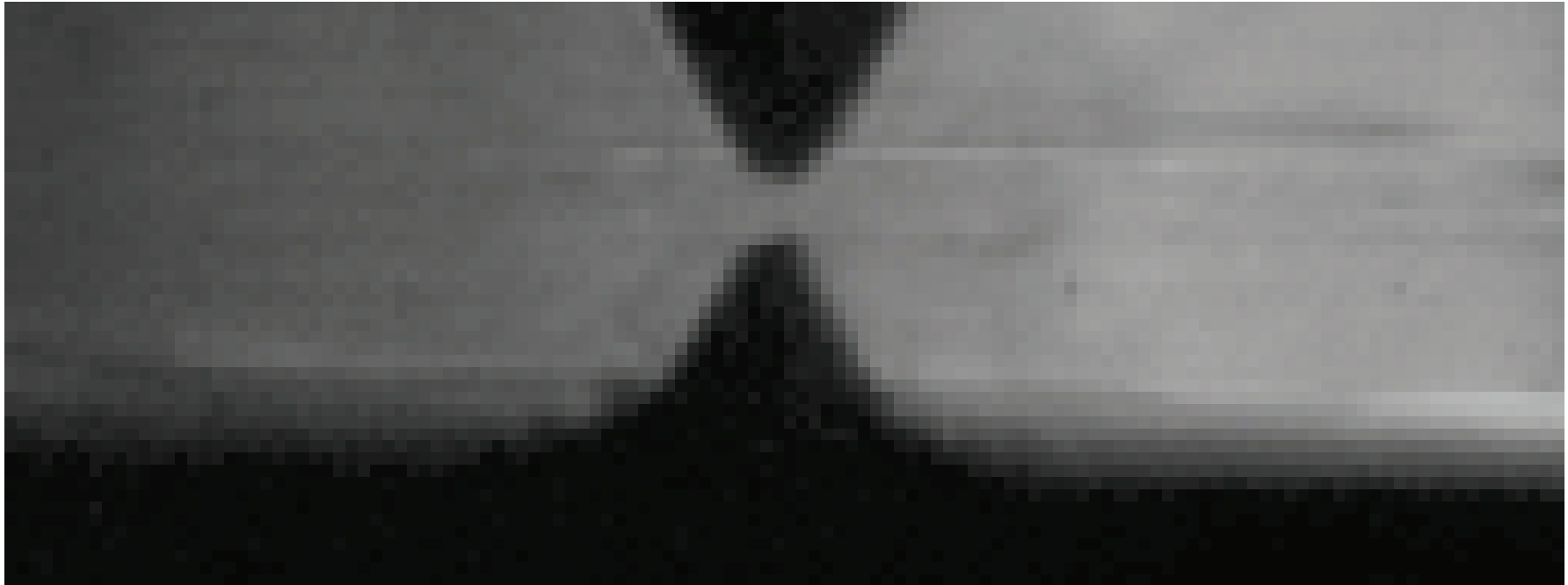


Virwani et al. PRL 99, 017601 (2007)

field-emission-assisted avalanche

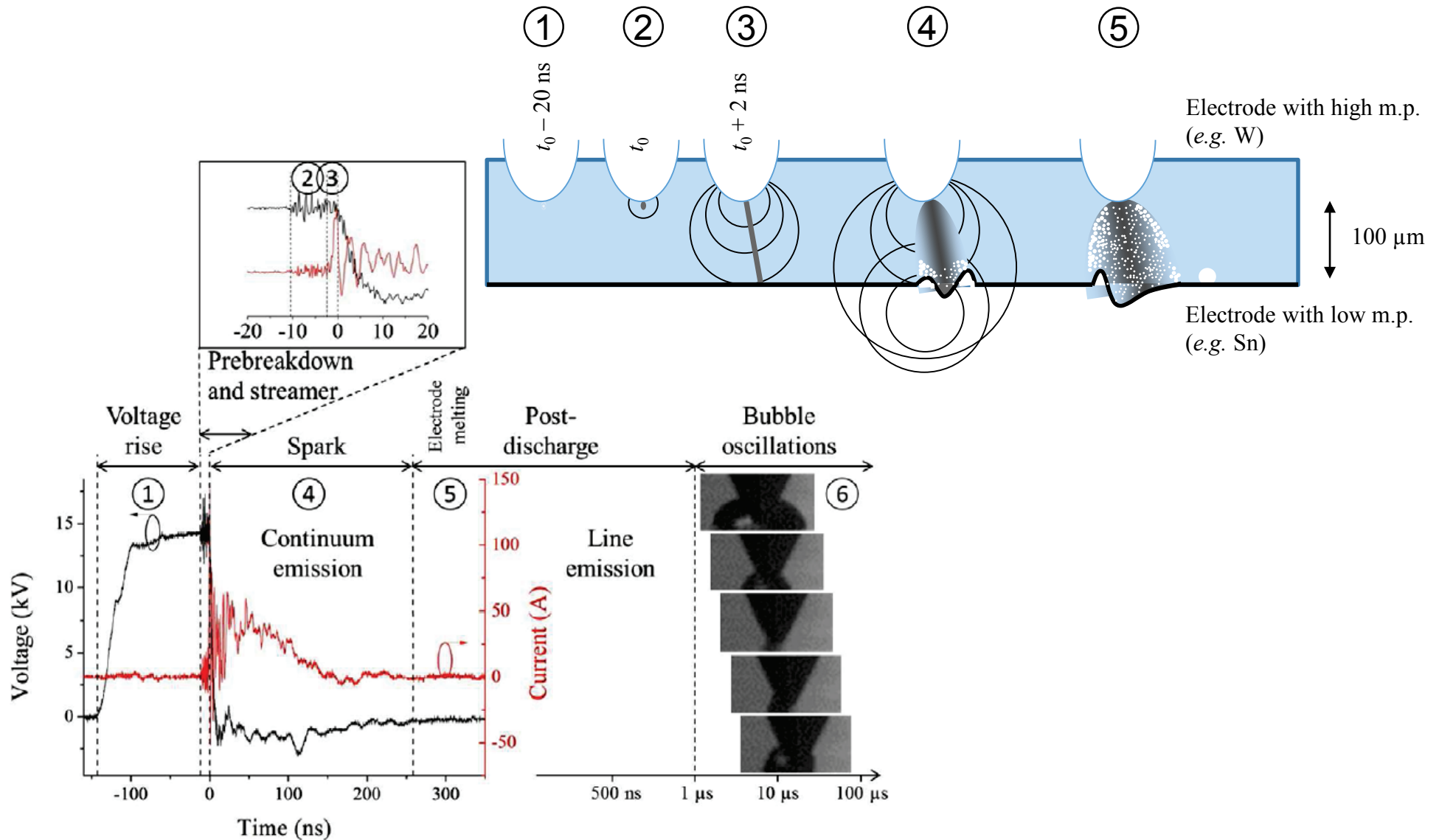
# Claquage dans un liquide

Pointe Pt, plan Al, heptane



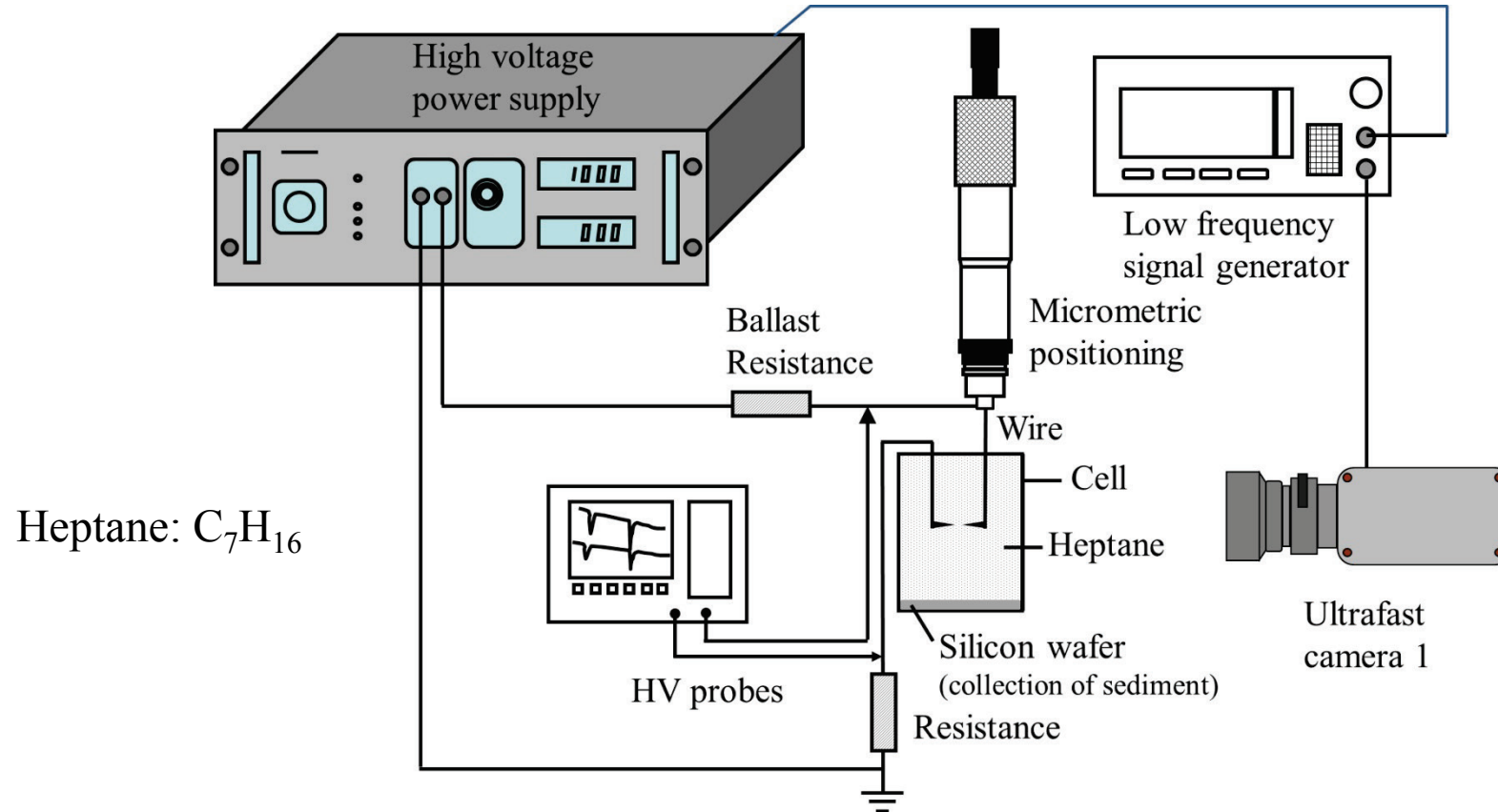
1.92  $\mu\text{s}$  / image (movie duration:  $\sim 500 \mu\text{s}$ )

# Claquage dans un liquide



# Synthèse de nanoparticules

Décharges entre deux pointes de Pt immergées dans l'heptane

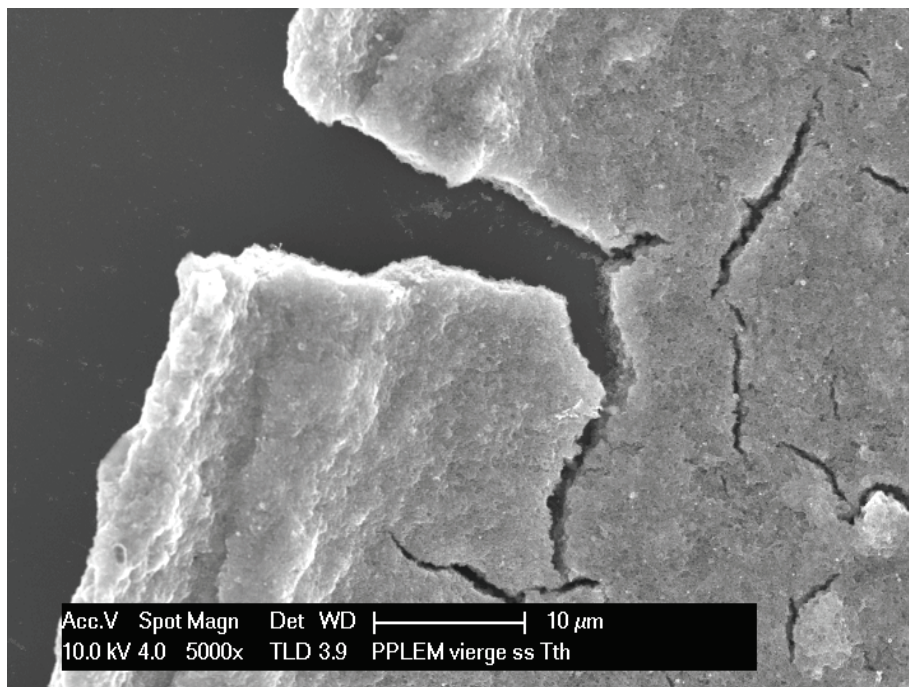


Thèse d'A. Hamdan (2013)

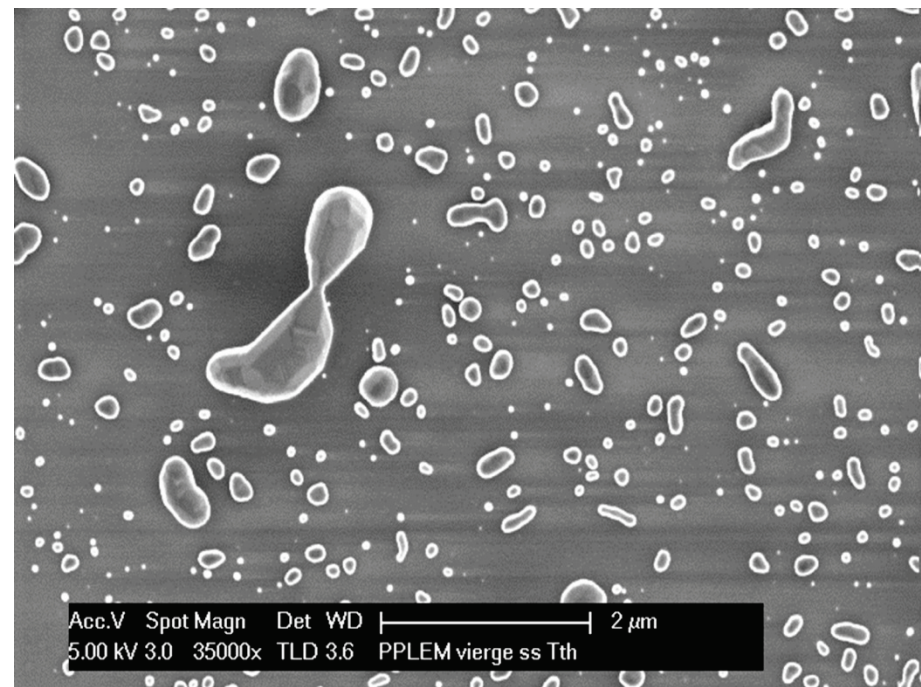
# Synthèse de nanoparticules

Décharges entre deux pointes de Pt immergées dans l'heptane

Dépôt après 10 minutes



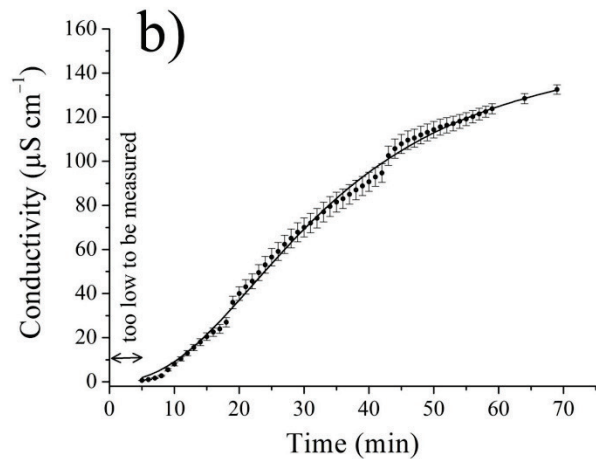
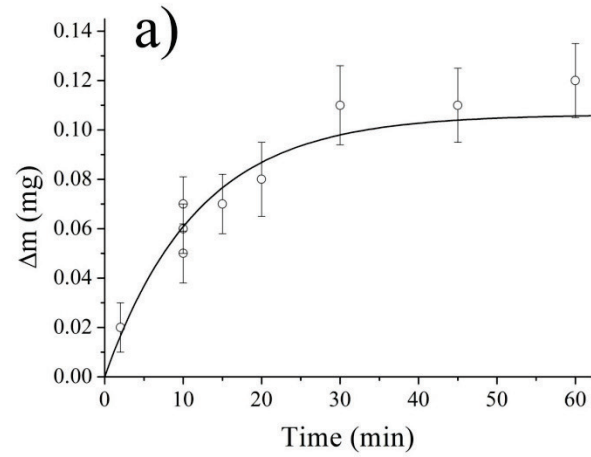
Après recuit à l'air à 500°C  
pendant 4 h



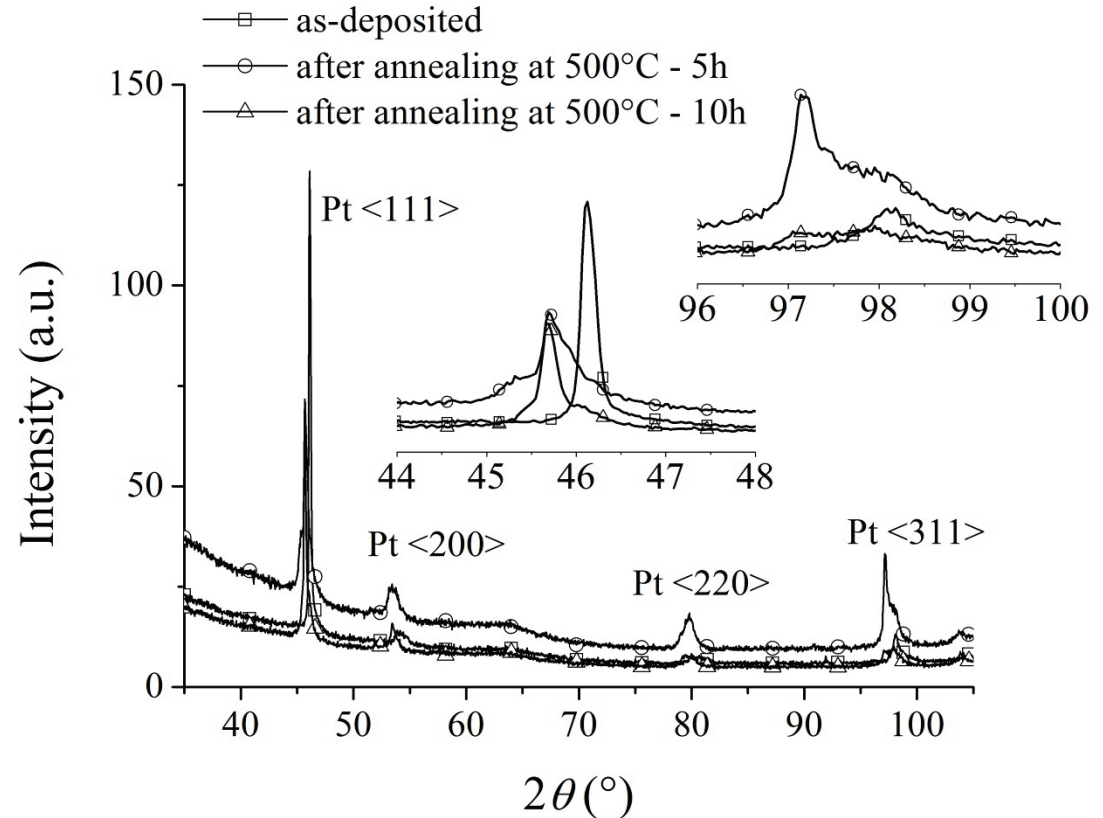


# Synthèse de nanoparticules

## Décharges entre deux pointes de Pt immergées dans l'heptane



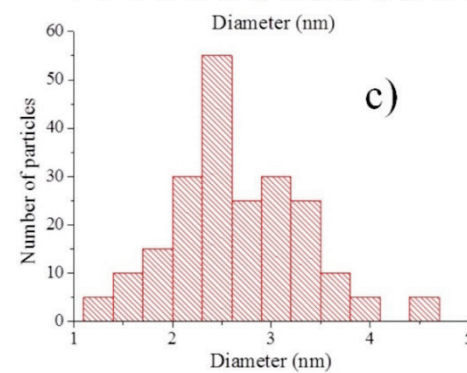
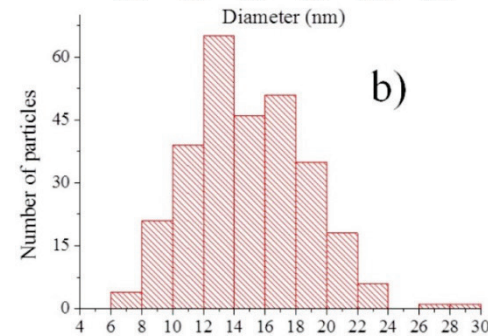
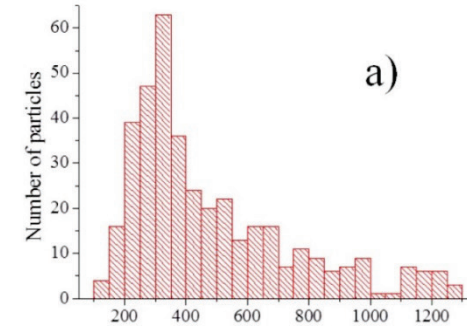
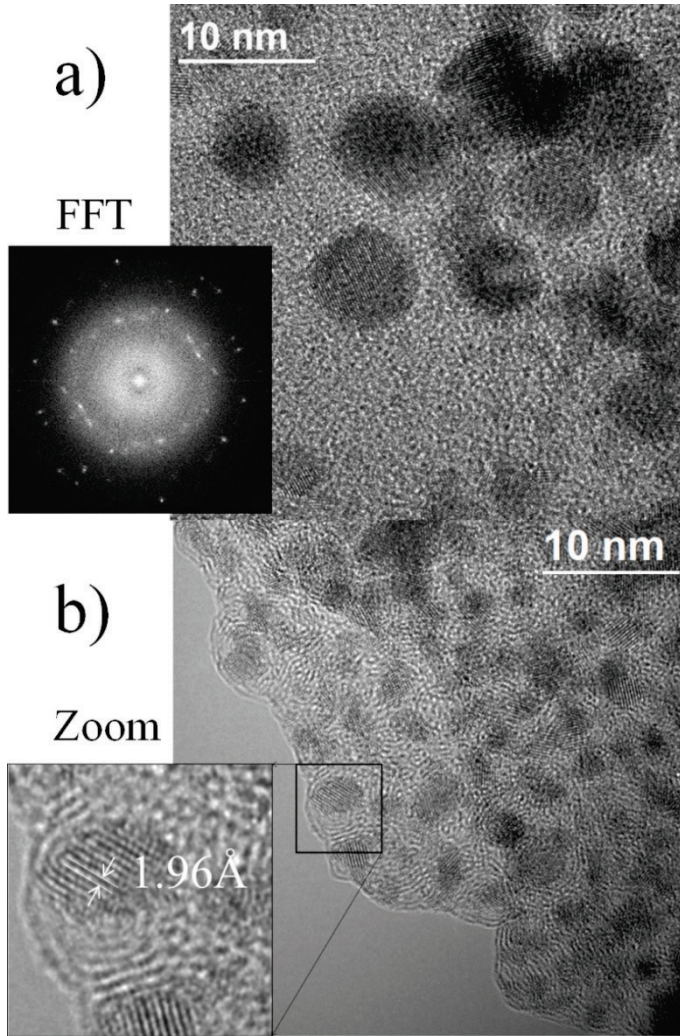
Pt représente environ 5% de la masse totale déposée



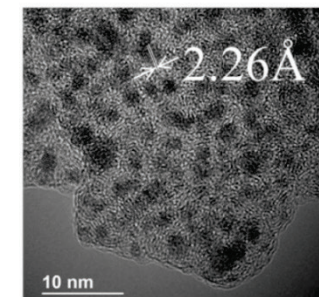
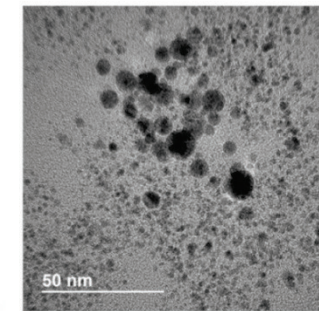
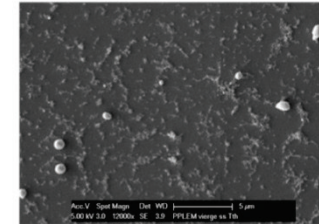
- ✓ Modification de la distance interplanaire due à une forte déformation ( $\epsilon \sim -0.0089$ ).
- ✓ Contrainte de  $\sim 1.5$  GPa.
- ✓ Due à l'expansion thermique du Pt ( $9 \times 10^{-6}\ K^{-1}$ ).

# Synthèse de nanoparticules

Décharges entre deux pointes de Pt immergées dans l'heptane

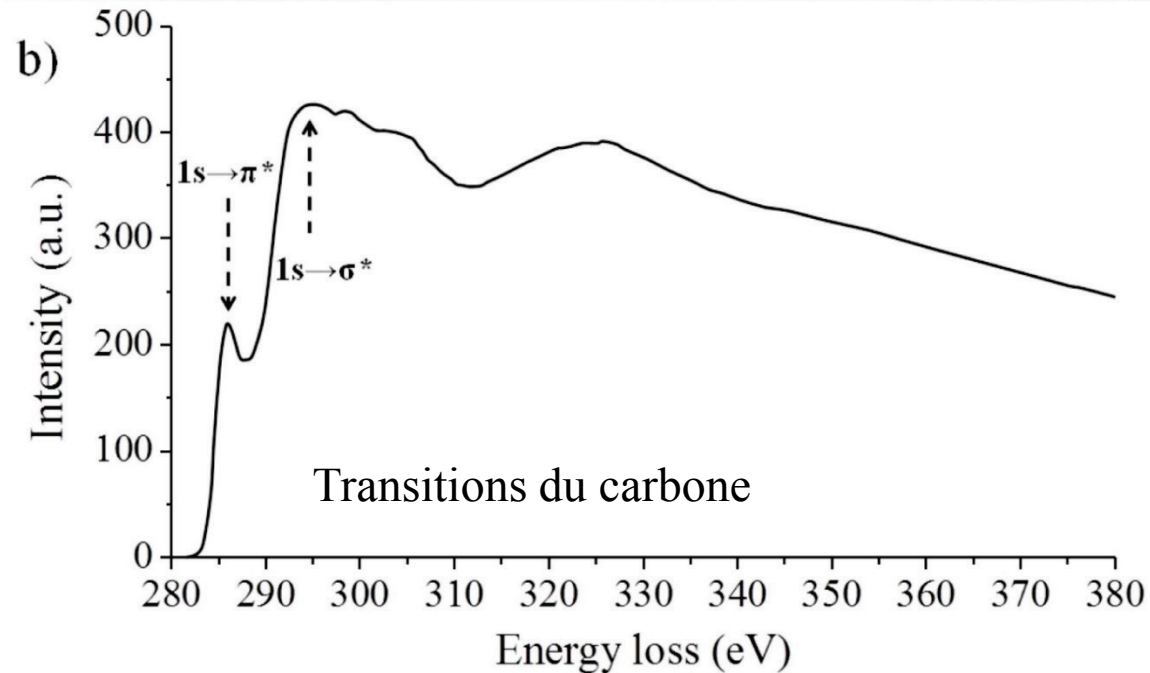
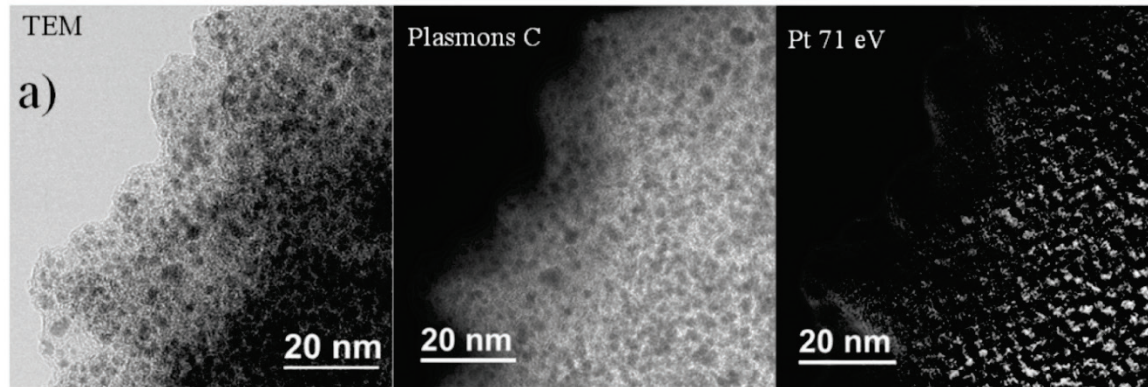


3 distributions



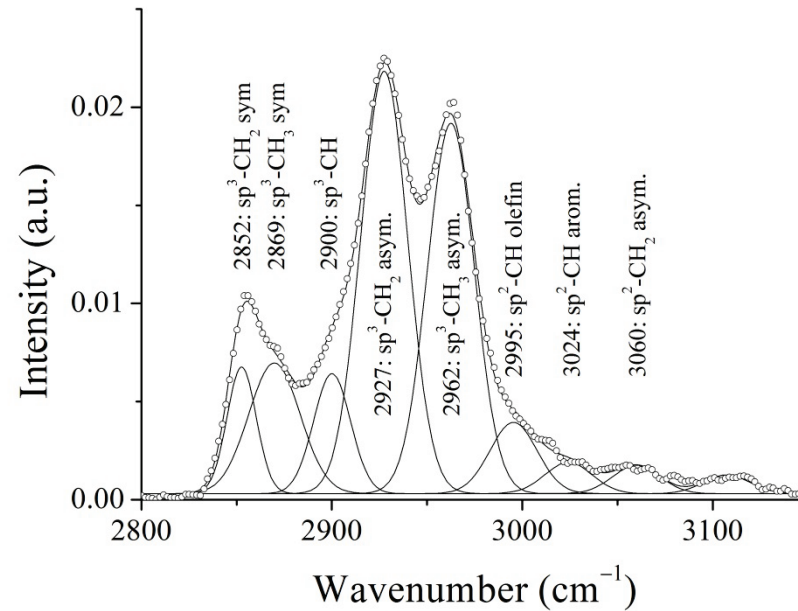
# Synthèse de nanoparticules

Décharges entre deux pointes de Pt immergées dans l'heptane



# Synthèse de nanoparticules

Décharges entre deux pointes de Pt immergées dans l'heptane



Le carbone est présent sous forme de carbone hydrogéné

FTIR

# Synthèse de nanoparticules

Décharges entre deux pointes de Pt immergées dans l'heptane

Décharge de trop courte durée = pas de mécanisme réactionnel entre le carbone et le platine

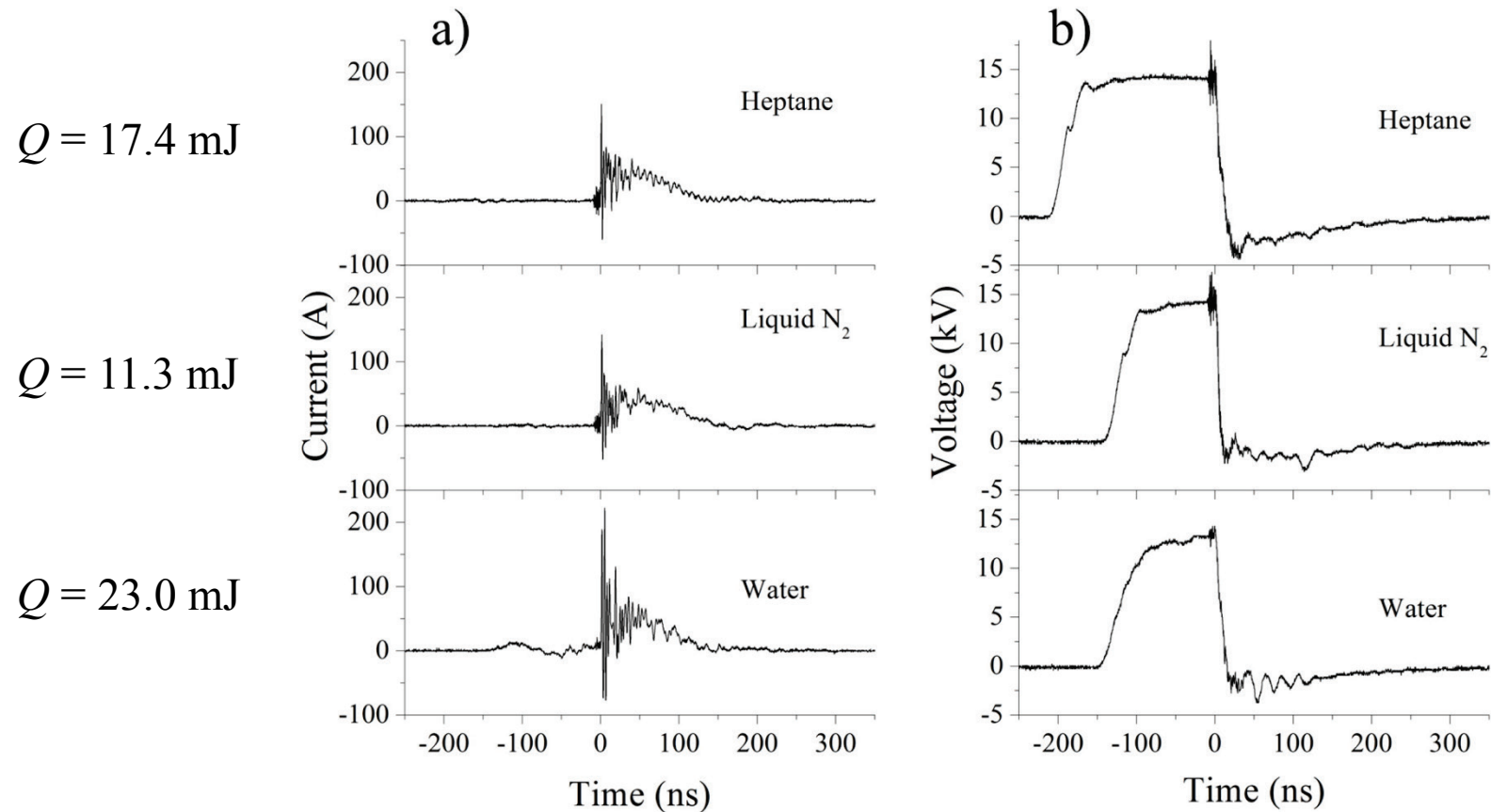
Pas de synthèse de nanodiamants car l'énergie déposée est trop faible (~10 kW contre 10 MW à 10 GW avec des laser femtosecondes)

Rendement élevé pour le carbone (~20 mg.J<sup>-1</sup>) mais plus faible pour le platine (~5% en masse)  
→ même avec un gap micrométrique, les mécanismes aux électrodes sont limités.

# Synthèse de nanoparticules

Etude comparative de la synthèse dans 3 liquides différents

Electrodes Aluminium  
Tension appliquée : + 15 kV



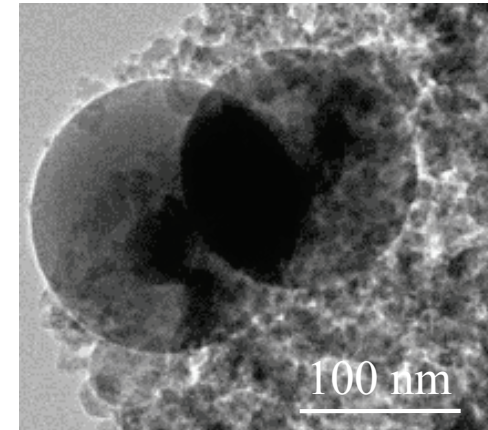
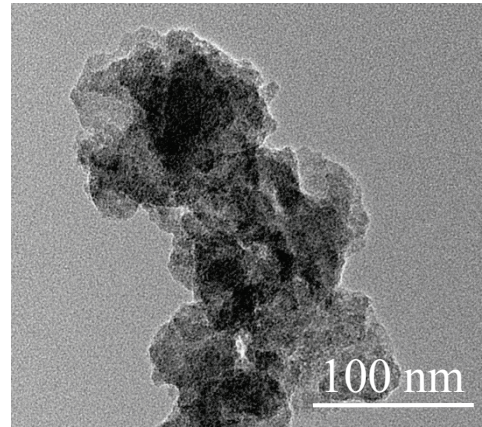
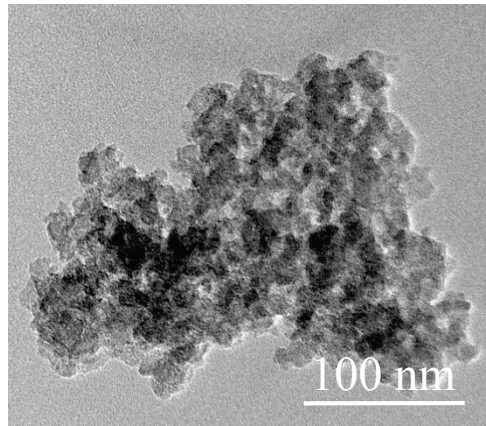
# Synthèse de nanoparticules

Etude comparative de la synthèse dans 3 liquides différents

Heptane

Liquid N<sub>2</sub>

H<sub>2</sub>O



Hydrogenated  
Amorphous Carbon  
NPs

+

Aluminium NPs →  
Amorphous Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>  
NPs

Aluminium NPs →  
Amorphous Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>  
NPs

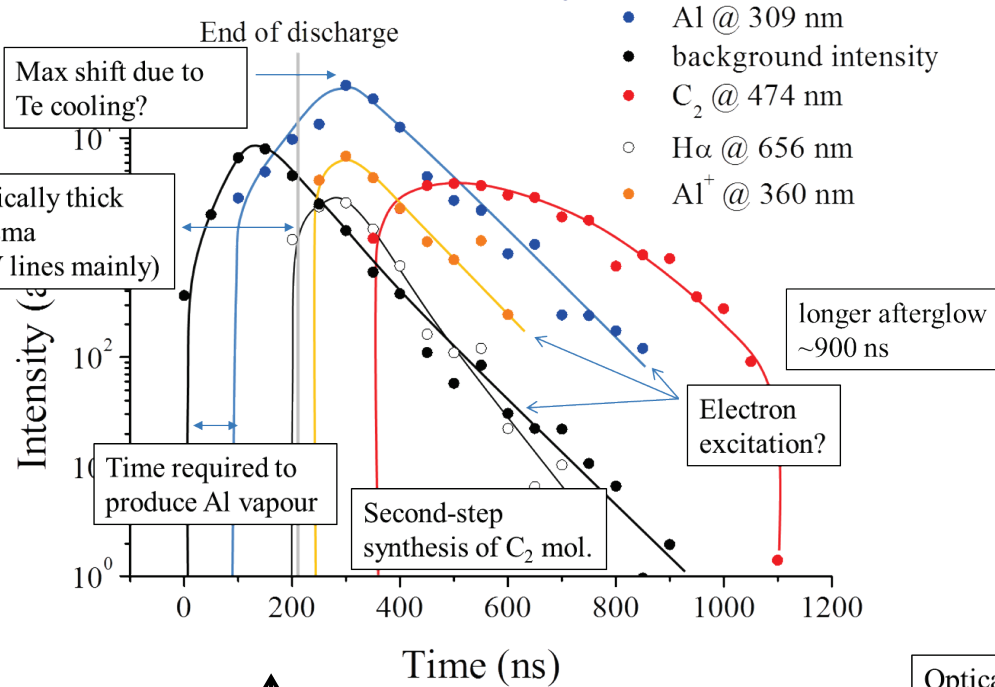
Large  
Amorphous Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>  
NPs

+

**SAME MECHANISM?**  
Amorphous Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>  
NPs

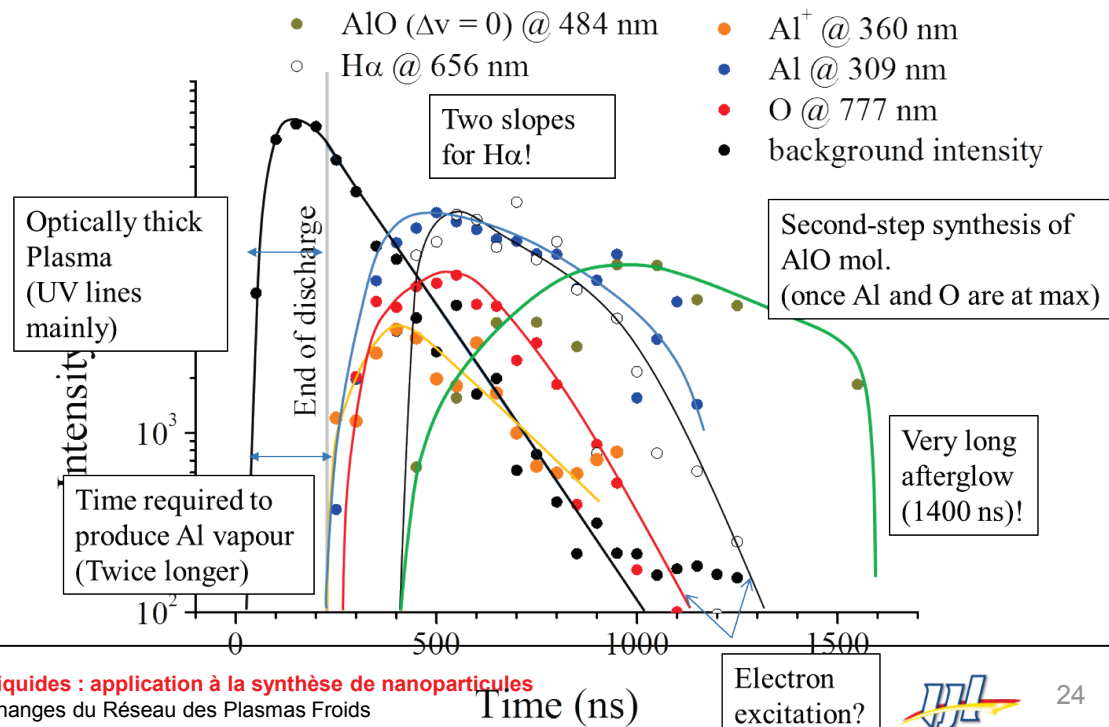
# Synthèse de nanoparticules

## Etude comparative de la synthèse dans 3 liquides différents



Heptane ↑

↓ H<sub>2</sub>O





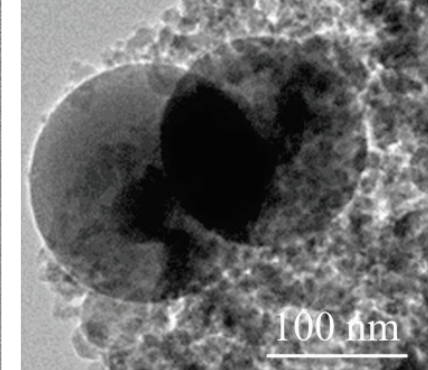
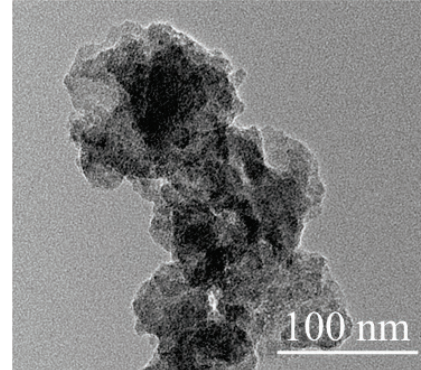
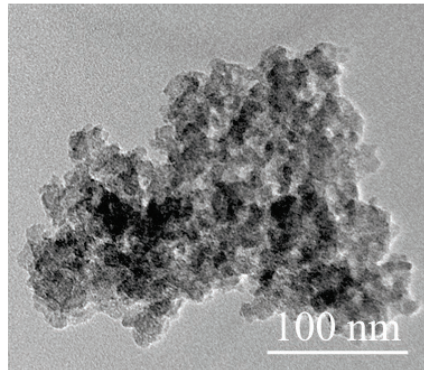
# Synthèse de nanoparticules

Etude comparative de la synthèse dans 3 liquides différents

Heptane

Liquid N<sub>2</sub>

H<sub>2</sub>O



3<sup>rd</sup> step

→ Amorphous  
Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> NPs

→ Amorphous  
Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> NPs

→ Amorphous  
Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> NPs

2<sup>nd</sup> step

Hydrogenated  
Amorphous Carbon  
NPs from C<sub>2</sub> species

Large  
Amorphous Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>  
NPs from AlO

1<sup>st</sup> step

Aluminium NPs

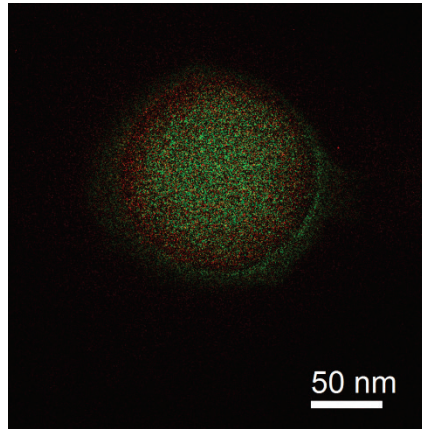
Aluminium NPs

Aluminium NPs →  
Amorphous Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>  
NPs

# Synthèse de nanoparticules

Synthèse de nanoparticules d'alliages métalliques : une histoire complexe

## Le système Cu-Zn



# Synthèse de nanoparticules

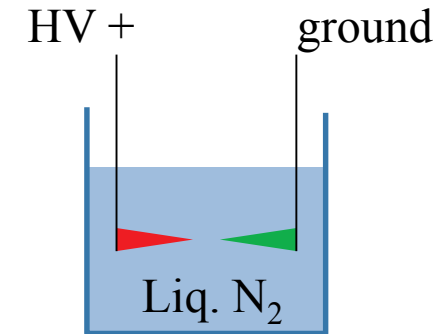
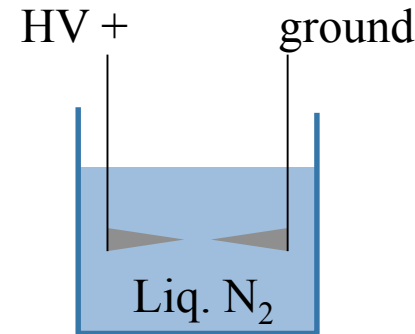
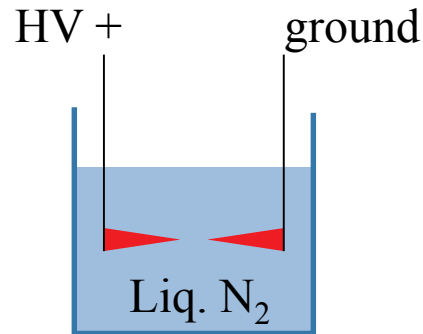
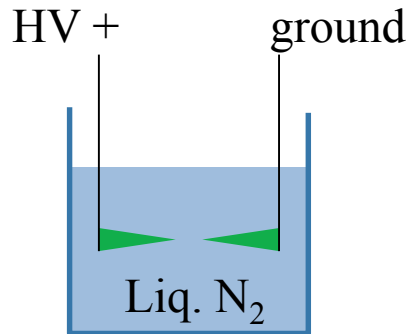
Synthèse de nanoparticules d'alliages métalliques : une histoire complexe

*Zn-Zn electrodes*

*Cu-Cu electrodes*

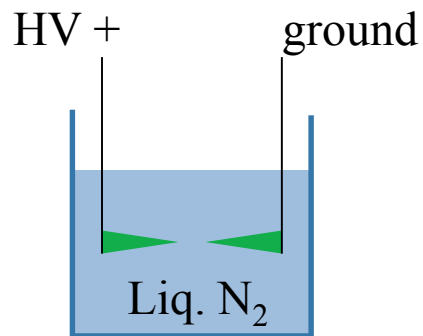
*CuZn alloy electrodes*

*Cu and Zn electrodes*

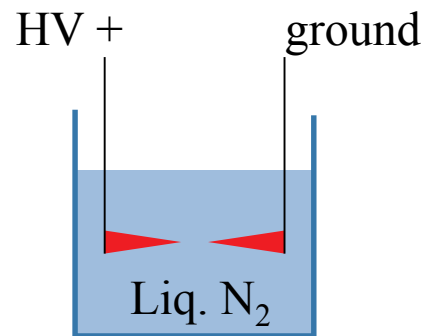
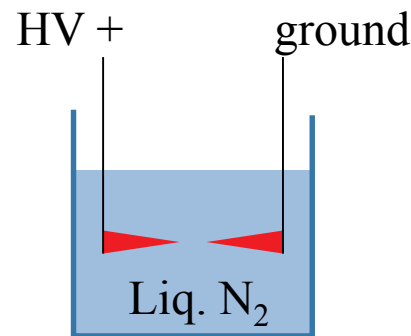


*Cu@Zn*

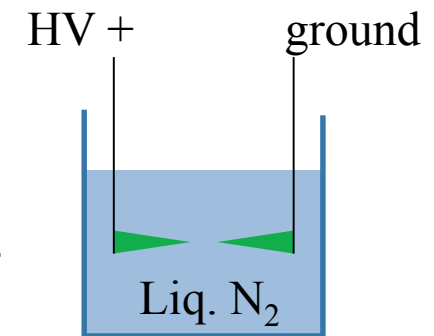
*Zn@Cu*



+



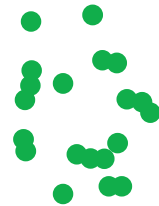
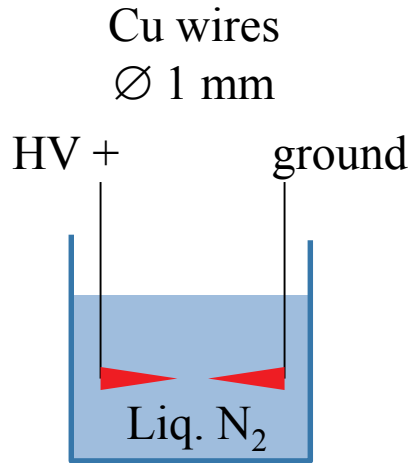
+



# Synthèse de nanoparticules

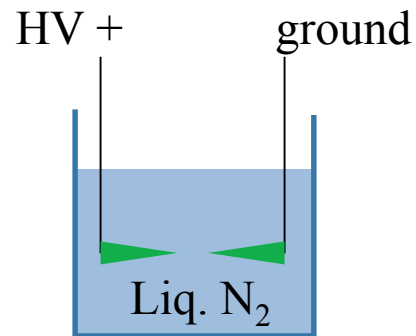
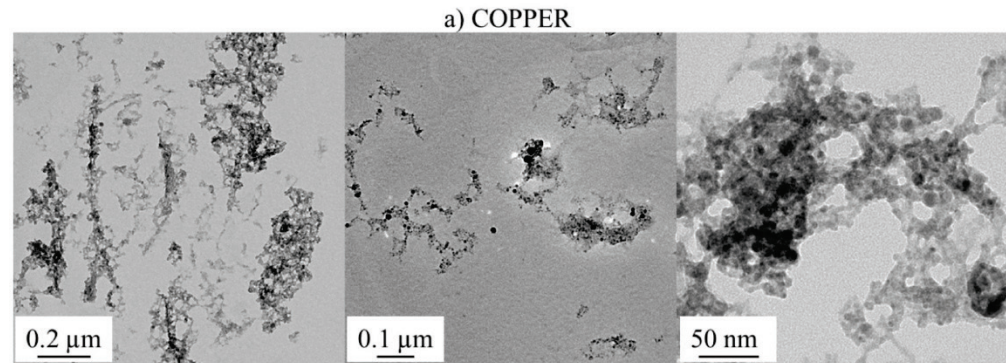
Synthèse de nanoparticules d'alliages métalliques : une histoire complexe

## Cu-Cu and Zn-Zn ELECTRODES



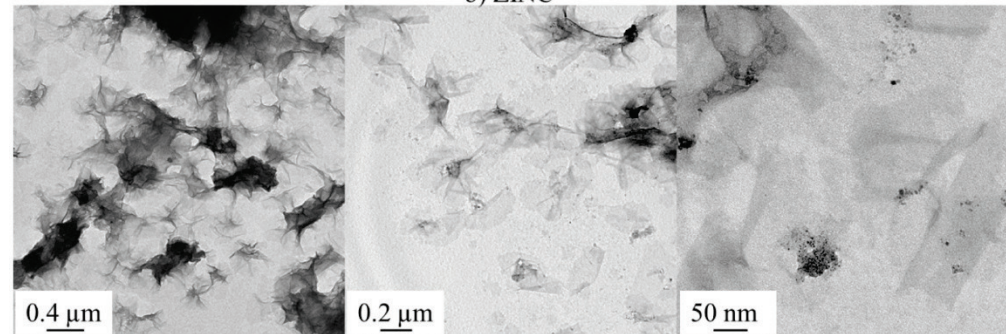
CuO

CuO nanodots



ZnO

b) ZINC

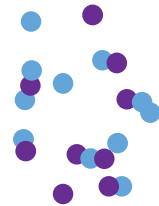
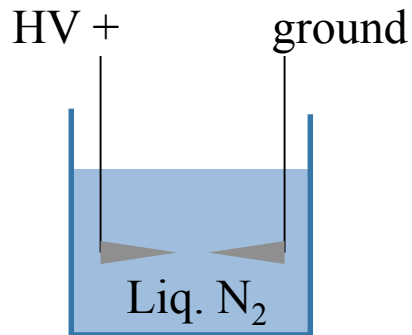


ZnO sheets

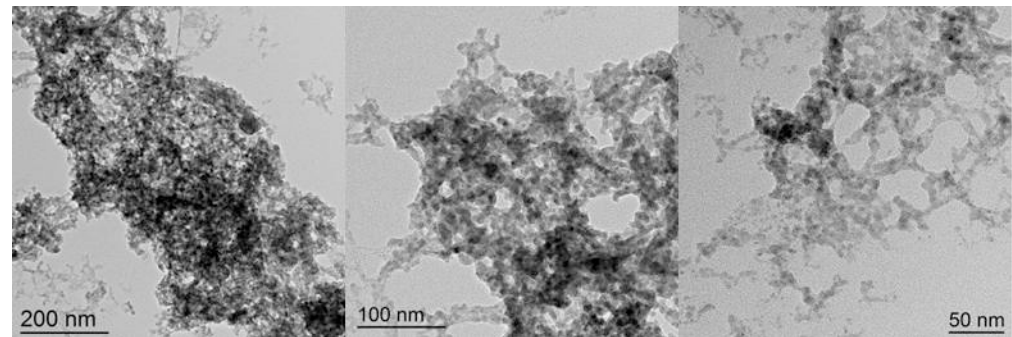
# Synthèse de nanoparticules

Synthèse de nanoparticules d'alliages métalliques : une histoire complexe

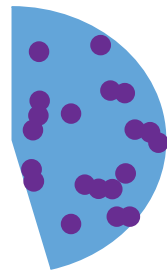
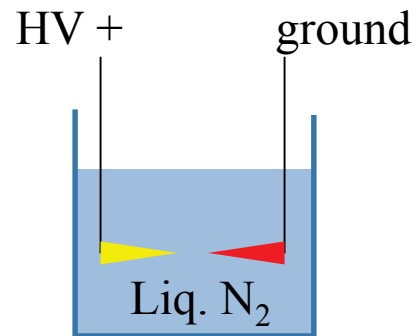
Cu<sub>63</sub>Zn<sub>37</sub> wires  
Ø 1 mm



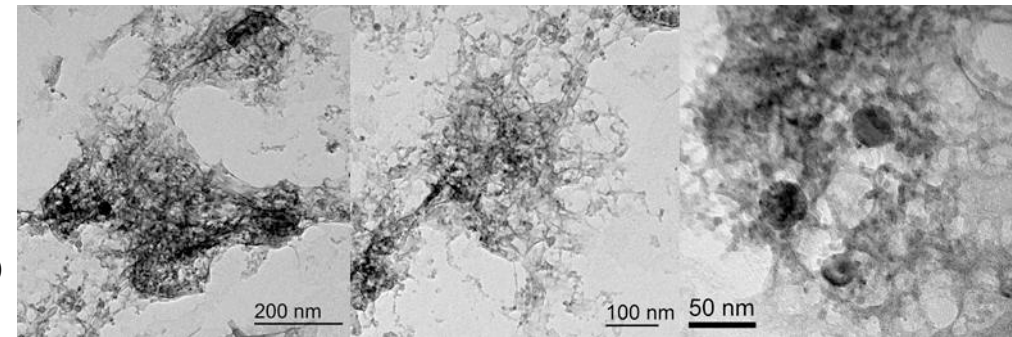
ZnO  
+  
Cu<sub>2</sub>O



ZnO + Cu<sub>2</sub>O  
nanodots



ZnO  
+  
Cu<sub>2</sub>O



ZnO sheets + Cu<sub>2</sub>O nanodots

Affects the growth of ZnO (sheets → nanodots)

Cu & Zn wires  
Ø 1 mm

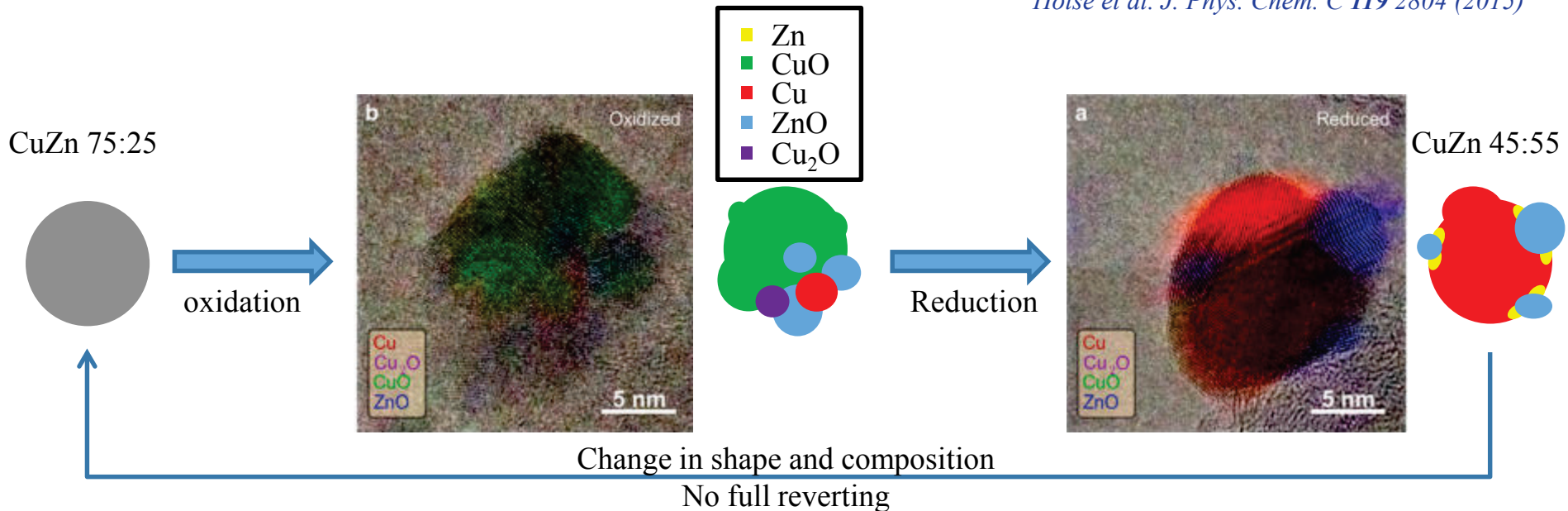
# Synthèse de nanoparticules

## Synthèse de nanoparticules d'alliages métalliques : une histoire complexe

Oxydation dans  $O_2$  : les clusters ZnCu ( $\varnothing < 10$  nm) se transforment en clusters polycristallins composés de nanocristaux séparés de CuO et ZnO.

CuO migre en surface du cluster et couvre partiellement ZnO

*Holse et al. J. Phys. Chem. C 119 2804 (2015)*



Après réduction dans  $H_2$ , le CuO est converti en Cu avec des nanocristaux de ZnO en surface.

Ensuite  $H_2$  se dissocie sur le Cu métallique et forme des atomes H qui réduisent partiellement ZnO pour former CuZn

# Synthèse de nanoparticules

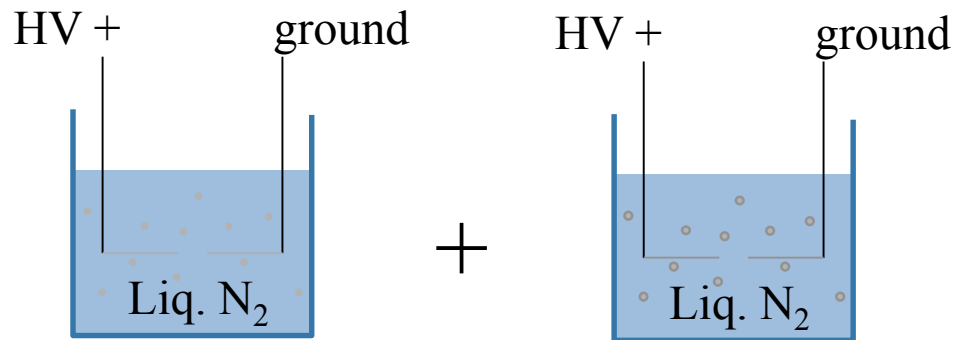
Synthèse de nanoparticules d'alliages métalliques : une histoire complexe

Deux explications possibles :

1°) NPs de  $\text{Cu}_{63}\text{Zn}_{37}$  NPs synthétisées dans  $\text{LN}_2$  puis oxydation à l'air en  $\text{Cu}_2\text{O}$  et  $\text{ZnO}$

2°) NPs de Zn et de Cu synthétisées dans  $\text{LN}_2$  puis oxydation à l'air en  $\text{Cu}_2\text{O}$  et  $\text{ZnO}$

Solution: synthèse de NPs de type core-shell  $\text{Cu}_{63}\text{Zn}_{37}@Zn$

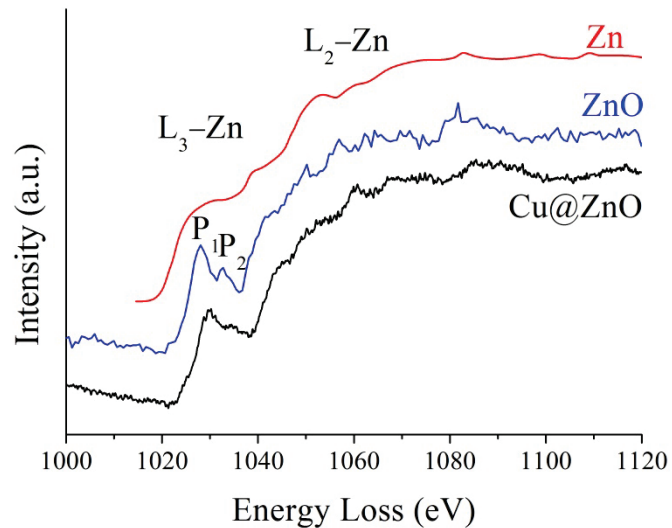
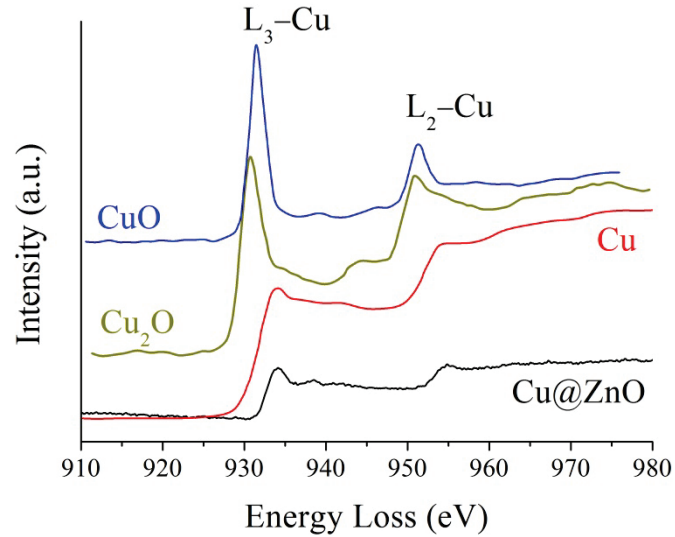


$\text{Cu}_{63}\text{Zn}_{37}$  electrodes  
1000 discharges

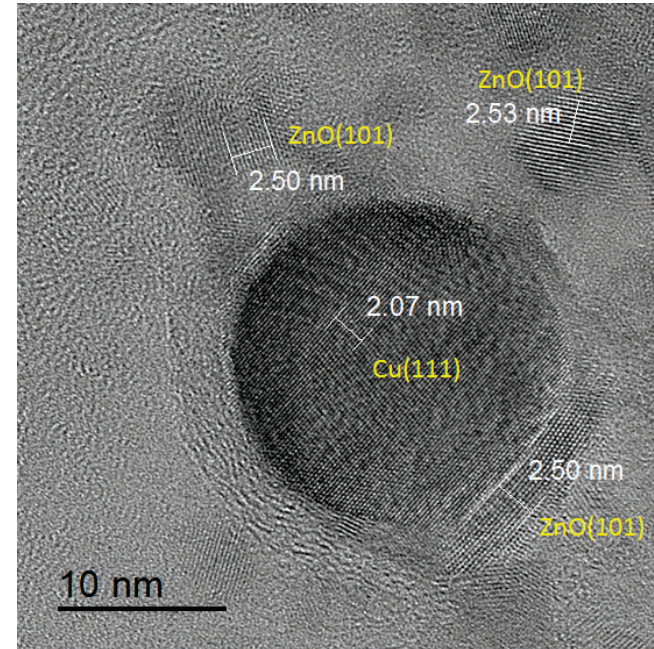
Zn electrodes  
1000 discharges

# Synthèse de nanoparticules

Synthèse de nanoparticules d'alliages métalliques : une histoire complexe



Cu@ZnO



Conclusion :

Avec des electrodes d'alliages Cu<sub>63</sub>Zn<sub>37</sub>  
→ évaporation de Zn and Cu

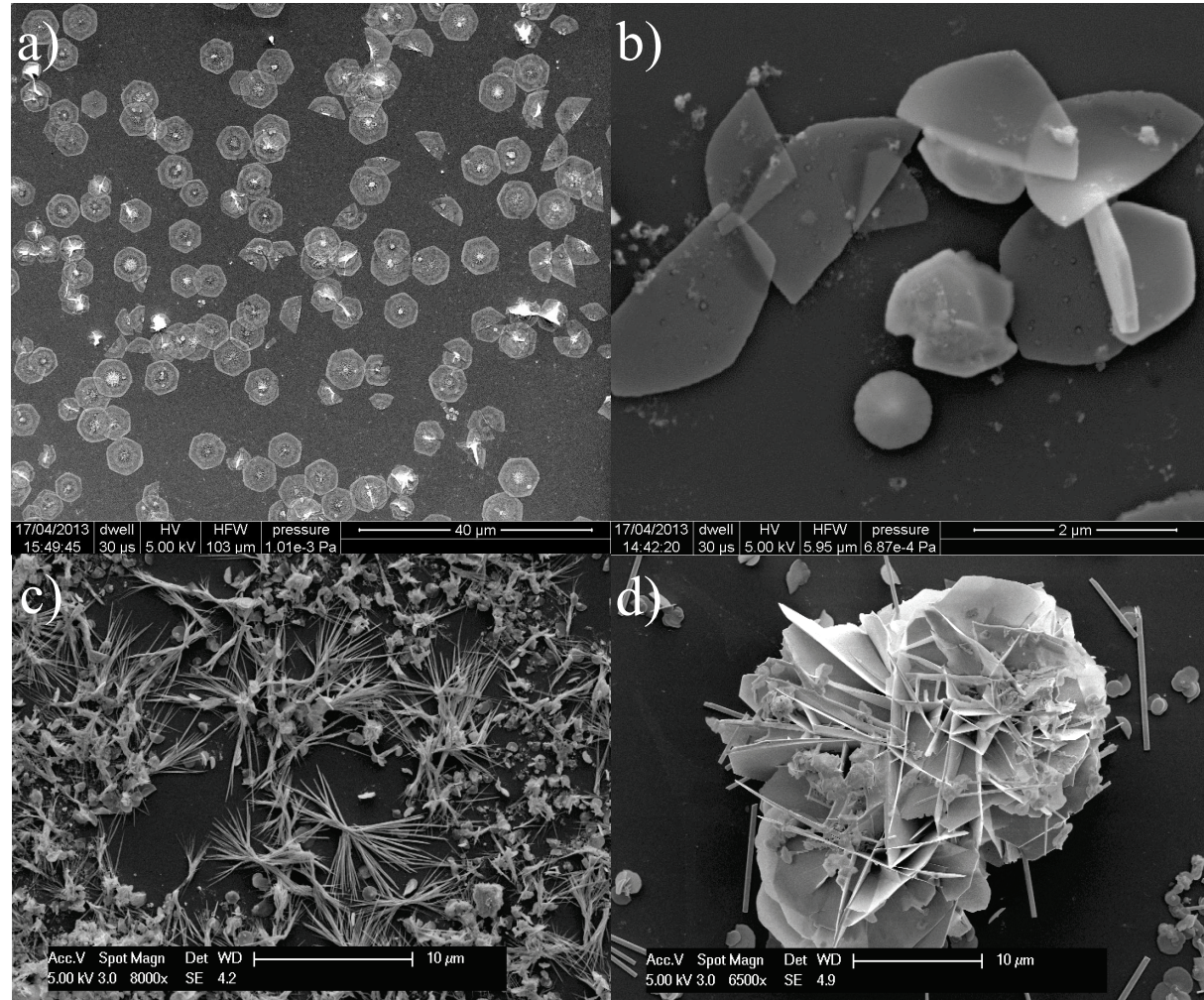


# Synthèse de nanoparticules

Synthèse de nanoparticules non sphériques

Nonoparticules de plomb dans LN<sub>2</sub>

From 0 to ~1000 discharges



Beyond 1000 discharges

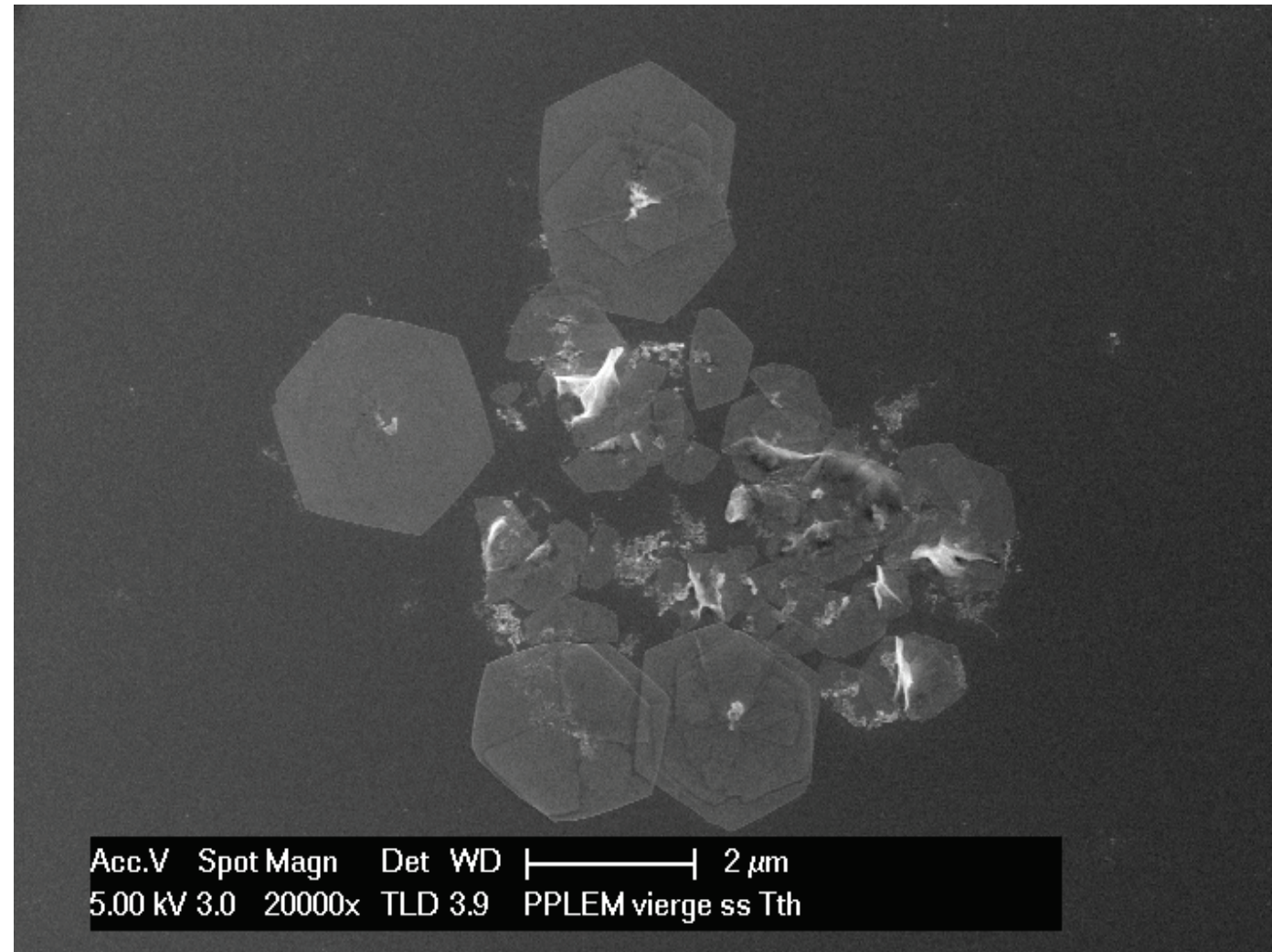
# Synthèse de nanoparticules

Nonoparticules de  
plomb dans LN<sub>2</sub>

Synthèse de nanoparticules non sphériques

From 0 to ~1000  
discharges

Beyond 1000  
discharges



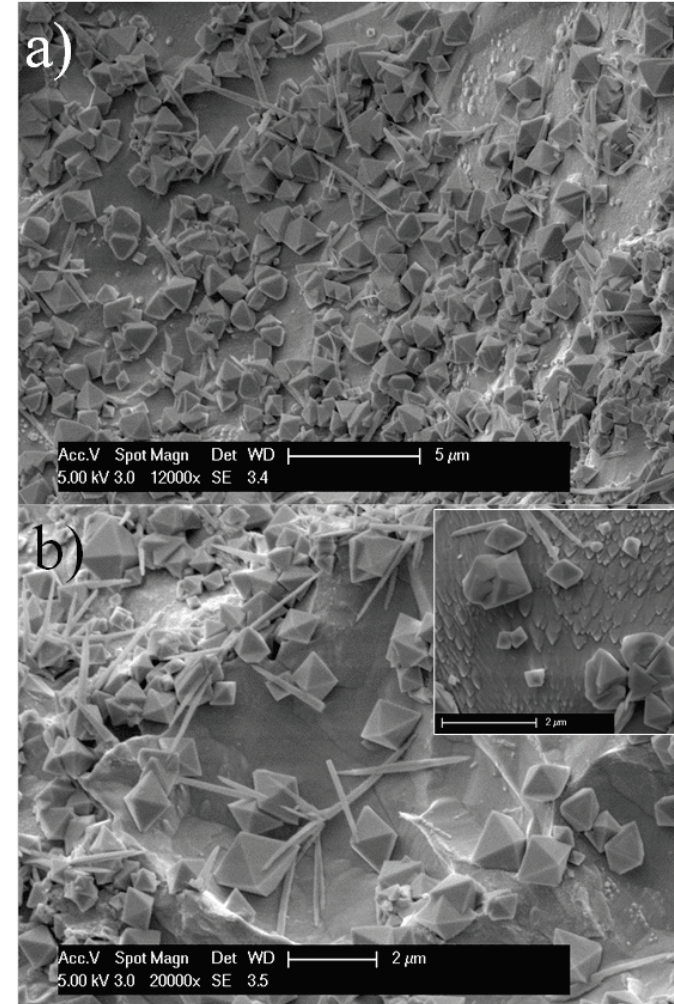
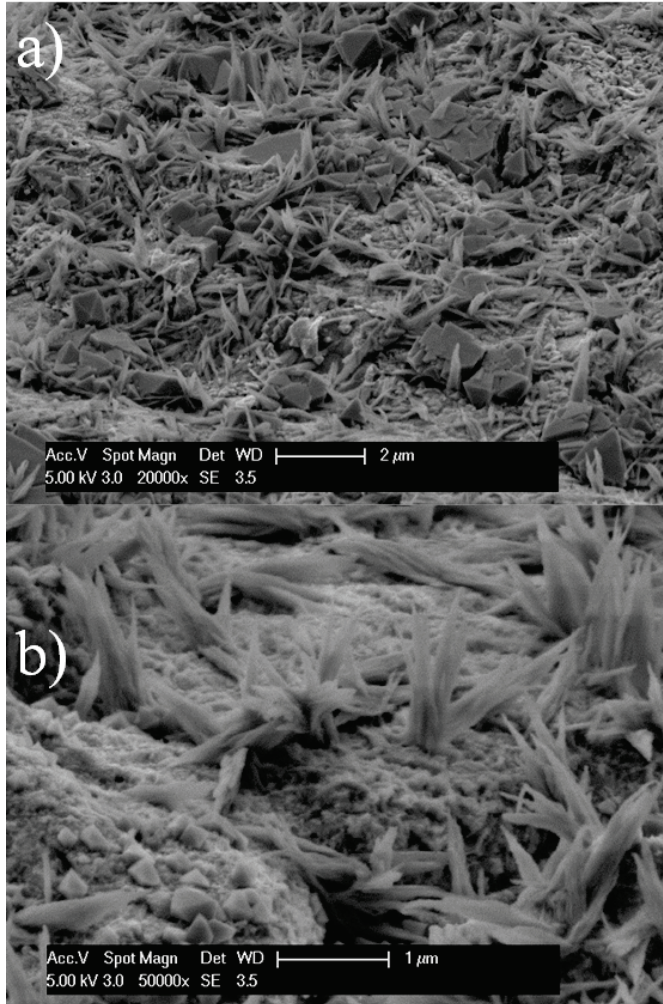
# Synthèse de nanoparticules

## Synthèse de nanoparticules non sphériques

Before 1000 discharges

Surface of electrodes

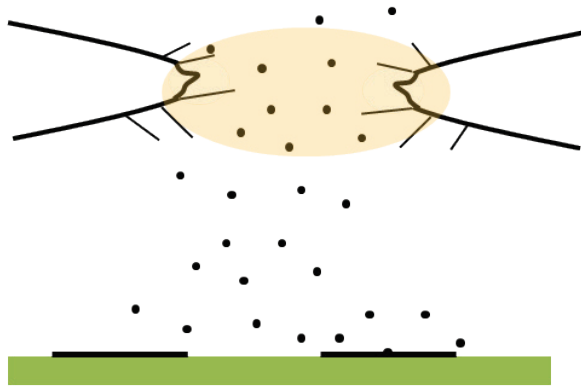
After 1000 discharges



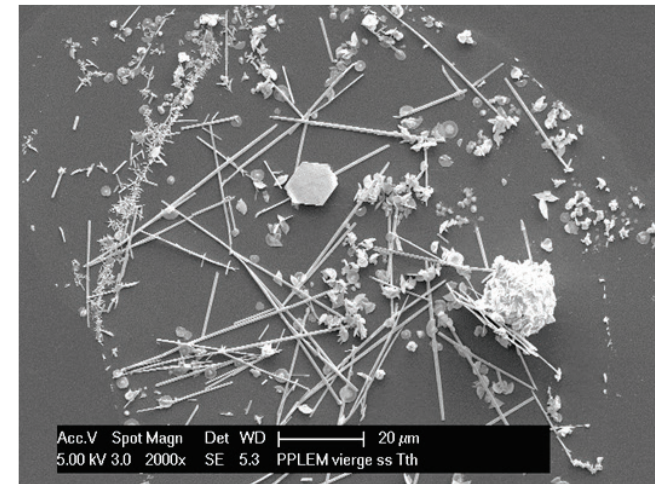
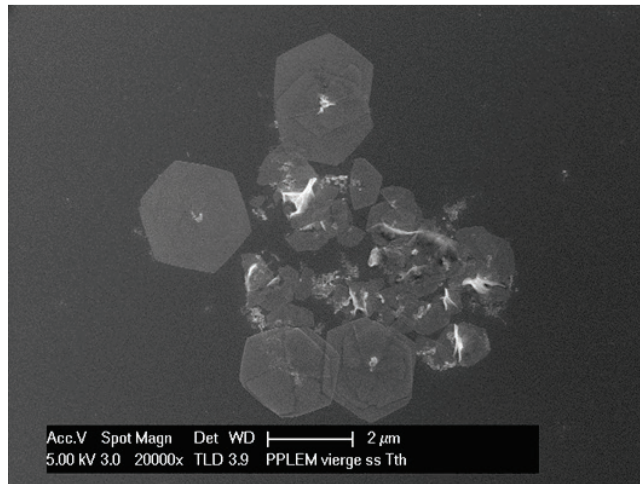
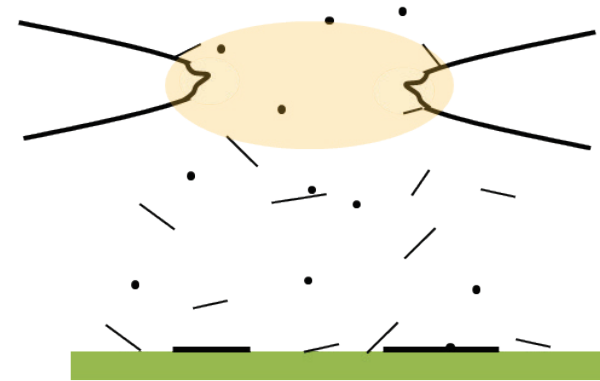
# Synthèse de nanoparticules

## Synthèse de nanoparticules non sphériques

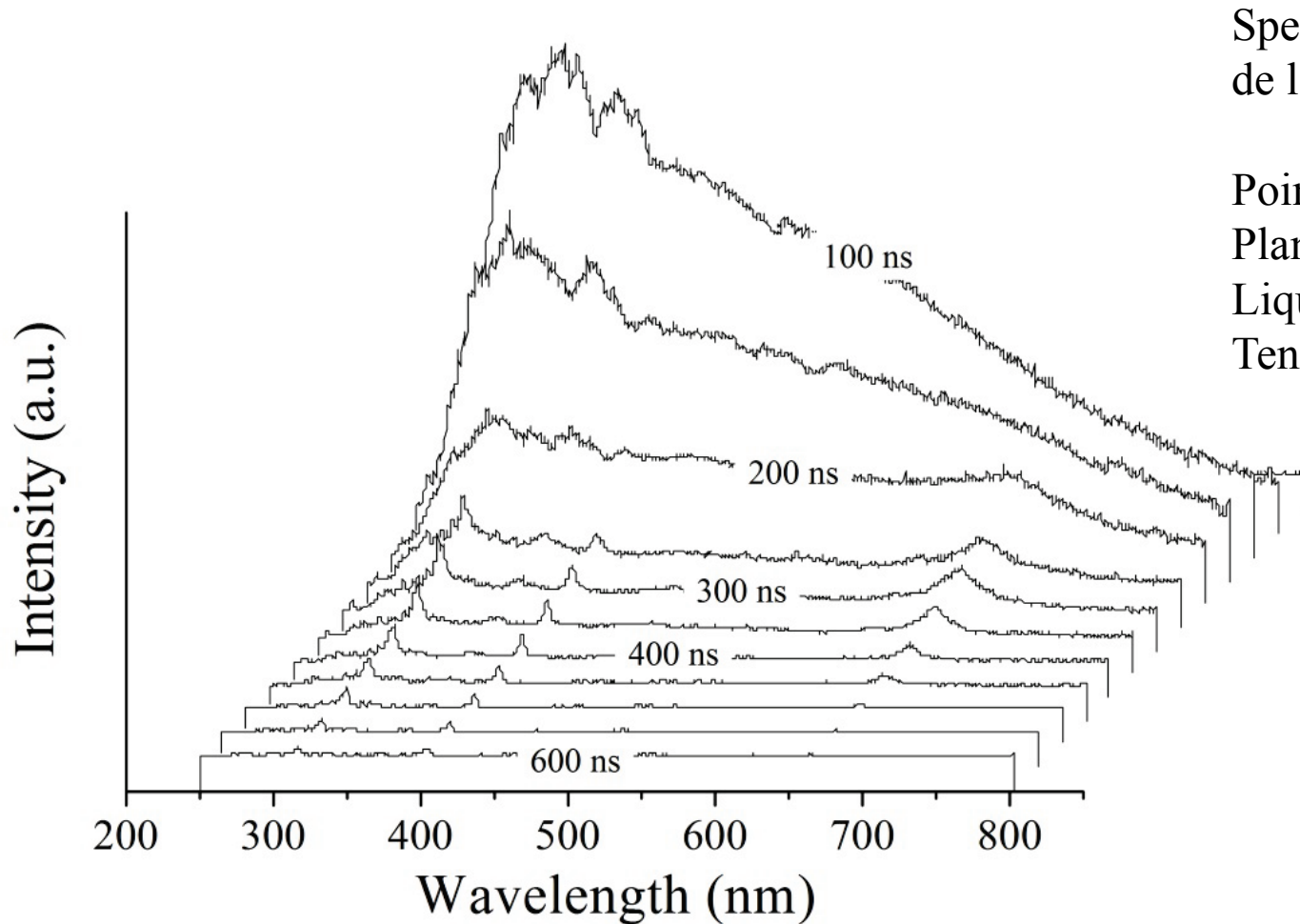
From 0 to ~1000 discharges



Beyond 1000 discharges



# Caractérisation des décharges



Spectre d'émission corrigé  
de la réponse spectrale

Pointe : Pt

Plan : Al

Liquide : Heptane

Tension : +15kV

# Caractérisation des décharges

- Black-body emission,

$$\varepsilon_p(x, \lambda) = \frac{8\pi hc}{\lambda^5} \frac{1}{\left[ \exp\left(\frac{hc}{\lambda k T_e(x)}\right) - 1 \right]} [W.m^{-3}] \quad (1)$$

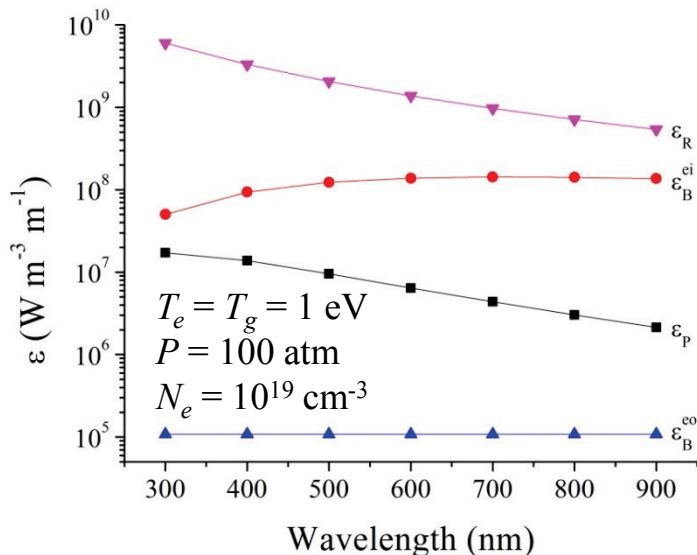
- Bremsstrahlung (electron-ion or electron-neutral) produces a free-free continuum (thus named because the electron remains free)

$$\varepsilon_B^{ei}(x, \lambda) = \frac{16\pi e^6}{3c^2 \sqrt{6\pi m_e^3 k}} \frac{n_e(x) n_i(x, T_e)}{\lambda^2 \sqrt{T_e}} z^2 G_Z(\lambda, T_e) \exp\left(-\frac{hc}{\lambda k T_e(x)}\right) \frac{1}{c(4\pi\epsilon_0)^3} [W.m^{-3}] \quad (2)$$

$$\varepsilon_B^{eo}(x, \lambda, T_e) = \frac{32e^3}{3c^3} \left(\frac{k}{2\pi m_e}\right)^{3/2} n_e(x) n_0 G_0(\lambda, T_e) T_e^{3/2}(x) \frac{1}{c(4\pi\epsilon_0)^3} [W.m^{-3}] \quad (3)$$

- Radiative recombination which produces a bound-free continuum.

$$\varepsilon_R(x, \lambda) = \frac{16\pi e^6}{3c^2 \sqrt{6\pi m_e^3 k}} \frac{n_e(x) n_i(x, T_e)}{\lambda^2 \sqrt{T_e}} z^2 \xi(\lambda, T_e) \left[ 1 - \exp\left(-\frac{hc}{\lambda k T_e}\right) \right] \frac{1}{c(4\pi\epsilon_0)^3} [W.m^{-3}] \quad (4)$$

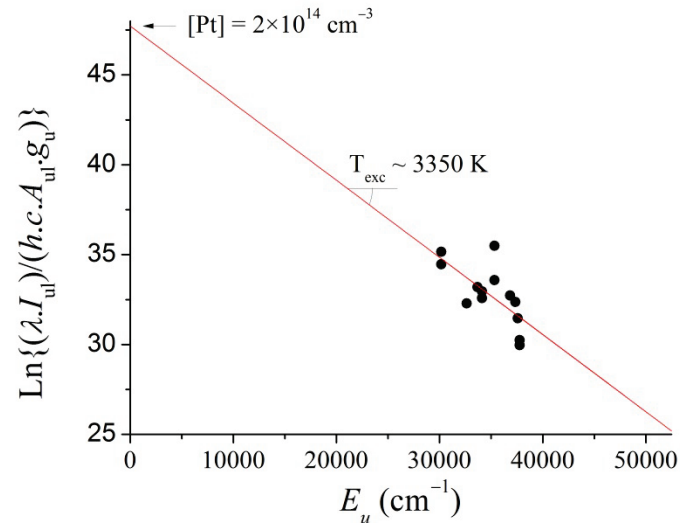
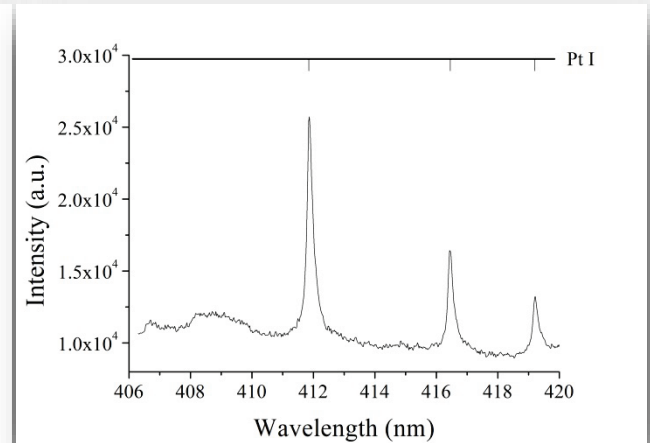
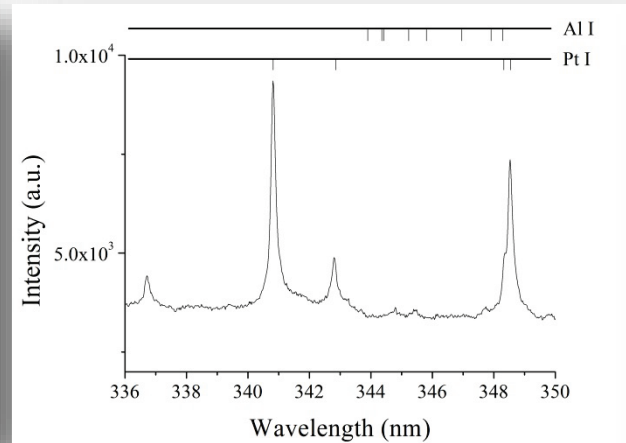
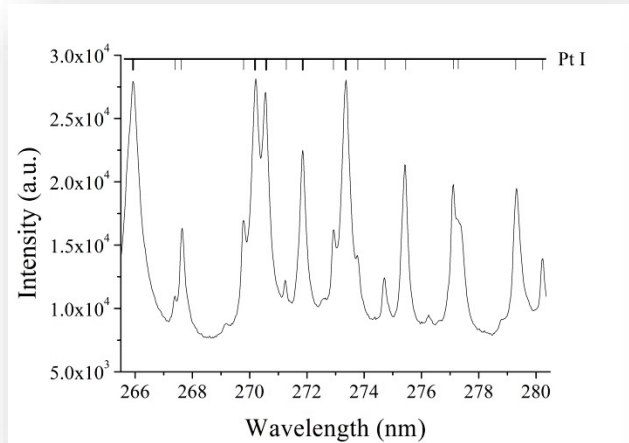


$\xi$  is the Biberman factor whereas  $G$  is the Gaunt factor ( $\xi \sim G \sim 1$ )

## 1) Background emission

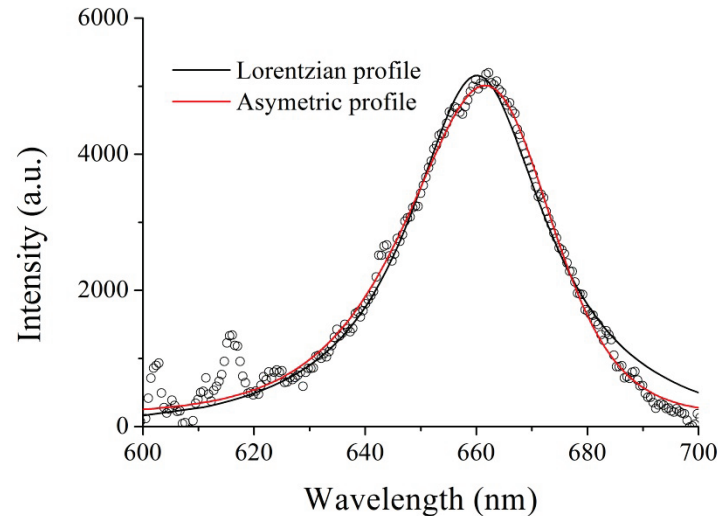
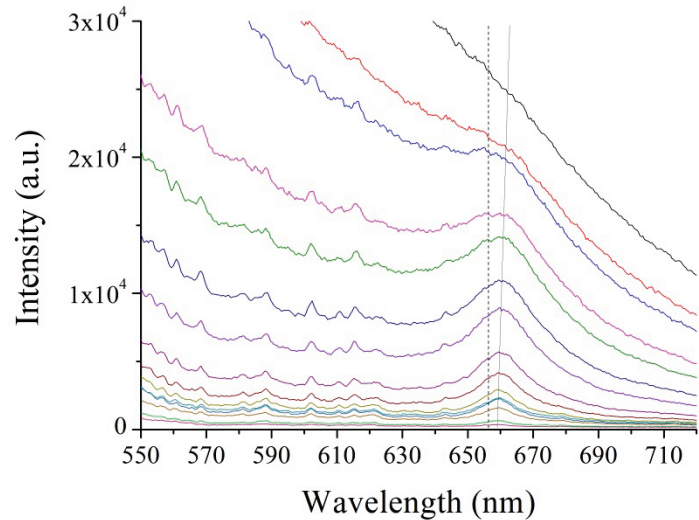
# Caractérisation des décharges

## 2) Transition lines



# Caractérisation des décharges

## 3) Broadening and shift sources



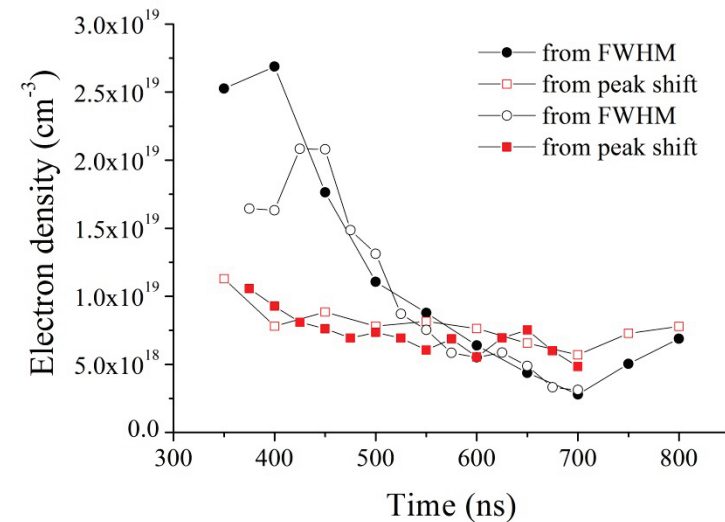
H $\alpha$  line (no H $\beta$ : LIE)

Weakly non-symmetric profile

Ne deduced from Descoedres

$$n_e [cm^{-3}] = 8.8308 \times 10^{16} (\Delta\lambda_w [nm])^{1.6005}$$

$$n_e [cm^{-3}] = 1.0 \times 10^{17} (1.3591 + 2.0757 \cdot \Delta\lambda_s [nm] + 0.0037 \cdot \Delta\lambda_s^2)$$

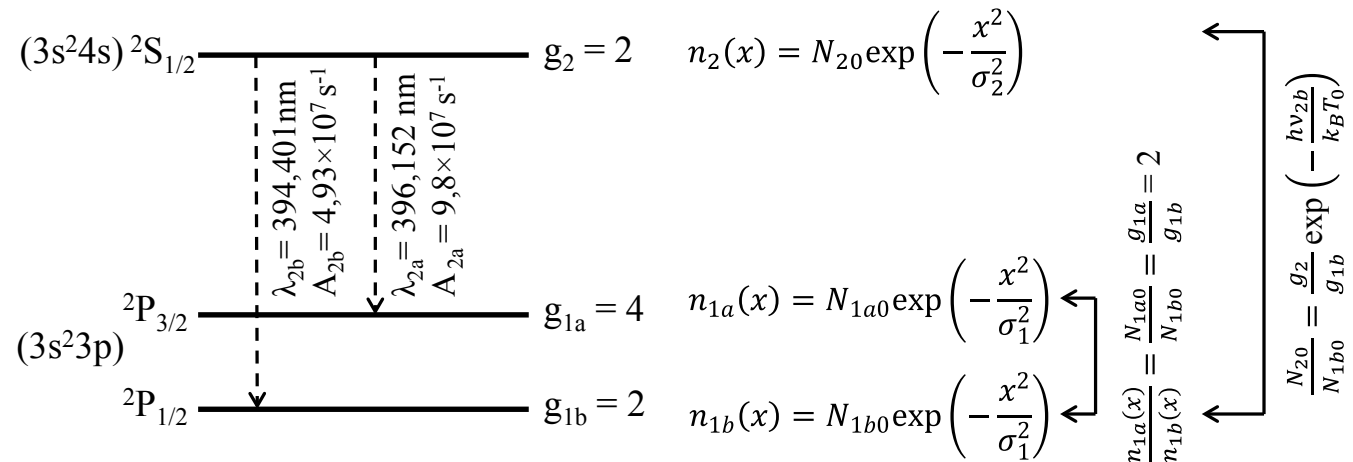




# Caractérisation des décharges

## 4) Self-reversal of emission line profile

(due to self-absorption in a concentration gradient)

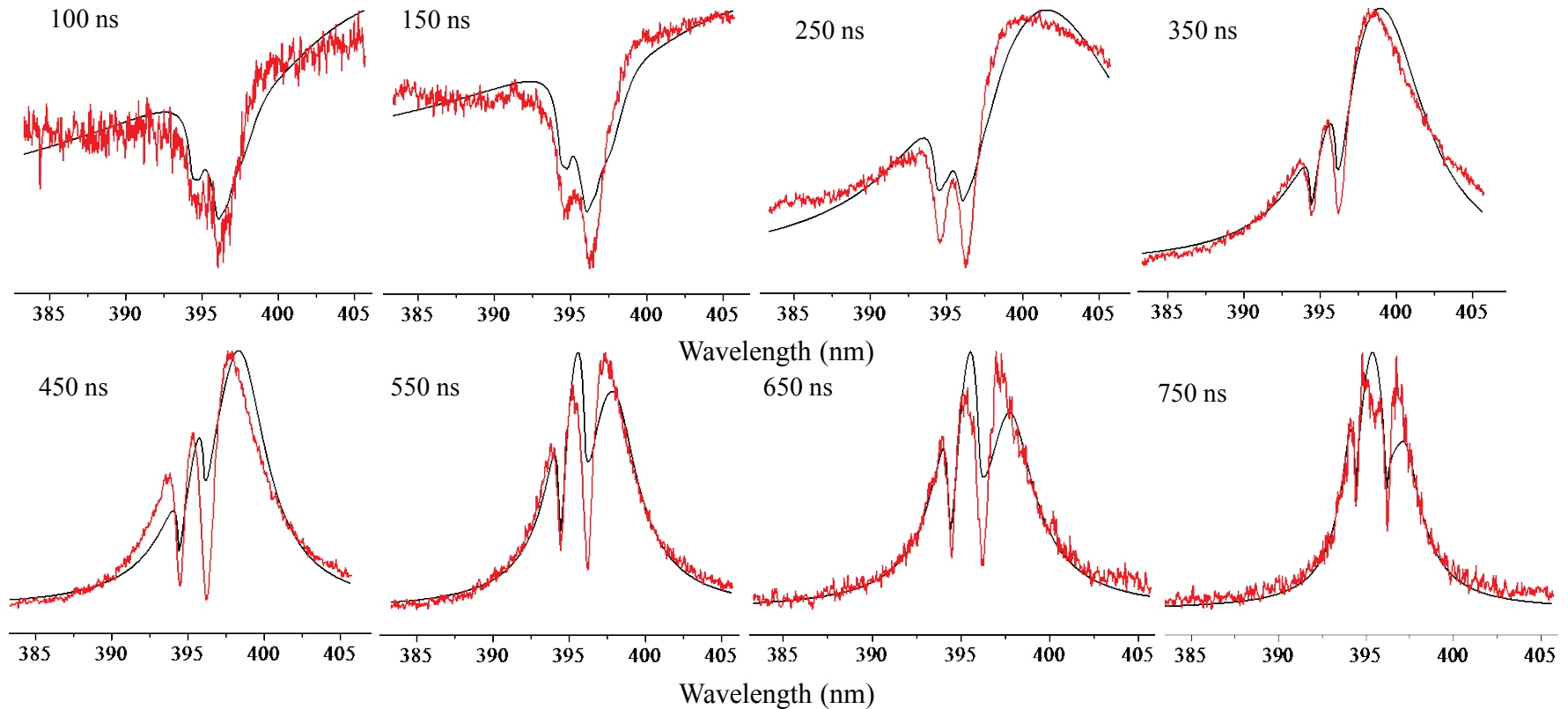


For a cylindrical plasma, the optical depth is defined as:

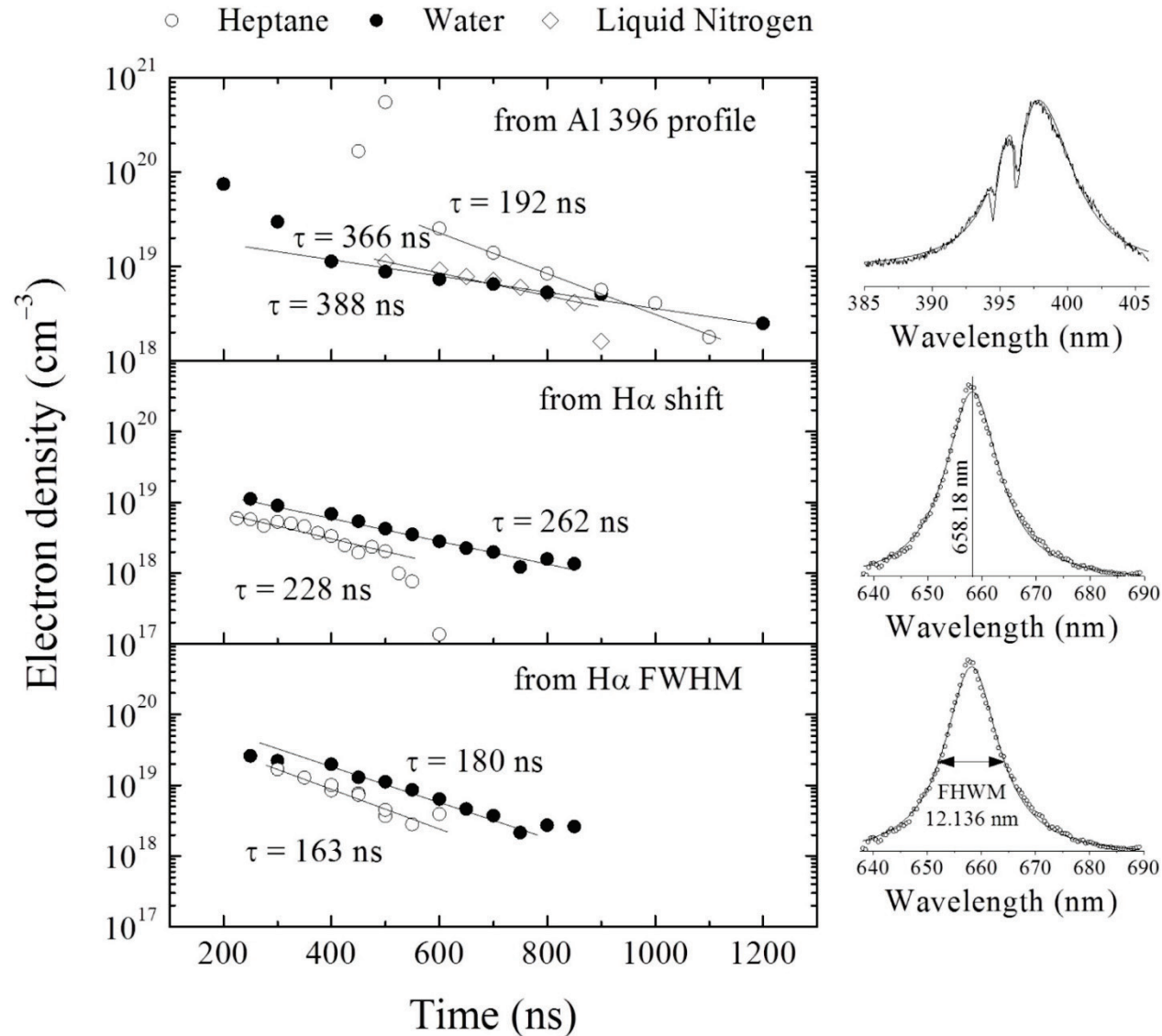
$$\tau \approx 2\pi \int_x^{r_p} \frac{c^2}{h\nu^3} \left[ \exp\left(\frac{h\nu}{k_B T}\right) - 1 \right] \frac{r}{\sqrt{r^2 - x^2}} \epsilon \, dr$$

It must be doubled if a mirror is used to double the optical path

# Caractérisation des décharges

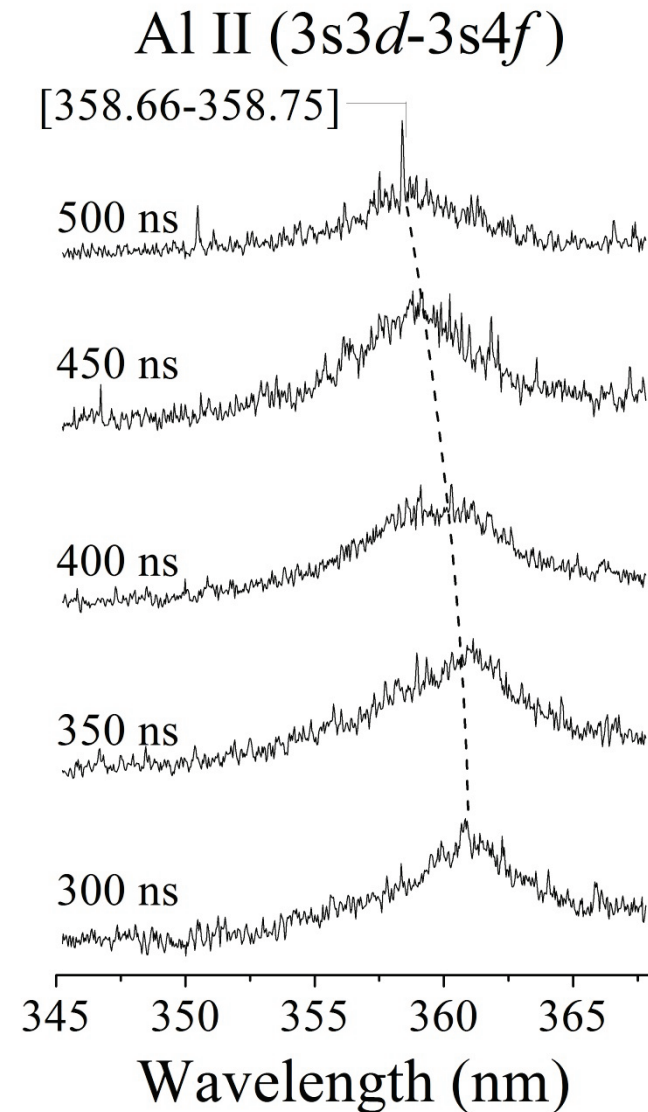
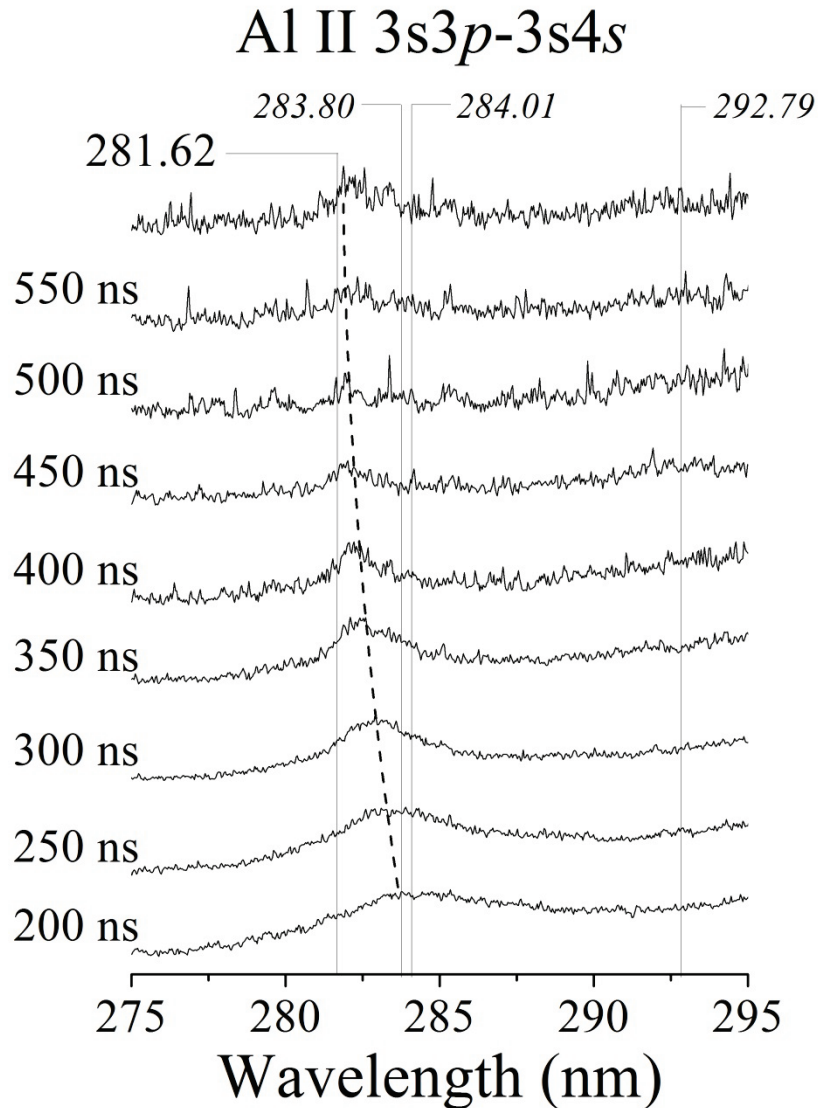


# Caractérisation des décharges



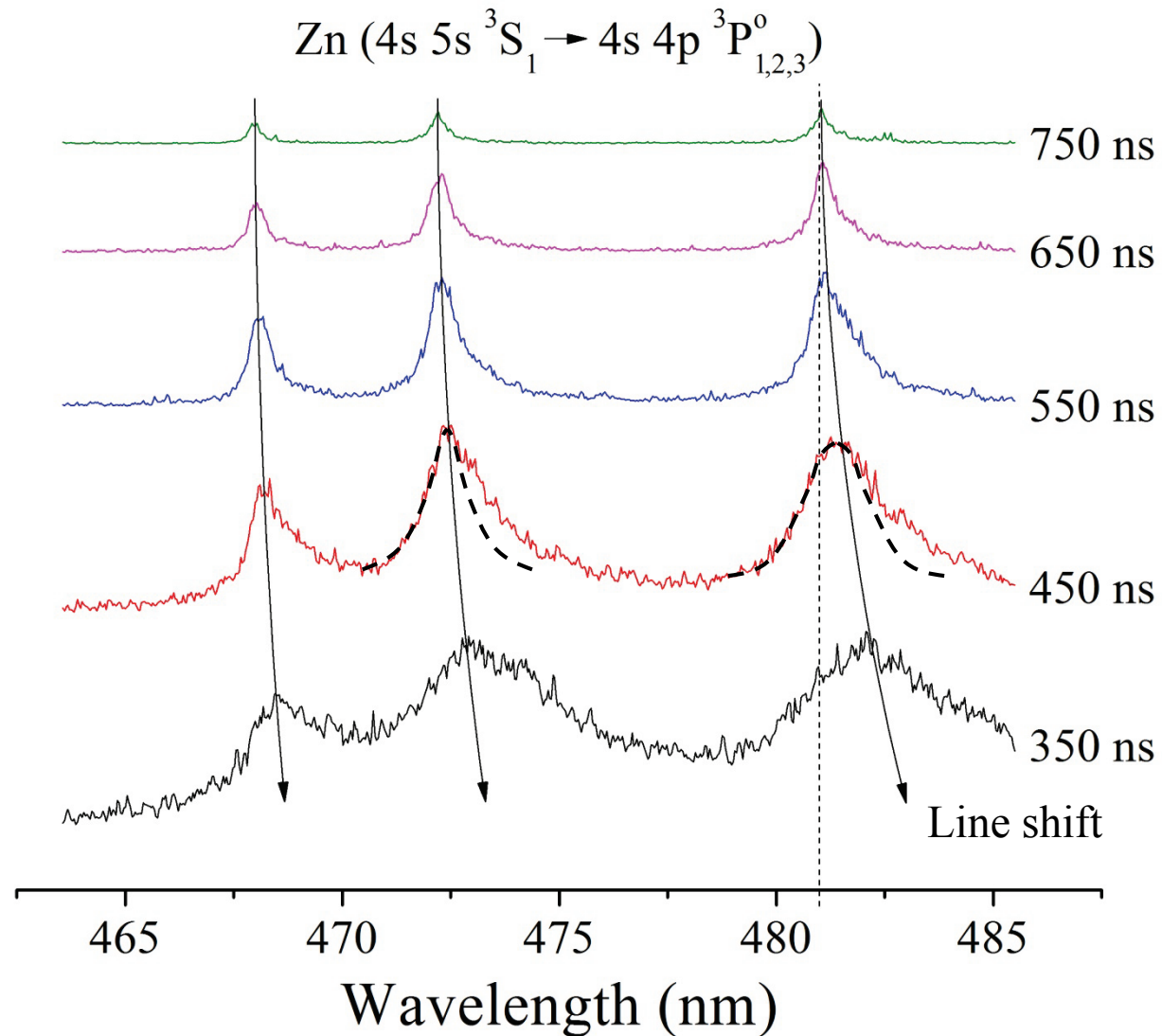
# Caractérisation des décharges

Emission lines can be strongly shifted



# Caractérisation des décharges

Emission lines are not always symmetric



# Conclusion

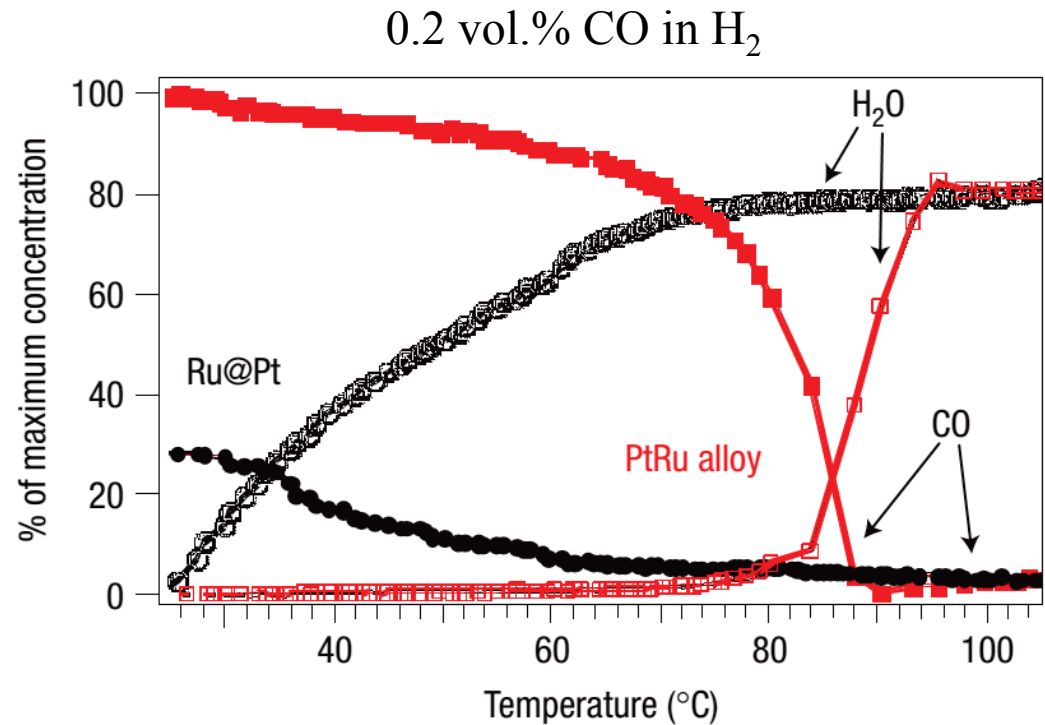
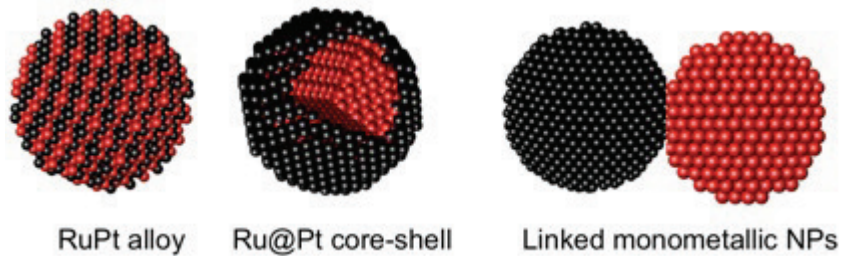
- Solide, liquide, gaz, plasma : les 4 états de la matière dans un même dispositif
- Une physique fascinante pour une science des matériaux innovante
- Technique « low cost » mais avec un contrôle difficile du procédé
- Synthèse d'une grande variété de nanomatériaux :
  - Metalliques*
  - Céramiques*
  - Biméalliques*
  - Jonction*
  - Alliages*
  - Core-shell*
  - Janus ? (en cours ...)*



**Merci !**

# Introduction

- Effet catalytique RuPt NPs conversion de CO dans H<sub>2</sub>



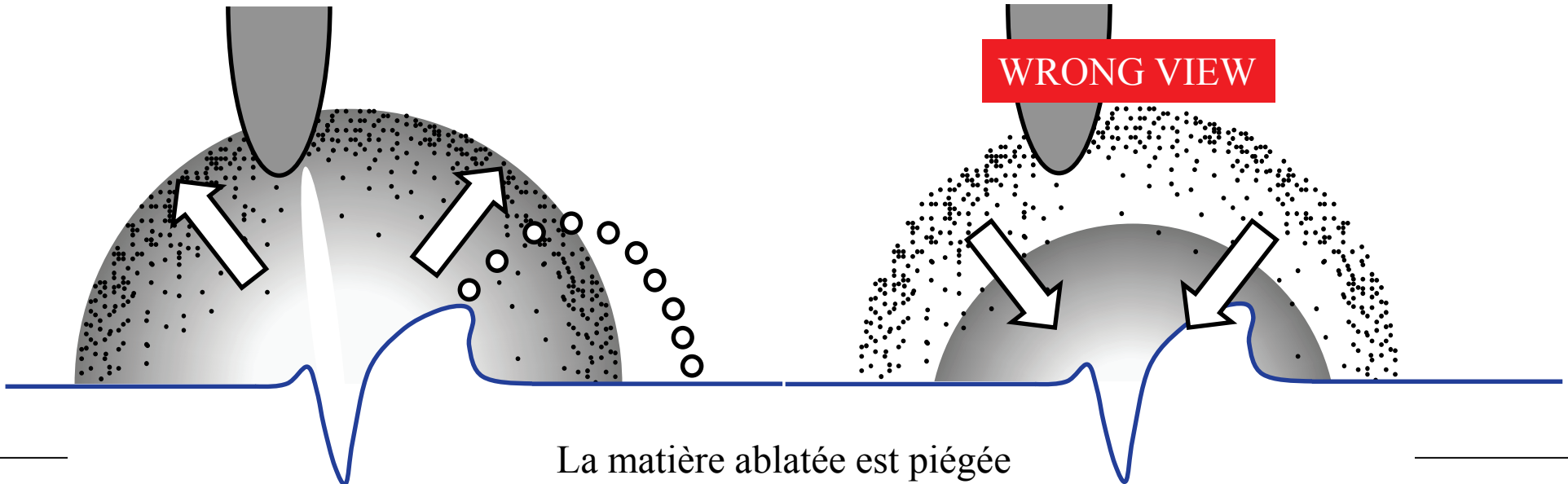
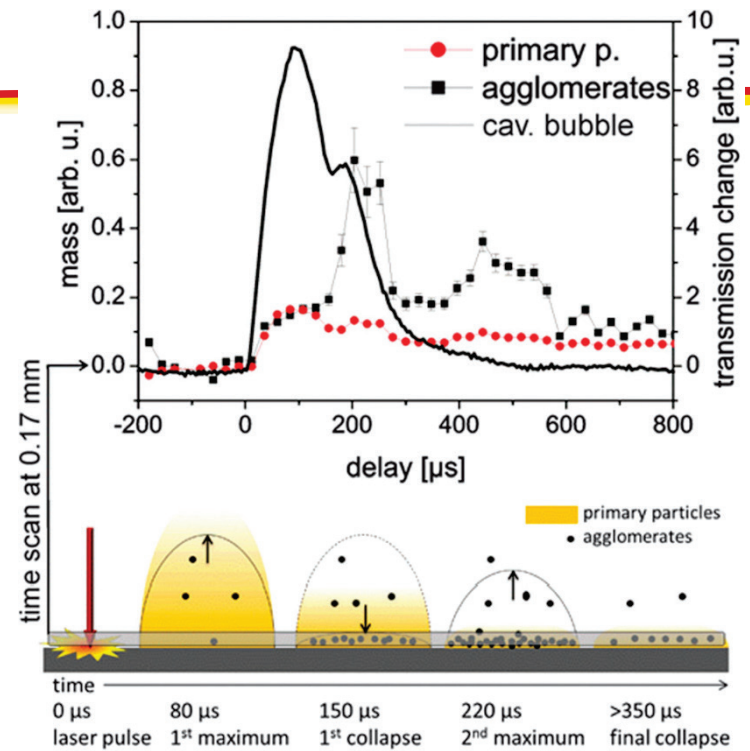
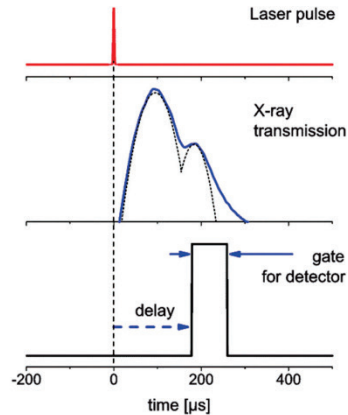
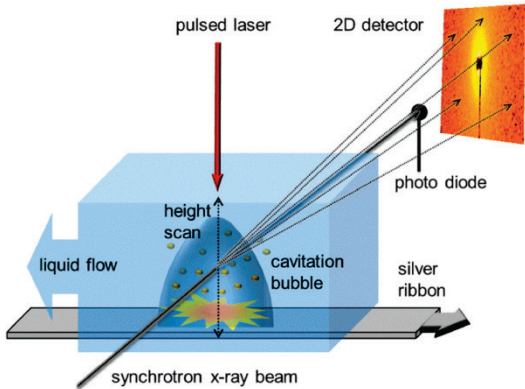
*Alayoglu et al. Nature Materials 7 333 (2008)*



# Synthèse de nanoparticules

## Mesures synchrotron

Wagener *et al.* 2013 *Phys. Chem. Chem. Phys.* **15** 3068



La matière ablatée est piégée  
au sein de la bulle

# Synthèse de nanoparticules

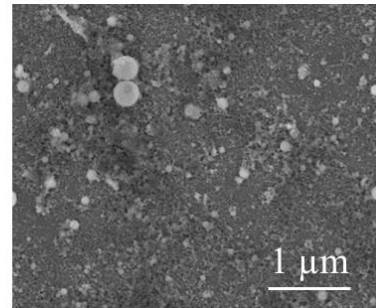
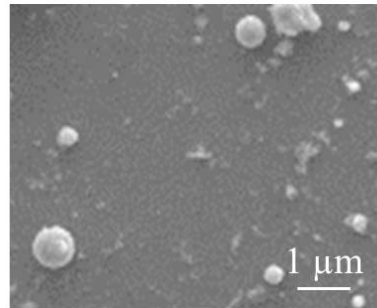
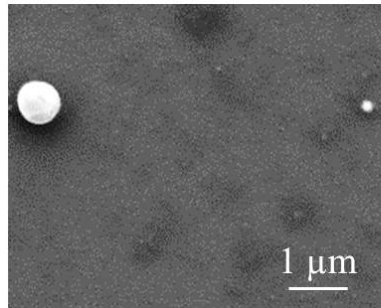
Etude comparative de la synthèse dans 3 liquides différents

Heptane

Liquid N<sub>2</sub>

H<sub>2</sub>O

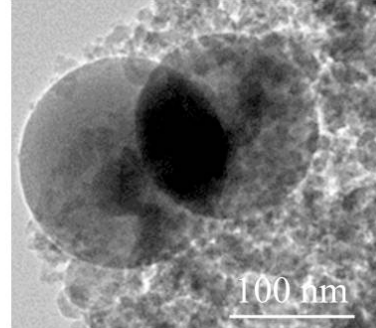
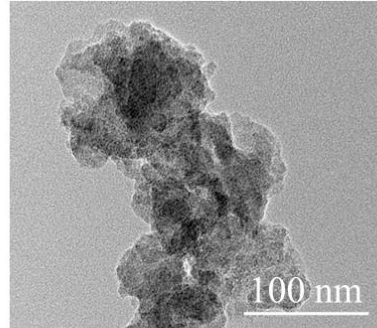
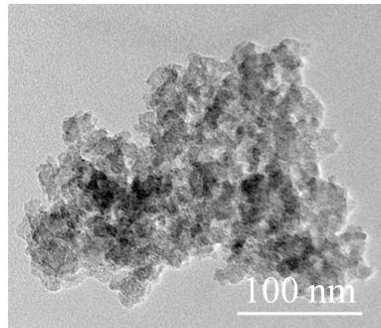
SEM



NPs Al synthétisées dans LN<sub>2</sub> et heptane

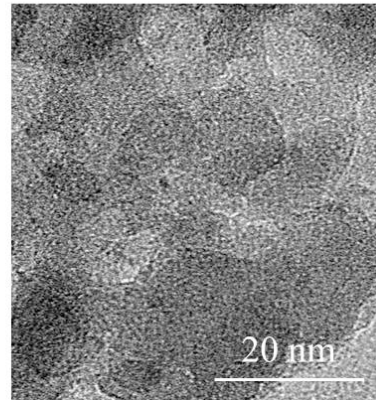
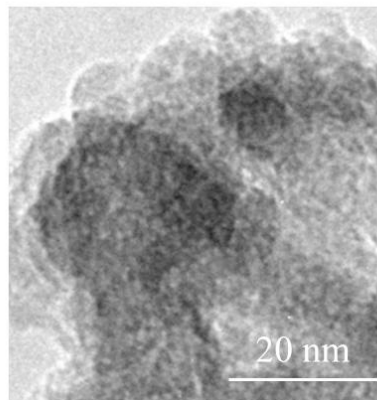
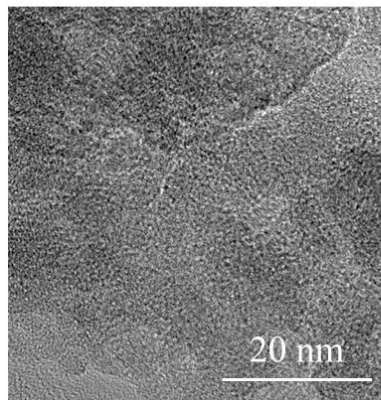
HAC NPs sont également formées dans l'heptane

TEM



NPs d'oxyde d'aluminium formées dans l'eau

TEM



Les NPs métalliques s'oxydent à l'air après évaporation du liquide avant les analyses