

# **Exposition d'ADN plasmidique aux électrons de basse énergie et aux rayons X ultra-mous : dernières innovations techniques.**

Michel FROMM

*UMR CNRS 6249 Chrono-Environnement - Université de Bourgogne Franche-Comté, Besançon, France.*

Cet exposé reprend l'article :

***Low energy electrons and ultra-soft X-rays irradiation of plasmid DNA. Technical innovations***

*Par: Michel Fromm et Omar Boulanouar*

*Radiation Physics and Chemistry 128 (2016) 44–53*

***In "Radiation Physics and Chemistry of Biomolecules. Recent developments"***

*Edited by Melanie Spothem-Maurizot*

## **Plan de l'exposé:**

### **I.- Introduction**

I.1.- Electrons de basse énergie (EBE)

I.2.- Rayons X ultra-mous

I.3.- Technique de relaxation de plasmide (Gel d'électrophorèse sur agarose)

### **II.- Résultats**

II.1.- EBE et couches ultrafines d'ADN

II.1.1.- Fabrication des couches

II.1.2.- Epaisseur des couches

II.1.3- Exposition aux EBE dans l'hyper-vide

II.1.4.- Exposition des dépôts aux EBE dans l'air

II.2.- Rayons X ultra-mous et ADN plasmidique en solution

### **III.- Conclusions et perspectives**

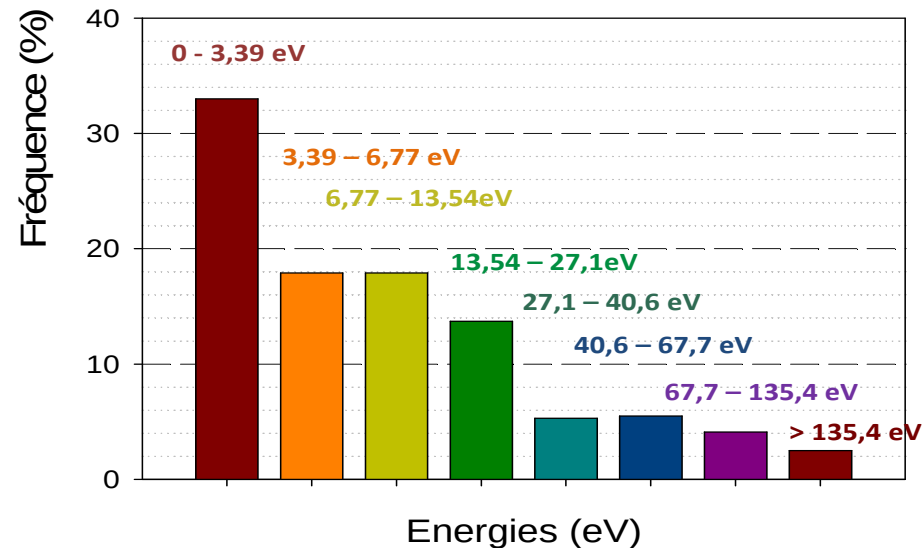
# I.- Introduction

## I.1.- Electrons de basse énergie (EBE)

Tabelle 31. Geschwindigkeitsverteilung der Sekundärelektronen  
(Anzahl der Elektronen bestimmter Geschwindigkeit in Prozent der Gesamtzahl der Sekundärelektronen).

| Energie des Sekundärelektrons |              | Energie des Primärelektrons in Volt |       |        |                 |                 |                  |
|-------------------------------|--------------|-------------------------------------|-------|--------|-----------------|-----------------|------------------|
| in Rydberg                    | in Volt      | 1000                                | 10000 | 100000 | 10 <sup>6</sup> | 10 <sup>8</sup> | 10 <sup>10</sup> |
| 0 bis 1/4                     | 0 bis 3,39   | 33,0                                | 35,4  | 37,3   | 38,9            | 41,4            | 42,7             |
| 1/4 „ 1/2                     | 3,39 „ 6,77  | 17,9                                | 18,5  | 19,0   | 19,5            | 20,3            | 20,7             |
| 1/2 „ 1                       | 6,77 „ 13,54 | 17,9                                | 17,7  | 17,7   | 17,7            | 17,8            | 17,9             |
| 1 „ 2                         | 13,54 „ 27,1 | 13,7                                | 12,7  | 12,2   | 11,7            | 11,0            | 10,6             |
| 2 „ 3                         | 27,1 „ 40,6  | 5,3                                 | 4,7   | 4,3    | 4,0             | 3,5             | 3,2              |
| 3 „ 5                         | 40,6 „ 67,7  | 5,5                                 | 4,6   | 4,0    | 3,5             | 2,7             | 2,3              |
| 5 „ 10                        | 67,7 „ 135,4 | 4,1                                 | 2,3   | 3,1    | 2,5             | 1,8             | 1,4              |
| über 10                       | über 135,4   | 2,5                                 | 3,1   | 2,6    | 2,2             | 1,4             | 1,1              |

Distribution en énergie des électrons secondaires  
produits par des électrons primaires de **1 keV dans H<sub>2</sub>**

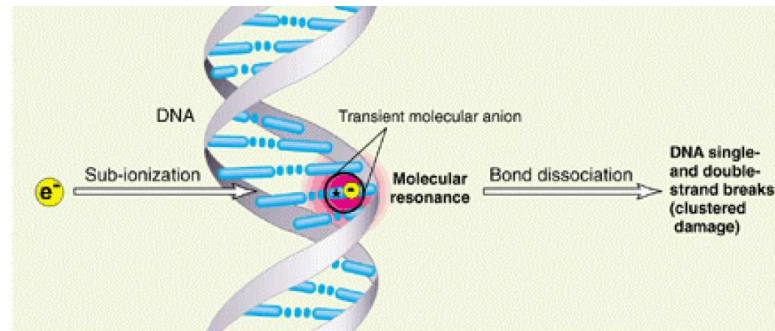
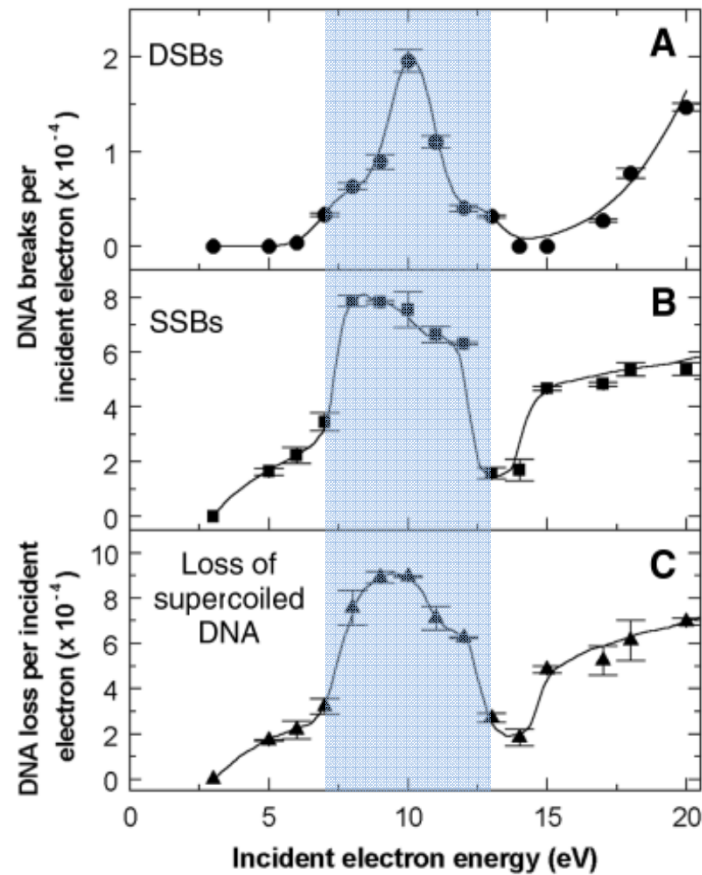


H. A. Bethe, Handbuch der  
Physik, STÖßTHEORIE, Vol.  
24, 1933

## I.- Introduction

### I.1.- Electrons de basse énergie (EBE)

2000, Sanche et *al.* démontrent l'efficacité des EBE à endommager sévèrement l'ADN.

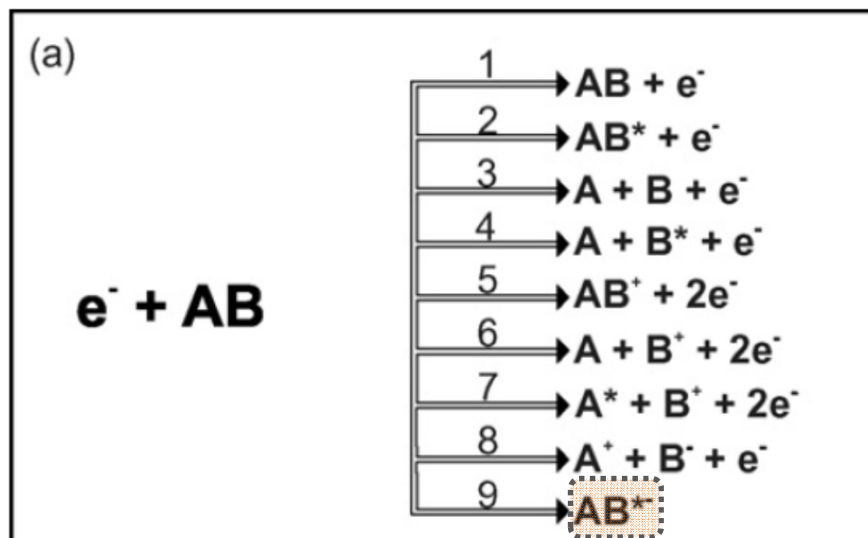


*Resonant Formation of DNA Strand Breaks by Low-Energy (3 to 20 eV) Electrons (3 MARCH 2000, Vol 287, SCIENCE)*

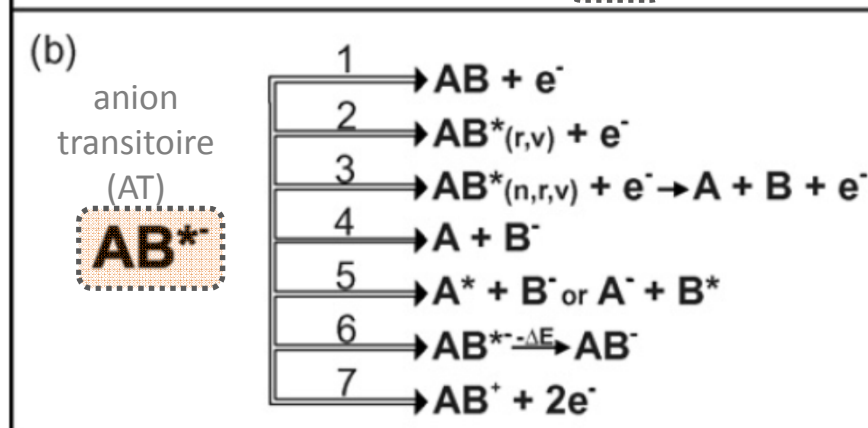
## I.- Introduction

### I.1.- Electrons de basse énergie (EBE)

- (a) Réactions possibles suite à la collision d'un électron avec une molécule **AB**



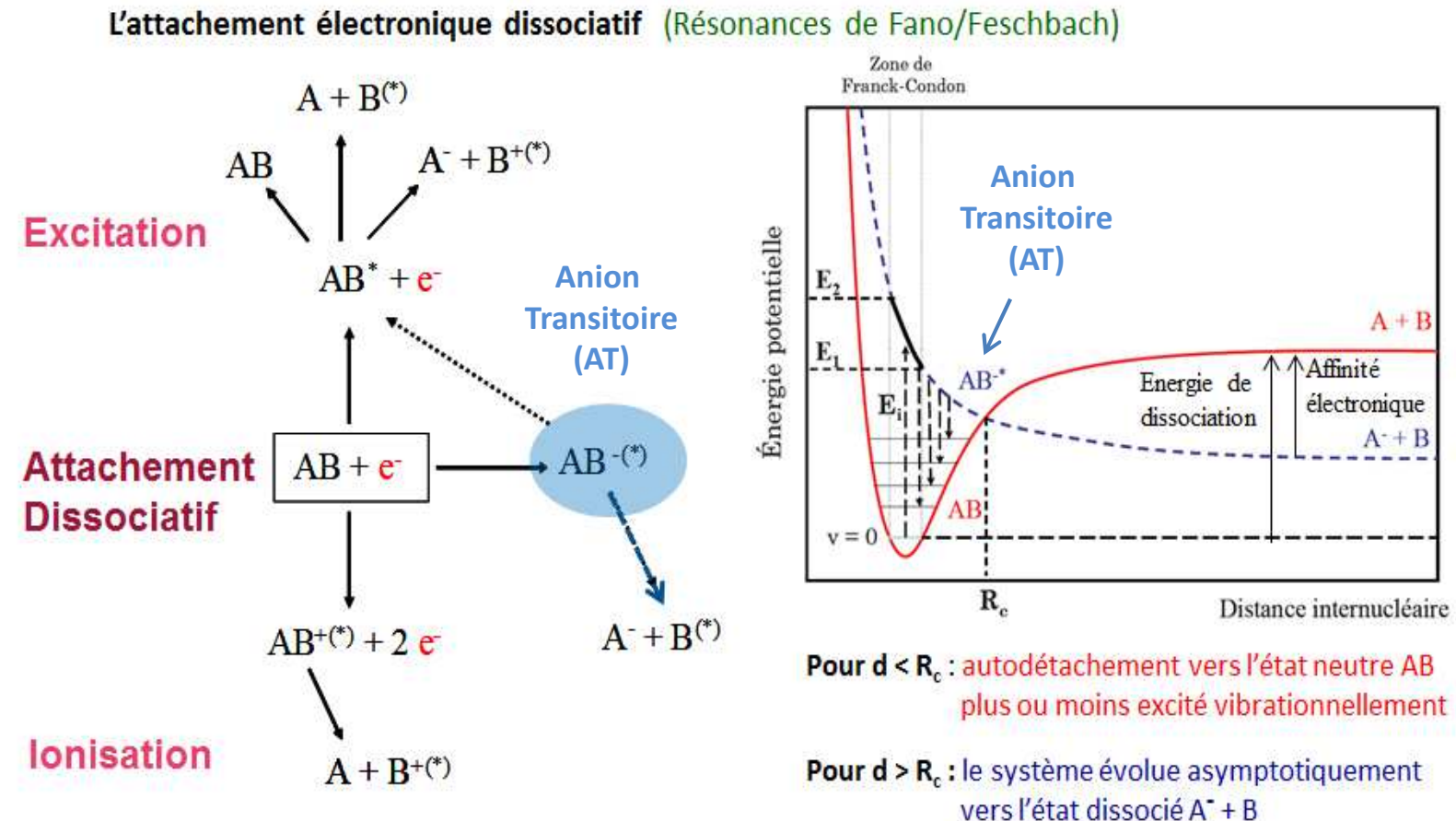
- (b) Voies de dissociation et de dissipation d'énergie d'un anion transitoire (AT) créé suite à l'attachement d'un électron à **AB**



Lane CD, Orlando TM.  
Applied Surface Science 253 (2007) 6646–6656.

## I.- Introduction

### I.1.- Electrons de basse énergie (EBE)

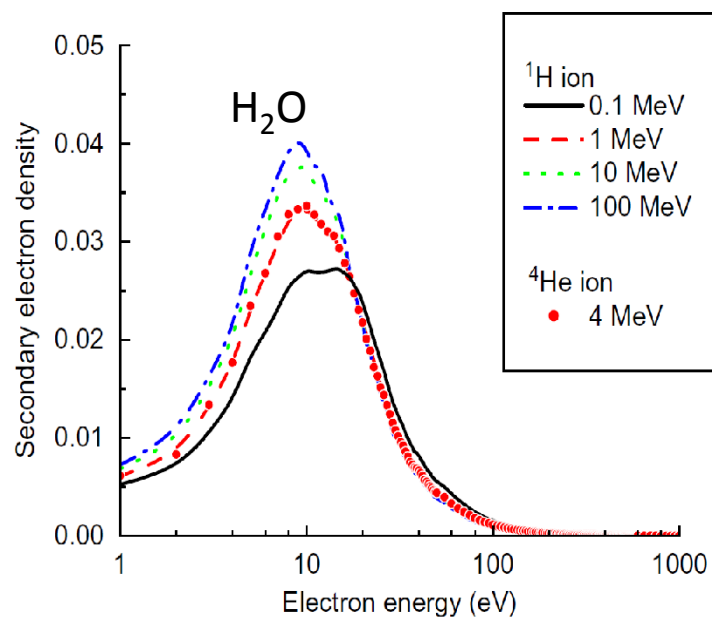


L'efficacité du processus de dissociation est fonction du rapport entre la durée de vie  $\tau$  de l'état résonant(AT) vis à vis de l'autodétachement et le temps nécessaire pour que le système atteigne la distance  $R_c$ .

## I.- Introduction

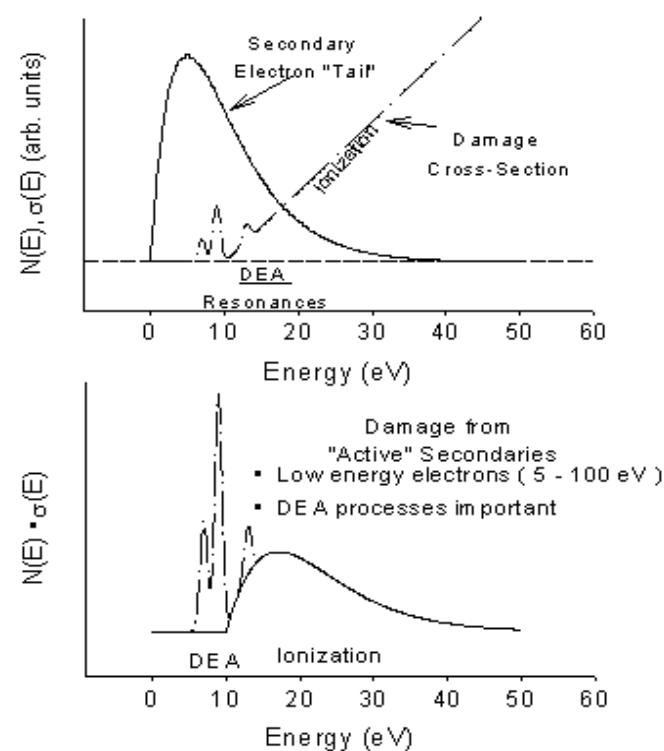
### I.1.- Electrons de basse énergie (EBE)

*(Platzman en 1955) puis Laverne et Pimplot en 2007 revisitent la problématique des électrons secondaires.*



S.M. Pimblott & J.A. LaVerne (2007) Radiat. Phys. Chem.

Platzman (1955) Subexcitation Electrons. Radiation Research: 2(1), 1-7.



**On a longtemps admis que les EBE n'endommagent la matière qu'au dessus des seuils d'ionisations et/ou après qu'ils soient solvatés, lorsque ces derniers deviennent des espèces chimiques réactives (radiolyse de l'eau).**

## I.- Introduction

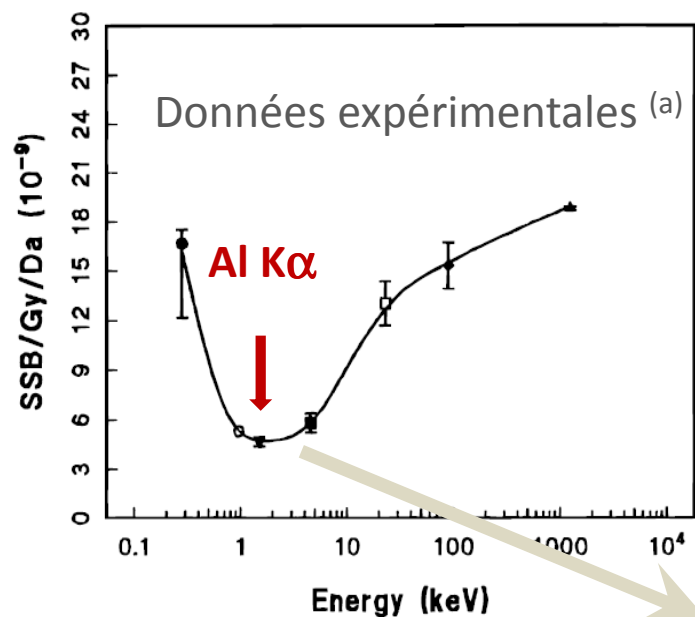
### I.2.- Rayons X ultra-mous

#### Pourquoi les Rayons X ultra-mous ?

(Al K $\alpha$  de 1,5 keV)

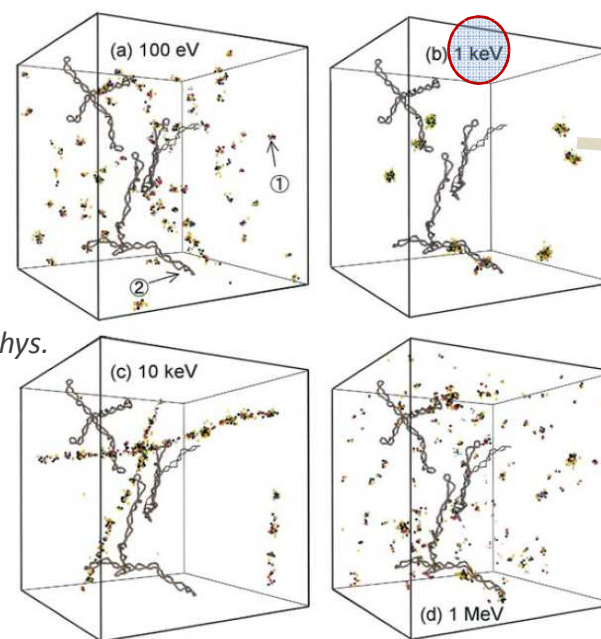
Forte densité d'ionisation dans de très faibles volumes

Les simulations faites avec des électrons d'énergie >1 keV, montrent que le rendement initial d'ionisation et d'excitation est indépendant de l'énergie de l'électron



(a) Fulford et al., J. Phys. Chem. A, Vol. 103, No. 51, 1999

Watanabe and Saito,  
Radiat. Environ. Biophys.  
(2002) 41:207–215.



« La diminution du nombre de radicaux OH qui échappent aux interactions radical-radical depuis « l'intratrack » dans le domaine énergétique 1,25 – 1,5 keV est un bon indicateur de l'augmentation de la densité d'ionisation dans la trace lorsque l'énergie des photons diminue. »

## I.- Introduction

### I.2.- Rayons X ultra-mous (Al K $\alpha$ de 1,5 keV)

#### Volume sondé en solution par les Rayons X ultra-mous?

L'interaction d'un photon Al K $\alpha$  produit majoritairement dans l'eau une paire d'électrons de 0,96 keV (raie K de l'oxygène) et de 0,52 keV (électron Auger) <sup>(a)</sup>.

Dans l'eau, de tels électrons ont des distances de pénétration de l'ordre de **30 nm** <sup>(b)</sup>.

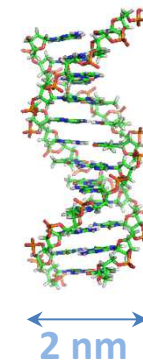
Avec plus de 95% d'effets indirects responsables des cassures de l'ADN dans l'eau, ce sont donc les radicaux  $\bullet$ OH qui dictent l'extension spatiale de l'évènement primaire.

L'utilisation de capteurs de radicaux libres (scavengers) permet de limiter le volume d'action des radicaux hydroxyle à **quelques nanomètres**, c'est-à-dire à la valeur du diamètre de la macromolécule d'ADN (2 nm) <sup>(c)</sup>.

<sup>(a)</sup> Nikjoo H, O'Neill P, Goodhead DT, Terrissol M (1997) *Int J Radiat Biol* 71(5):467–483

<sup>(b)</sup> Raju MR et al., (1987) *Radiat Res* 110(3):396–412

<sup>(c)</sup> Fromm M, and Boulanouar O (2016) *Radiat. Phys. Chem.*, 128 44-53.



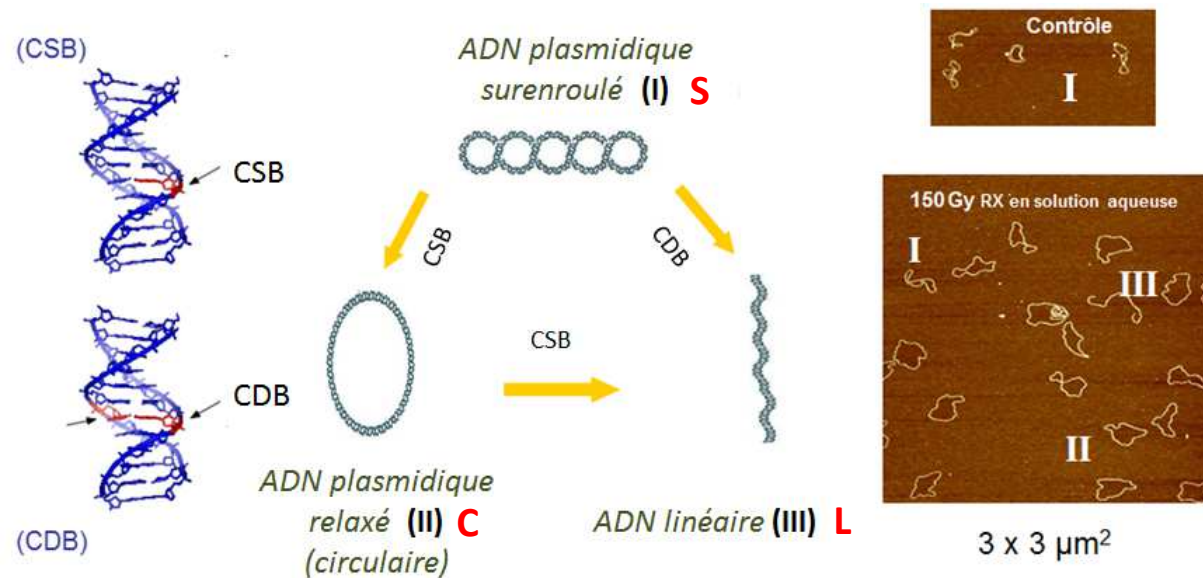
# I.- Introduction

## I.3.- Technique de **relaxation de plasmide** (Gel d'électrophorèse sur agarose)

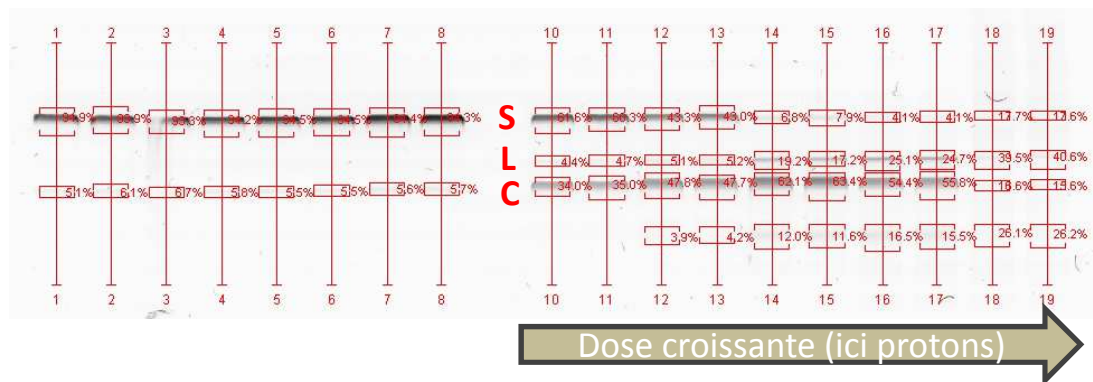
### Effets des rayonnements

-> cassure simple brin = **relaxation**,

-> cassure double = **linéarisation**



Thèse Sylvie Boichot,  
Besançon (2000)



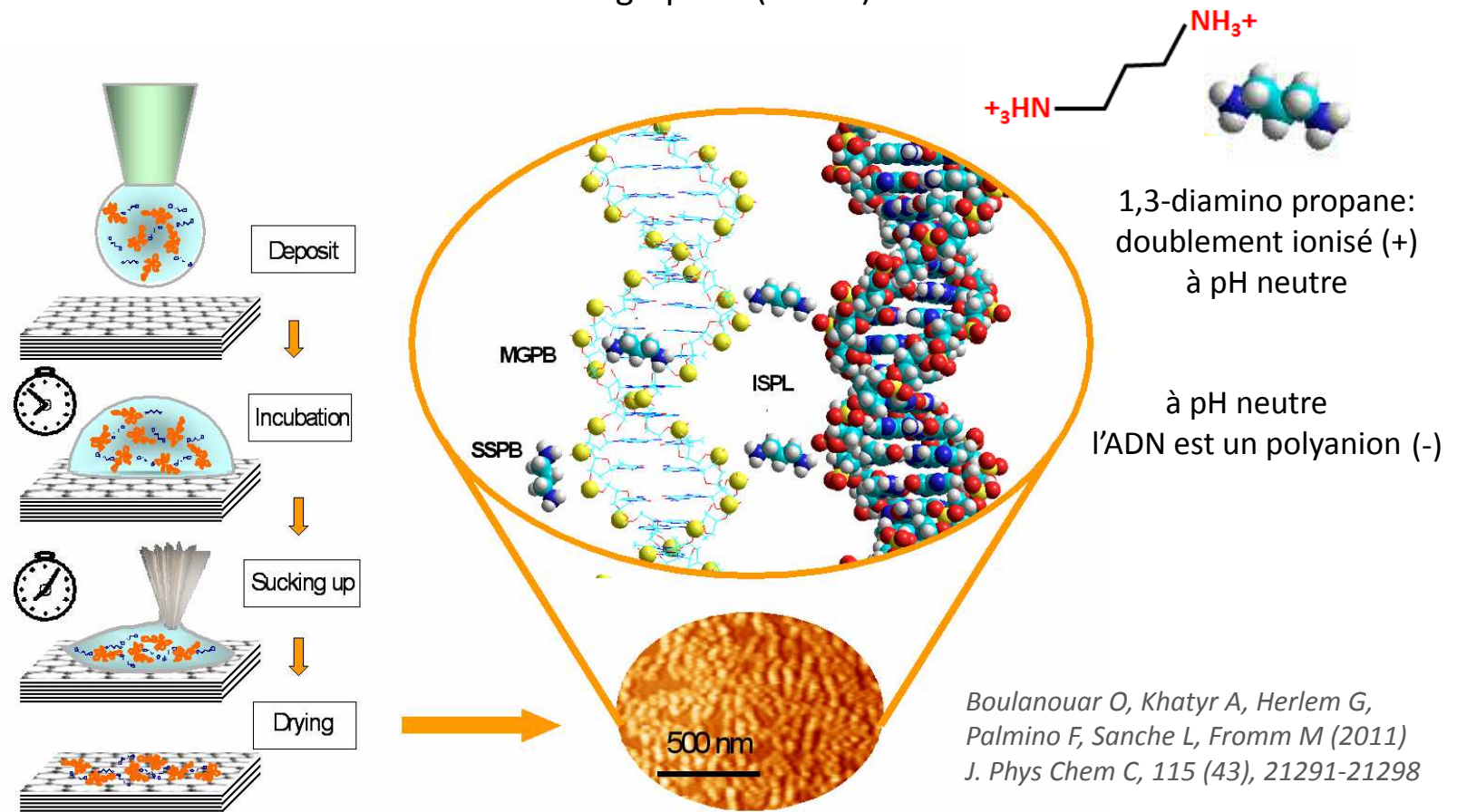
← ADN fragmenté

## II.- Résultats

### II.1.- EBE et couches ultrafines d'ADN

#### II.1.1.- Fabrication des couches

Méthode de production de couches nanométriques par adsorption douce de complexes ADN-Dap sur des substrats de graphite (HOPG).



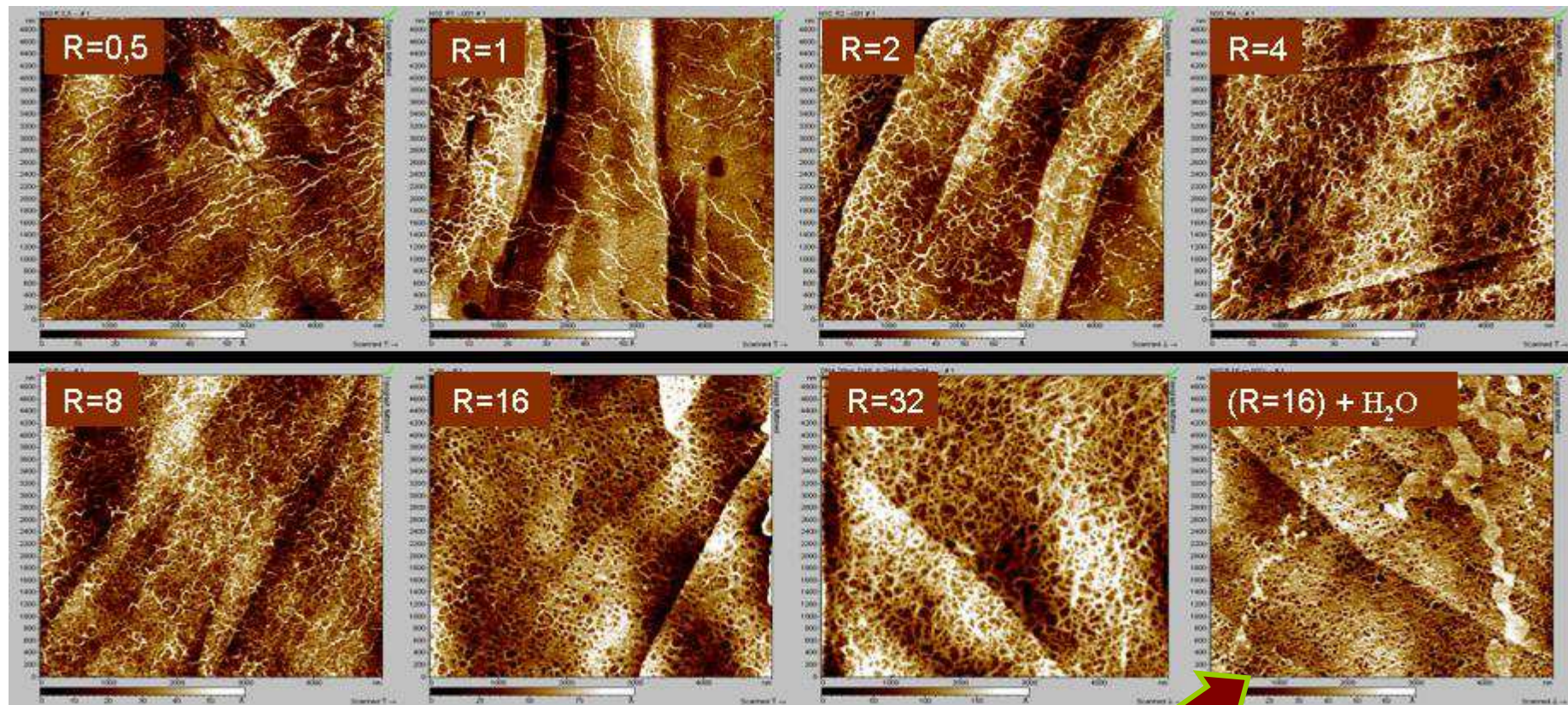
## II.- Résultats

### II.1.- EBE et couches ultrafines d'ADN

#### II.1.1.- Fabrication des couches

$$R = \left[ \text{Dap}^{2+} \right] / \left[ \text{PO}_4^- \right]_{\text{DNA}}$$

pUC21: ADN plasmidique de longueur 3266 pb



Après lavage à l'eau, les couches sont re-dissoutes, seule la première couche demeure ancrée sur la surface du graphite (HOPG).

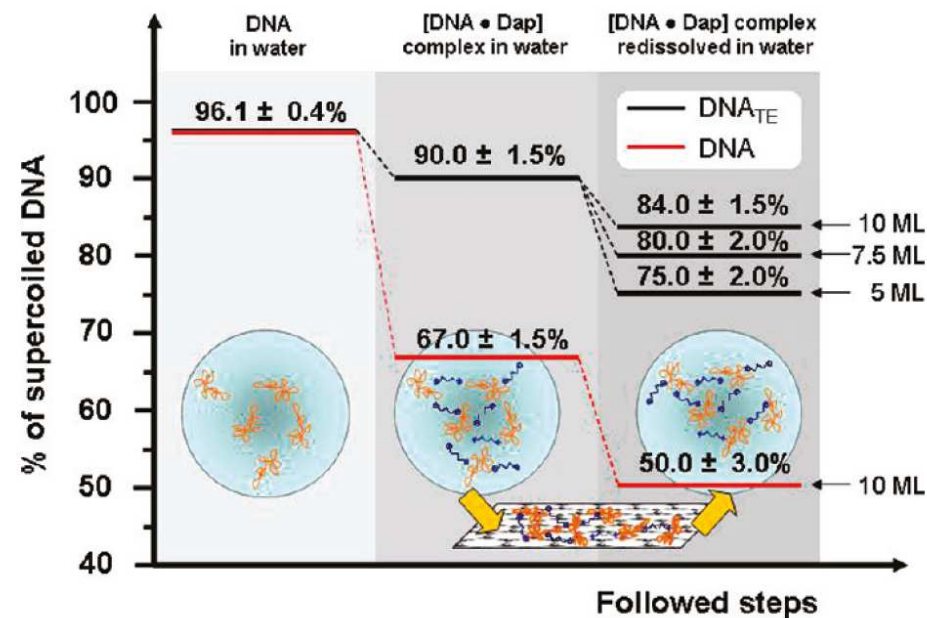
## II.- Résultats

### II.1.- EBE et couches ultrafines d'ADN

#### II.1.1.- Fabrication des couches

**Ces dépôts d'épaisseur nanométrique sur HOPG sont solubles dans H<sub>2</sub>O**

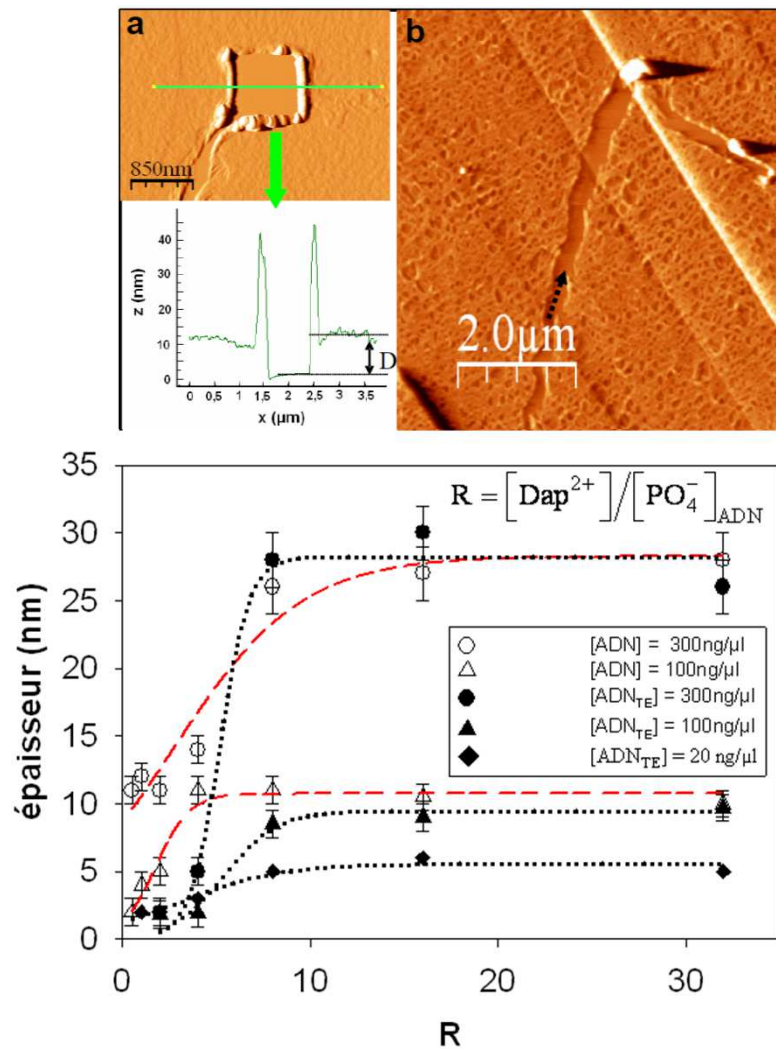
**Re-dissolution, mais nécessité de la présence du tampon TE pour gel d'électrophorèse ultérieur**



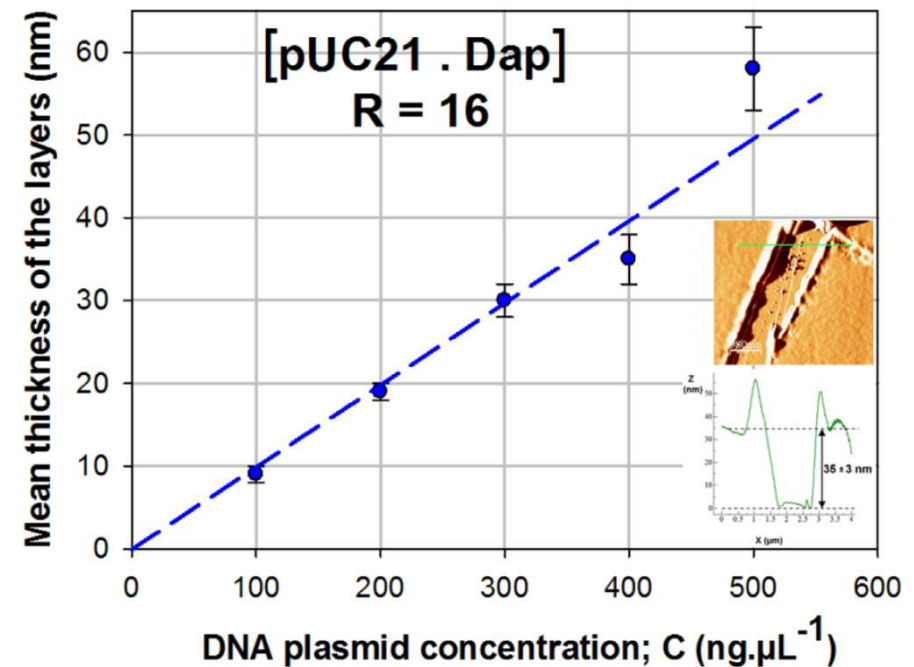
## II.- Résultats

### II.1.- EBE et couches ultrafines d'ADN

#### II.1.2.- Epaisseur des couches



$$R = \frac{[\text{Dap}^{2+}]}{[\text{PO}_4^-]_{\text{DNA}}}$$

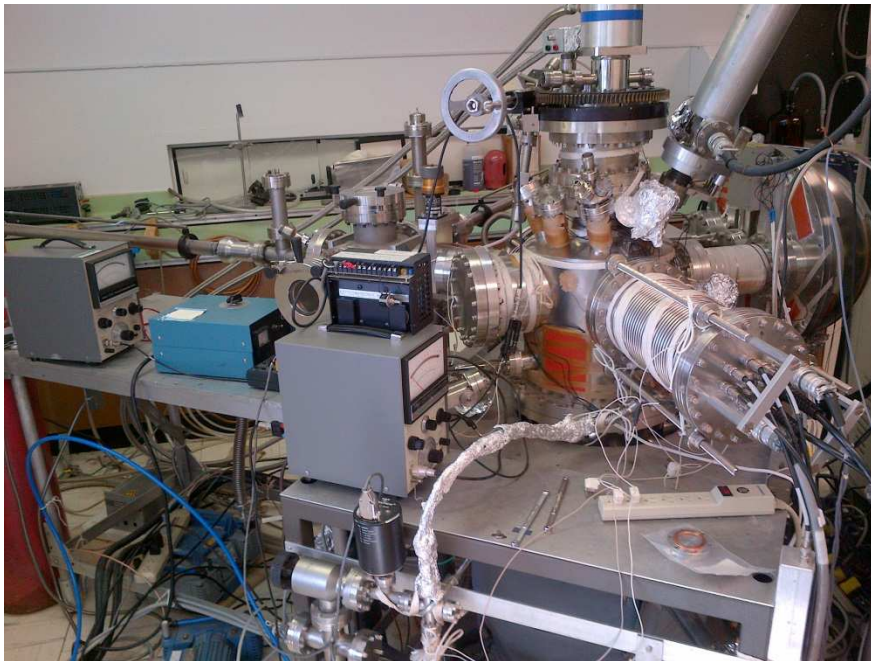


Fromm M, Boulanouar O (2016)  
Radiation Physics and Chemistry 128 44–53

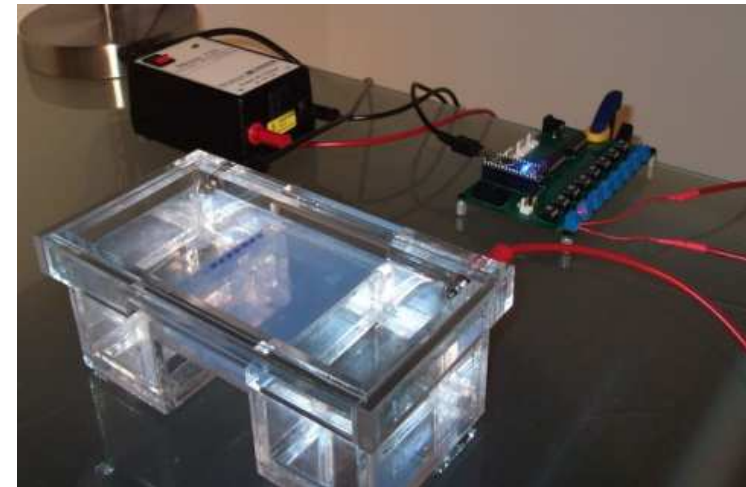
## II.- Résultats

### II.1.- EBE et couches ultrafines d'ADN

#### II.1.3- Exposition aux EBE dans l'hyper-vide



Désorption stimulée par les EBE:  
spectrométrie de masse des ions négatifs désorbés.  
Laboratoire du Pr L. Sanche,  
**Université de Sherbrooke, Canada.**



Electrophorèse en gel  
d'agarose (EGA)  
Immédiatement après  
exposition aux EBE, les  
dépôts sont dissous dans  
l'eau et analysés par EGA.

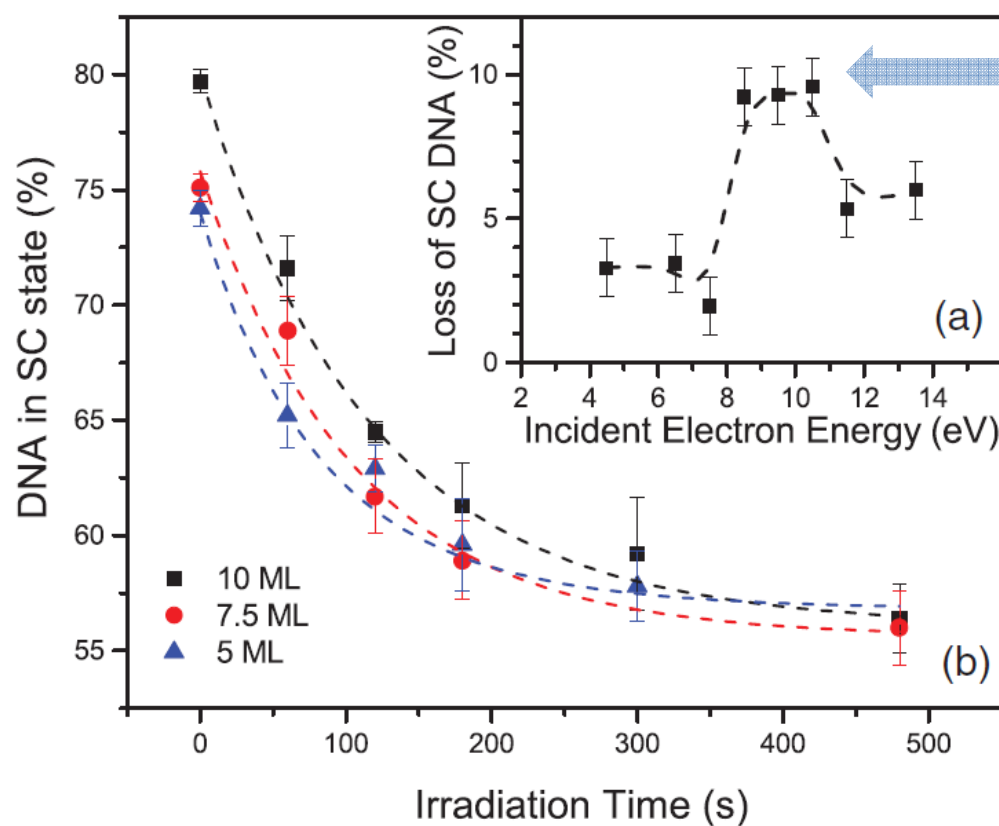
## II.- Résultats

### II.1.- EBE et couches ultrafines d'ADN

#### II.1.3- Exposition aux EBE dans l'hyper-vide

### Mesure de sections efficaces absolues pour la perte de surenroulement à 10 eV

*Exposition aux EBE dans l'hyper-vide (Sherbrooke)*



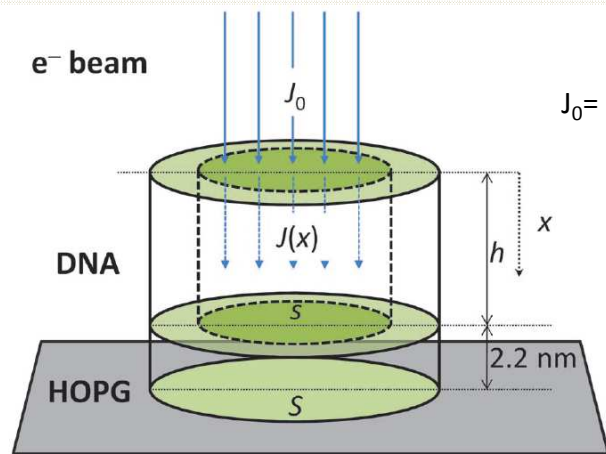
Formation de  
l'anion transitoire  
à 10 eV

## II.- Résultats

### II.1.- EBE et couches ultrafines d'ADN

#### II.1.3- Exposition aux EBE dans l'hyper-vide

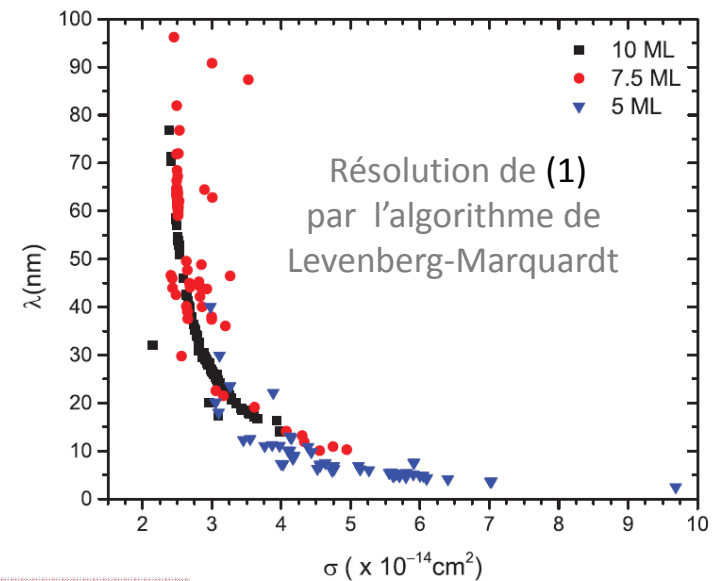
$$P(t) = \left(\frac{S}{S_0}\right) \cdot P_0 \cdot \frac{1}{h} \cdot \int_0^h e^{-\sigma \cdot J_0 \cdot t \cdot e^{-x/\lambda}} dx + \left(\frac{S - S_0}{S}\right) \cdot P_0 \quad (1)$$



$$J(x) = J_0 \exp(-x/\lambda)$$

$$J_0 = 0.39 \times 10^{12} \text{ électrons cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

**Sections efficaces  
absolues à 10 eV  
pour la perte de  
srouenroulement**



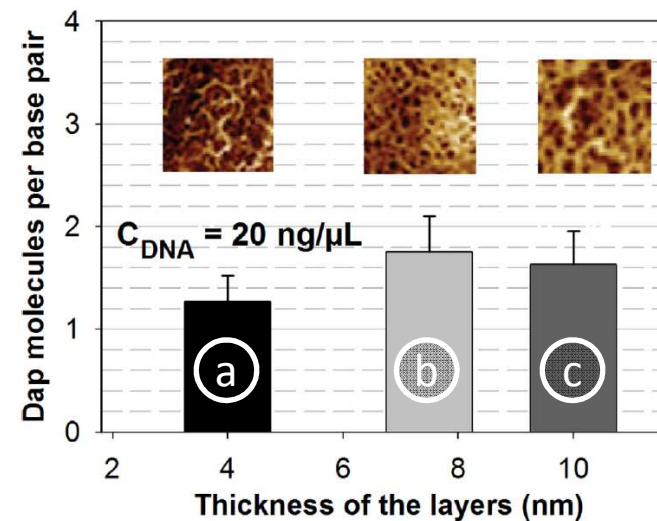
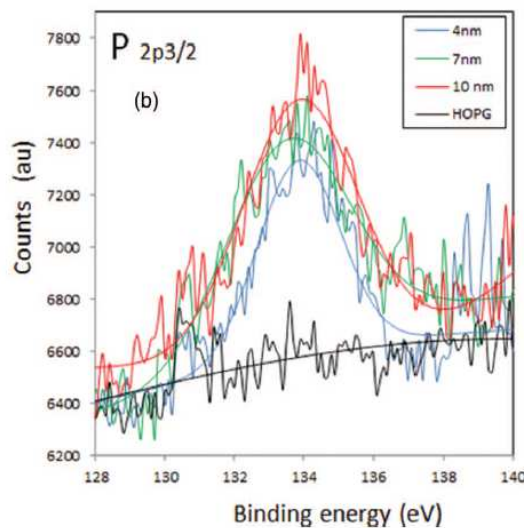
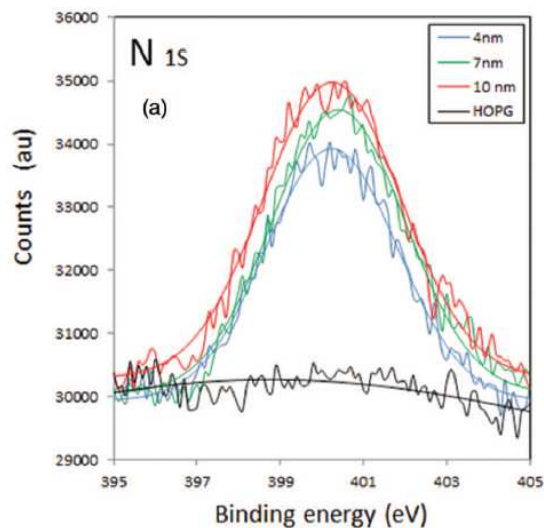
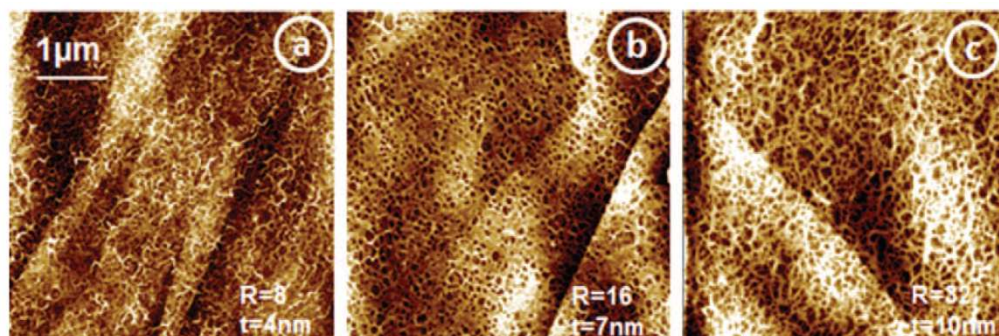
| Thickness<br>(ML) | $h$<br>(nm) | $\lambda$<br>(nm) | $\delta\lambda$<br>(nm) | $\sigma$<br>( $10^{-14} \text{ cm}^2$ ) | $\delta\sigma$<br>( $10^{-14} \text{ cm}^2$ ) |
|-------------------|-------------|-------------------|-------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------------|
| 5                 | 8.8         | 9.2               | 6.1                     | 4.8                                     | 1.2                                           |
| 7.5               | 15.3        | 61.7              | 45.1                    | 2.7                                     | 0.5                                           |
| 10                | 19.8        | 29.9              | 12.2                    | 3.0                                     | 0.4                                           |
| Weighted mean     |             | 14.1              | 5.4                     | 3.0                                     | 0.3                                           |

## II.- Résultats

### II.1.- EBE et couches ultrafines d'ADN

#### II.1.3- Exposition aux EBE dans l'hyper-vide

**Désorption stimulée des anions par EBE** - Dépôts exempts de TRIS – hyper-vide



XPS:  
 contrôle des  
 compositions

## II.- Résultats

### II.1.- EBE et couches ultrafines d'ADN

#### II.1.3- Exposition aux EBE dans l'hyper-vide

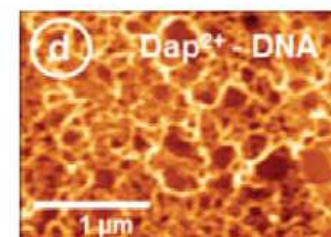
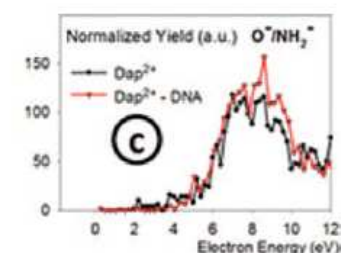
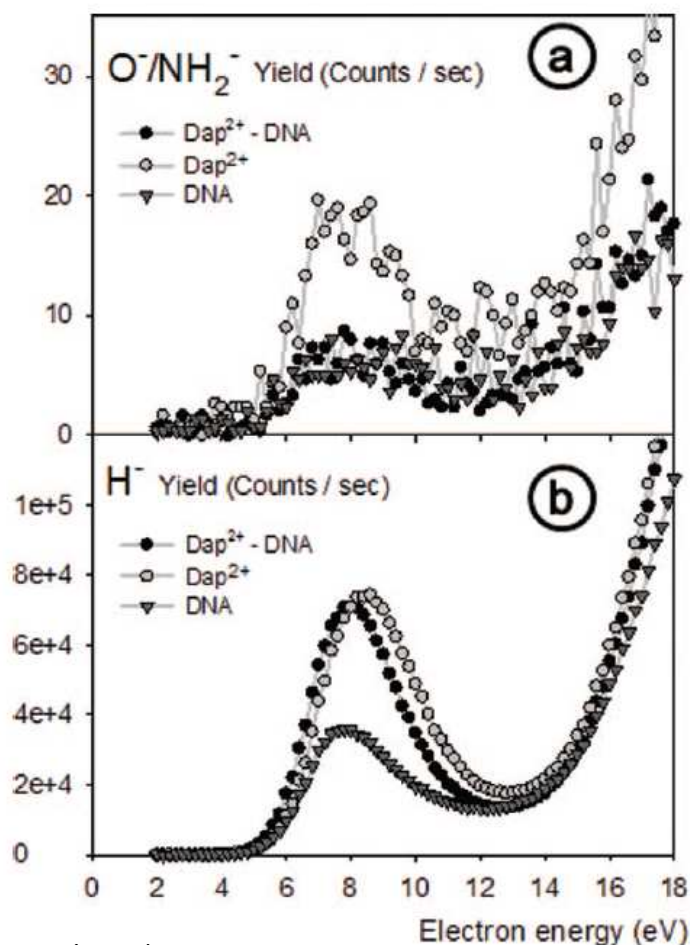
#### Désorption stimulée des anions par EBE - Dépôts exempts de TRIS – hyper-vide

La masse 16 u  
provient  
essentiellement  
de  $\text{NH}_2^-$



On remarque  
qu'en présence de  $\text{Dap}^{2+}$ ,  
il y a suppression  
du canal qui produit  $\text{O}^-$

Les rapports  $\text{OH}^- / [\text{O}^-/\text{NH}_2^-]$   
sont quant à eux très élevés.



## II.- Résultats

### II.1.- EBE et couches ultrafines d'ADN

#### II.1.3- Exposition aux EBE dans l'hyper-vide

Abondance de OH<sup>-</sup>  
dans la désorption des  
films utilisés :  
Présence de Dap<sup>2+</sup> ?

### Désorption stimulée des anions par EBE - Dépôts exempts de TRIS – hyper-vide

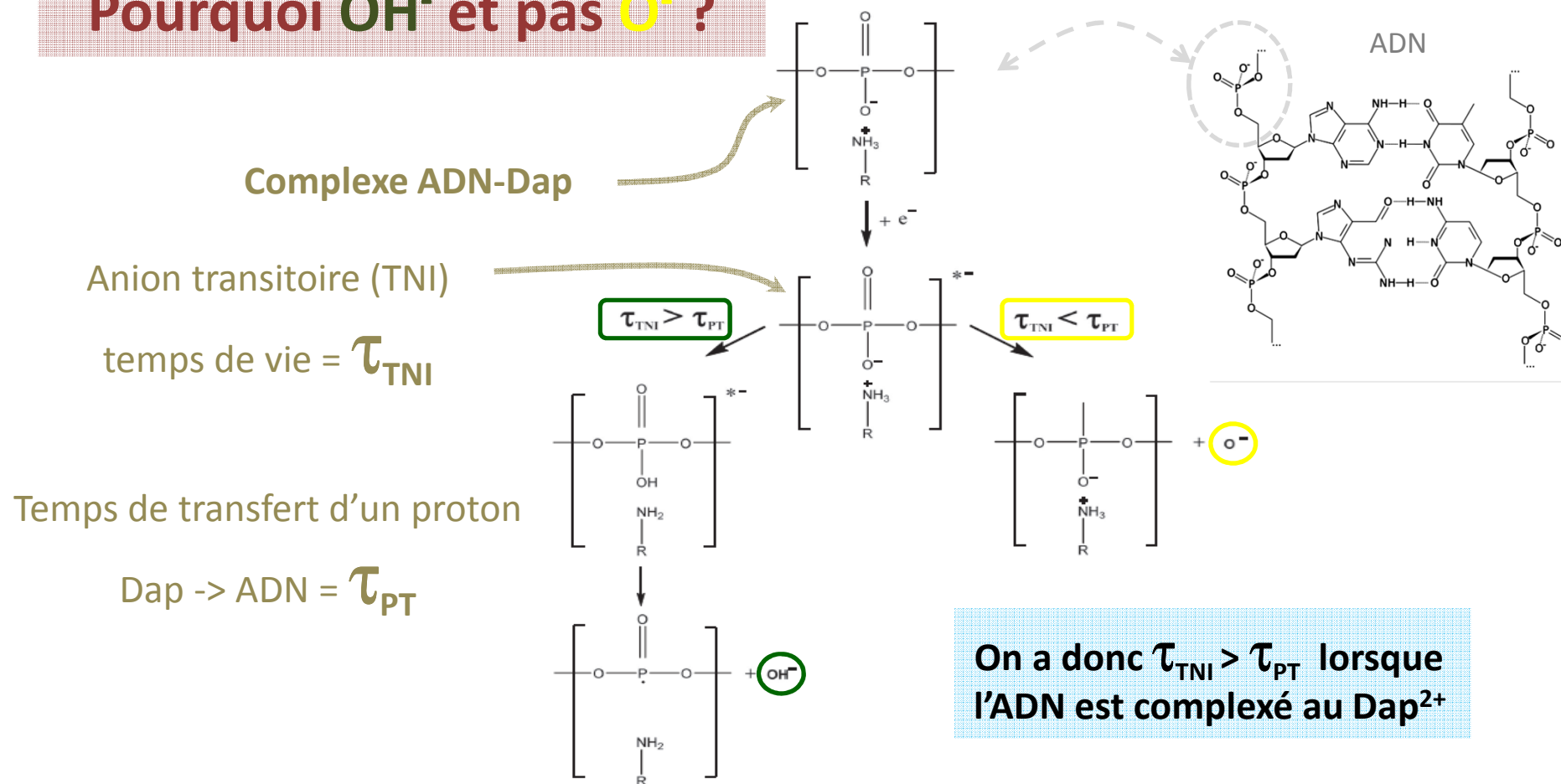
| Reference                                  | Target                                                                                                | Thickness<br>(nm or ML) | Substrate  | Resonance<br>energy<br>(eV)<br>(O <sup>-</sup> /NH <sub>2</sub> , OH <sup>-</sup> ) | Threshold<br>energy<br>(eV)<br>(O <sup>-</sup> /NH <sub>2</sub> , OH <sup>-</sup> ) | Yields<br>ratio<br>OH <sup>-</sup> /<br>[O <sup>-</sup> /NH <sub>2</sub> ] <sup>-</sup> |
|--------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| This work                                  | Plasmid DNA-Dap <sup>2+</sup>                                                                         | 4; 7 and 10 nm          | HOPG       | (8.0, 7.0)                                                                          | (4, 2.5)                                                                            | 2.15, 1.65, 3.5                                                                         |
| Ptasińska and Sanche <sup>22</sup>         | Tetramer CGAT                                                                                         | 1.6 ± 0.3 nm            | Tantalum   | (9.1, 9.1)                                                                          | (3.5, 3)                                                                            | 0.7                                                                                     |
| Mirsaleh-Kohan <i>et al.</i> <sup>30</sup> | - SAM-DNA dosed with <sup>16</sup> O <sub>2</sub><br>(at 55 K, 0.75 ML <sup>16</sup> O <sub>2</sub> ) | ...                     | Gold       | (7.2, 7.3)                                                                          | (3.3, 3)                                                                            | 0.14                                                                                    |
|                                            | - SAM-DNA dosed with <sup>18</sup> O <sub>2</sub><br>(at 150 K, 3.5 ML <sup>18</sup> O <sub>2</sub> ) | ...                     | Gold       | (7.0, 7.0)                                                                          | (3.2, 3)                                                                            | 0.2                                                                                     |
| Mirsaleh-Kohan <i>et al.</i> <sup>31</sup> | - SAM-DNA (10-mer)                                                                                    |                         | Gold       | (7.8, 7.1)                                                                          | (5.3, 2.7)                                                                          | 0.9                                                                                     |
|                                            | - Lyophilized DNA (10-mer)                                                                            | 5 ML                    | Gold       | (8.3, 6.7)                                                                          | (4.9, 2.65)                                                                         | 0.9                                                                                     |
| Pan and Sanche <sup>32</sup>               | - SAM 5S-dsDNA                                                                                        | 1 ML                    | Gold       | (8, 7)                                                                              | (4, 2.5)                                                                            | ...                                                                                     |
| Mirsaleh-Kohan <i>et al.</i> <sup>33</sup> | - SAM 5S-dsDNA                                                                                        | 1 ML                    | Gold       | (~8, 6.5)                                                                           | (4-5, 2.5)                                                                          | ~2                                                                                      |
| Pan <i>et al.</i> <sup>21</sup>            | - Linear DNA, 40 base pairs                                                                           | -2.9 ± 0.3 nm           | - Tantalum | (9.2, 9.0)                                                                          | (4.6, 4)                                                                            | 0.2                                                                                     |
|                                            | - Supercoiled plasmid DNA                                                                             | -3 ML                   | - Tantalum | (9.2, 9.0)                                                                          | (5, 4)                                                                              | 0.2                                                                                     |
| Abdoul-Carime <i>et al.</i> <sup>34</sup>  | DNA base : G                                                                                          | 8 ML                    | Platinum   | (9.0, 7.8)                                                                          | (5, 5)                                                                              | 0.9                                                                                     |
|                                            | T                                                                                                     | 8 ML                    | Platinum   | (11.0, 9.8)                                                                         | (5.5, 5)                                                                            | 1                                                                                       |
|                                            | C                                                                                                     | 8 ML                    | Platinum   | (8.8, 9.1)                                                                          | (5, <5)                                                                             | 0.8                                                                                     |
| Abdoul-Carime and Sanche <sup>35</sup>     | Amino-acid: tryptophan                                                                                | 5 ML                    | Platinum   | (7.0, 7.9)                                                                          | (4.5, 4.5)                                                                          | 1.6                                                                                     |
|                                            | Histidine                                                                                             | 5 ML                    | Platinum   | (7.3, 7.7)                                                                          | (5, 5)                                                                              | 0.25                                                                                    |
|                                            | Proline                                                                                               | 5 ML                    | Platinum   | (7.2, 7.6)                                                                          | (4.5, 4.5)                                                                          | 1                                                                                       |
| Abdoul-Carime and Sanche <sup>36</sup>     | Aliphatic amino-acid: glycine                                                                         | 10 ML                   | Platinum   | (7.5, 7.5)                                                                          | (5, 5)                                                                              | 1                                                                                       |
|                                            | Alanine                                                                                               | 10 ML                   | Platinum   | (7.6, 7.6)                                                                          | (3.5, 2.5)                                                                          | 1                                                                                       |
|                                            | Cysteine                                                                                              | 10 ML                   | Platinum   | (7.2, 7.2)                                                                          | (4.5, 2.5)                                                                          | 0.25                                                                                    |

## II.- Résultats

### II.1.- EBE et couches ultrafines d'ADN

#### II.1.3- Exposition aux EBE dans l'hyper-vide

Pourquoi  $\text{OH}^-$  et pas  $\text{O}^-$  ?

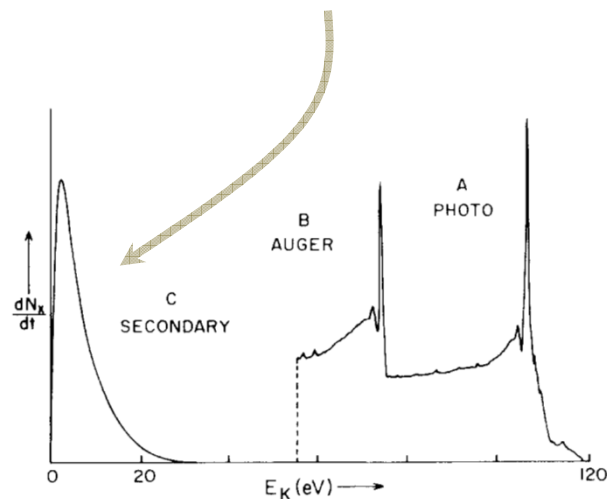


## II.- Résultats

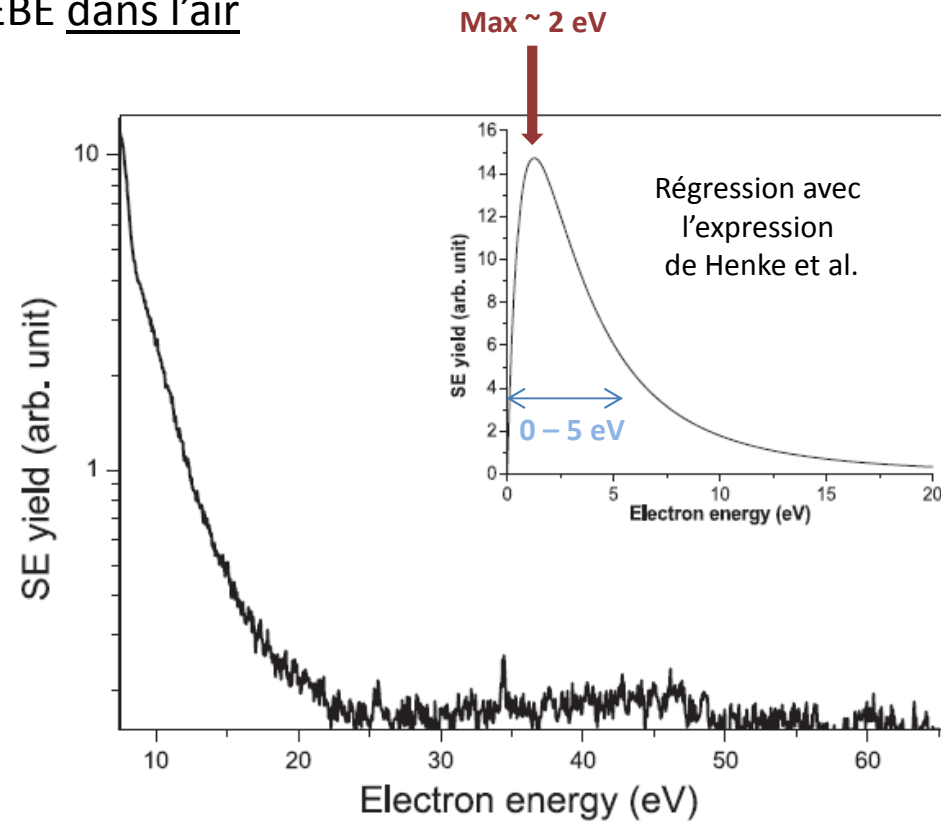
### II.1.- EBE et couches ultrafines d'ADN

#### II.1.4.- Exposition des dépôts aux EBE dans l'air

L'exposition d'un solide aux rayons X engendre aux basses énergies une importante distribution d'électrons secondaires (photoélectrons)



Henke, Smith and Hattwood,  
*J. Appl. Phys.*, Vol 48, No. 5, May 1977.

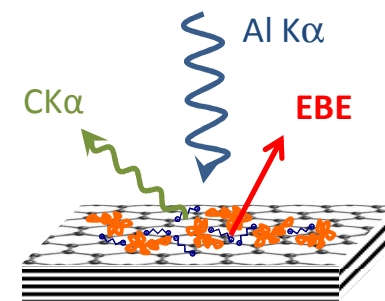


Exposition d'une feuille de **graphite** (HOPG)  
aux rayons X ultra-mous Al K $\alpha$ , analyse du  
spectre électronique par XPS  
(Sherbrooke, Canada)

## II.- Résultats

### II.1.- EBE et couches ultrafines d'ADN

#### II.1.4.- Exposition des dépôts aux EBE dans l'air



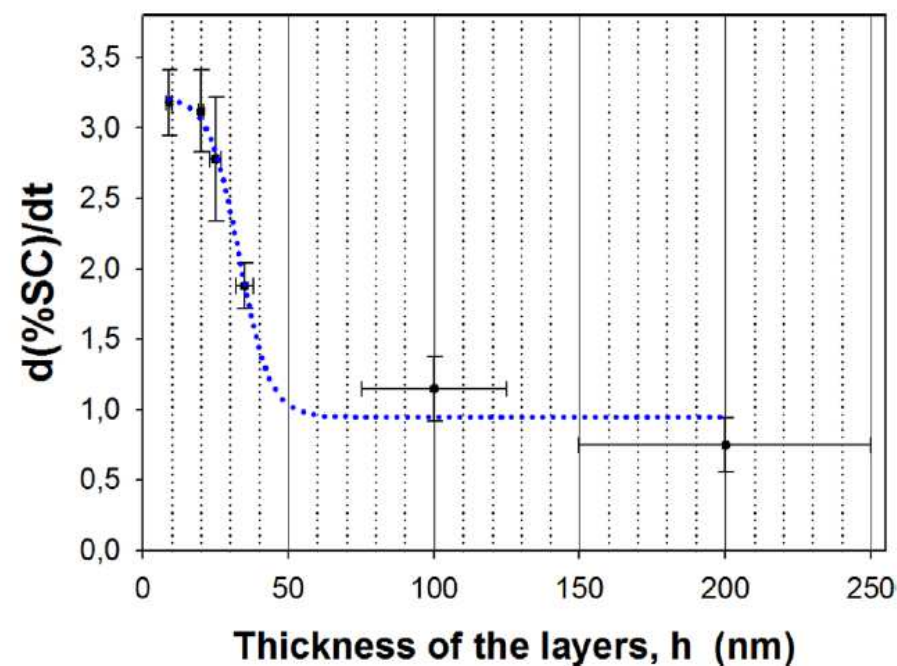
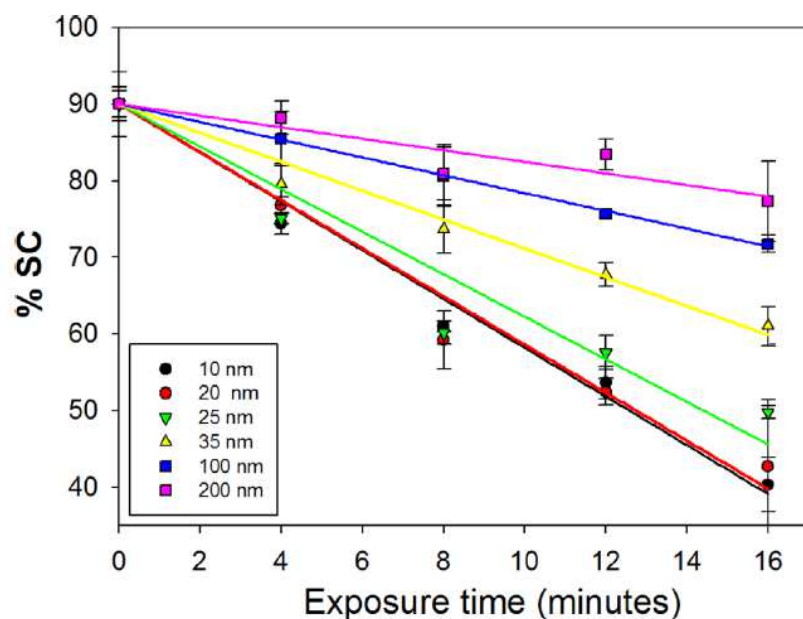
Longueurs d'atténuation,  $\lambda$ , des raies  $AlK\alpha$  et  $CK\alpha$  dans l'eau :

$$\lambda_{Al(K\alpha)} = 7000 \text{ nm} \text{ et } \lambda_{C(K\alpha)} = 1800 \text{ nm} \text{ (a),}$$

$$\text{EBE: } 7 \text{ nm} \leq \lambda_{EBE} (10 \text{ eV}) \leq 10 \text{ nm} \text{ (b).}$$

(a) Fulford et al., J. Phys. Chem. A,  
Vol. 103, No. 51, 1999

(b) Emfietzoglou, D et al. (2009 )  
Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B267, 45–52.

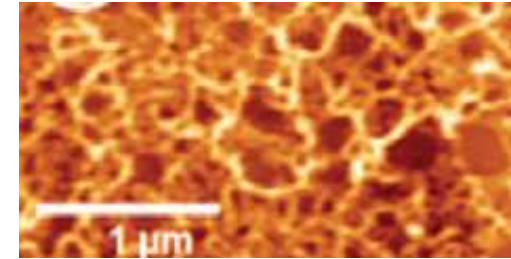


Fromm M, Boulanouar O (2016)  
Radiation Physics and Chemistry 128 44–53

## II.- Résultats

### II.1.- EBE et couches ultrafines d'ADN

#### II.1.4.- Exposition des dépôts aux EBE dans l'air

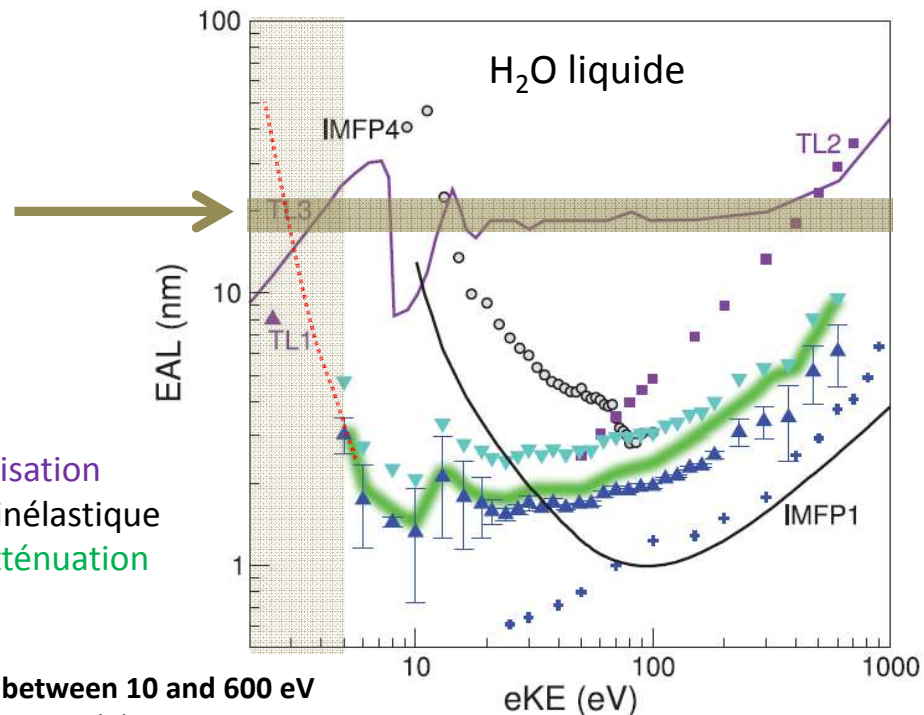


Sur la base de la relation utilisée en XPS pour évaluer la longueur d'atténuation (*sampling depth*) des électrons dans un solide, à savoir:

$$J(x) = J_0 \exp\left(-\frac{x}{\lambda}\right)$$

Avec 99% d'absorption  
pour une épaisseur de dépôt  
de complexe ADN-Dap  
égale à 50 nm; on trouve  $\lambda=11\text{nm}$   
pour les photo-EBE avec  $\sim [0-5\text{eV}]$

TL = Longueur de thermalisation  
IMFP = libre parcours moyen inélastique  
EAL = Longueur effective d'atténuation

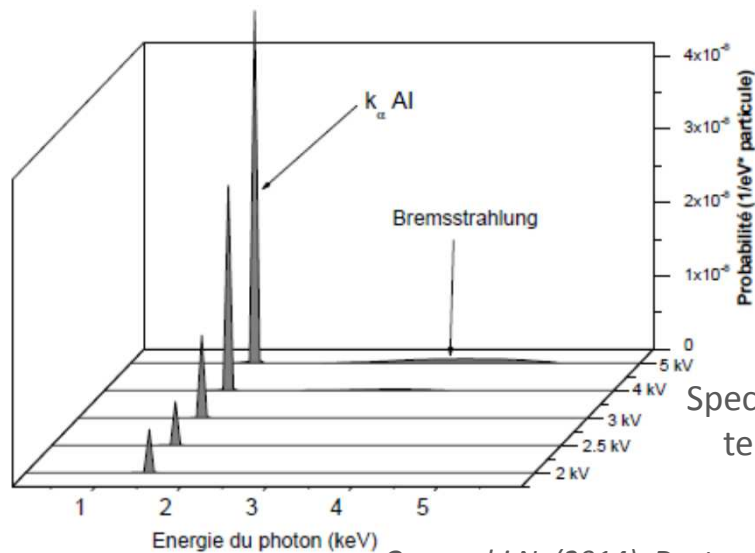
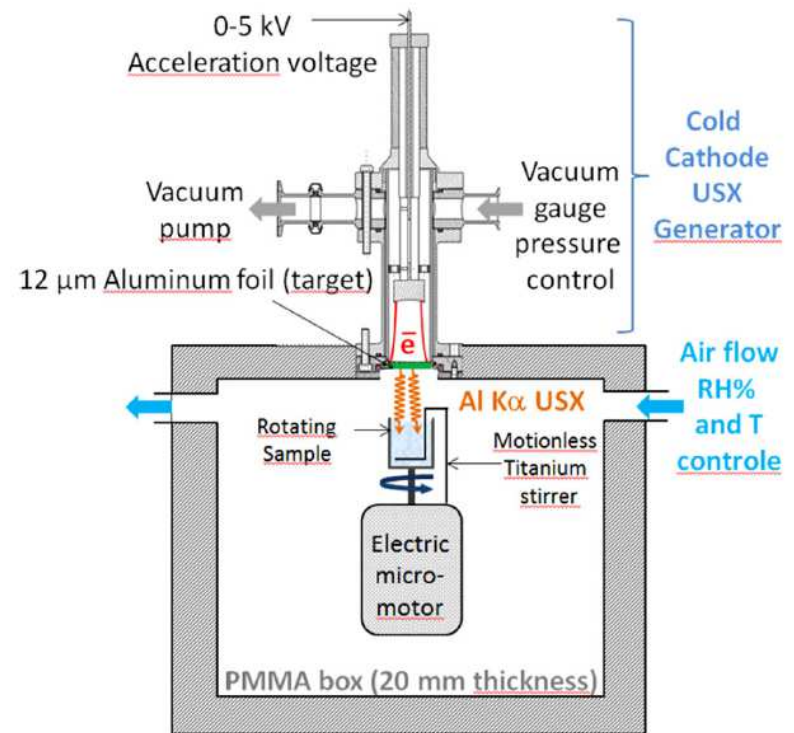
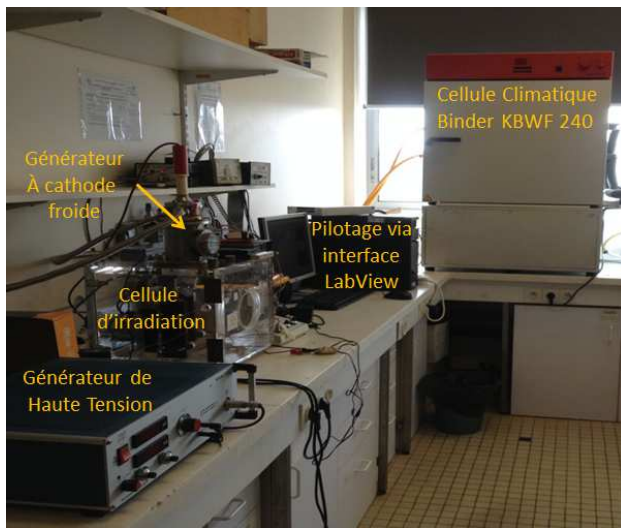


Effective attenuation length of an electron in liquid water between 10 and 600 eV

Suzuki Y-I et al. (2014) Physical Review E 90, 010302(R)

## II.- Résultats

### II.2.- Rayons X ultra-mous et ADN plasmidique en solution

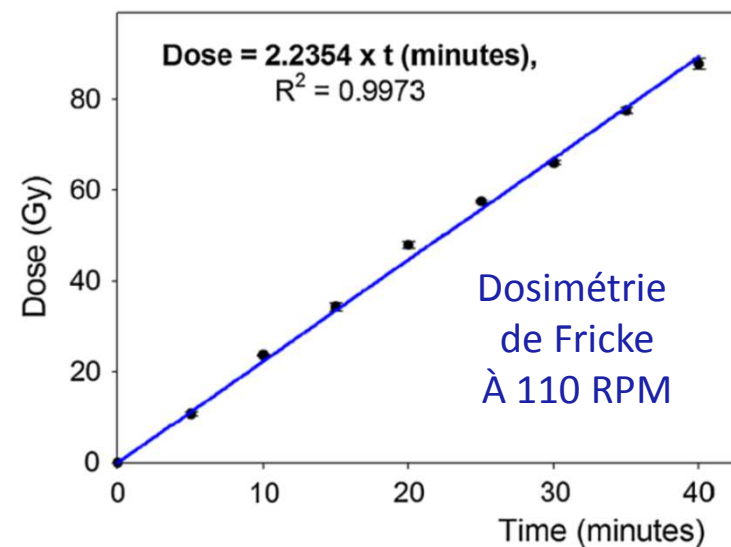
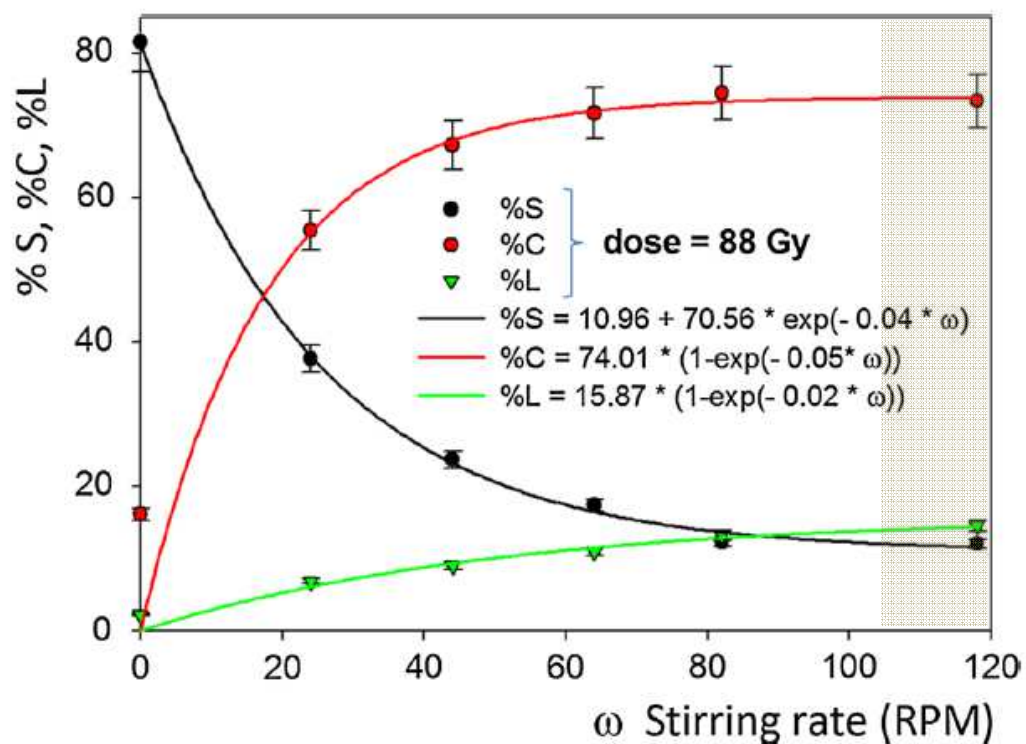


Spectre énergétique simulé (PENELOPE) à différentes tensions appliquées et à une distance de 10 mm de la cible d'aluminium

## II.- Résultats

### II.2.- Rayons X ultra-mous et ADN plasmidique en solution

Longueur d'atténuation des photons Al ( $K\alpha$ ) dans  $H_2O$  :  $\lambda_{Al(K\alpha)} = 7000\text{nm} \Rightarrow$  nécessité d'agiter

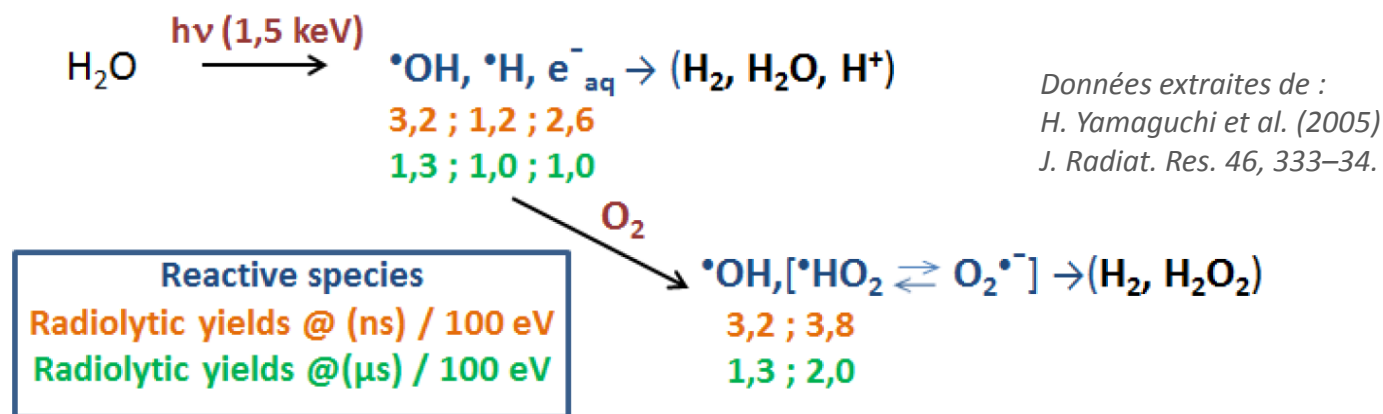


*Souici M. et al., Radiat Environ Biophys (2016) 55:215–228*

## II.- Résultats

### II.2.- Rayons X ultra-mous et ADN plasmidique en solution

#### Radiolyse de l'eau par RX Al (K $\alpha$ )

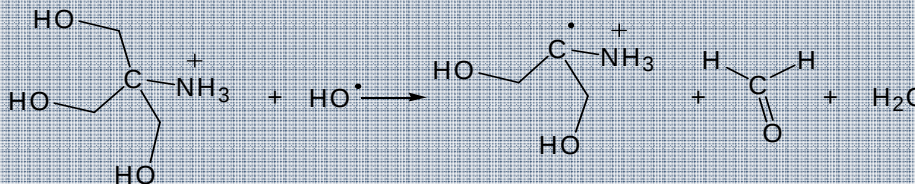


#### Les capteurs de radicaux libres (scavengers):

- Capacité de capture ( $\text{s}^{-1}$ ) :  $\sigma = k [\text{Capteur}]$ , avec  $k$  ( $\text{L} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ), la constante cinétique de la réaction de capture
- Durée de vie du radical (s) en présence d'un capteur de radicaux:  $\tau = 1/\sigma$
- Distance moyenne de diffusion:  $\langle x \rangle = 2,26 (D\tau)^{1/2}$

#### Exemple de capture du radical hydroxyle par le Tris :

$k_{\text{Tris}} = 1,5 \times 10^9 \text{ L} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$

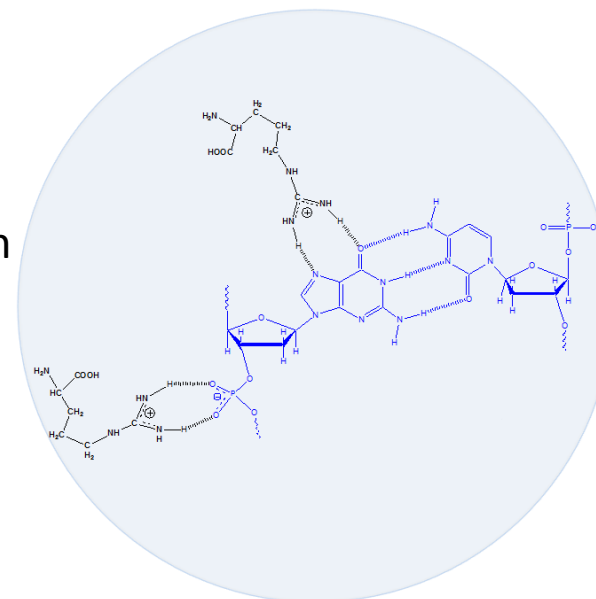
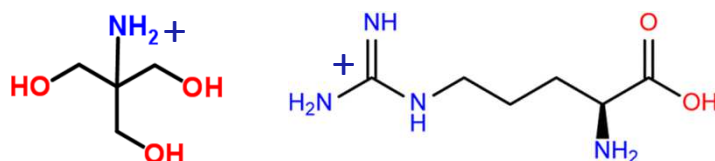


N. Motohashi and Y. Saito, (1993) Chem. Pharm. Bull. 41, 1842-1845.

## II.- Résultats

### II.2.- Rayons X ultra-mous et ADN plasmidique en solution

#### Exemples de captures du radical hydroxyle par le Tris et par l'arginine



**Table 1** Life time and mean diffusion distances of  $\cdot\text{OH}$  radicals under various scavenging conditions for Tris and Arg calculated as a function of their life time (5)

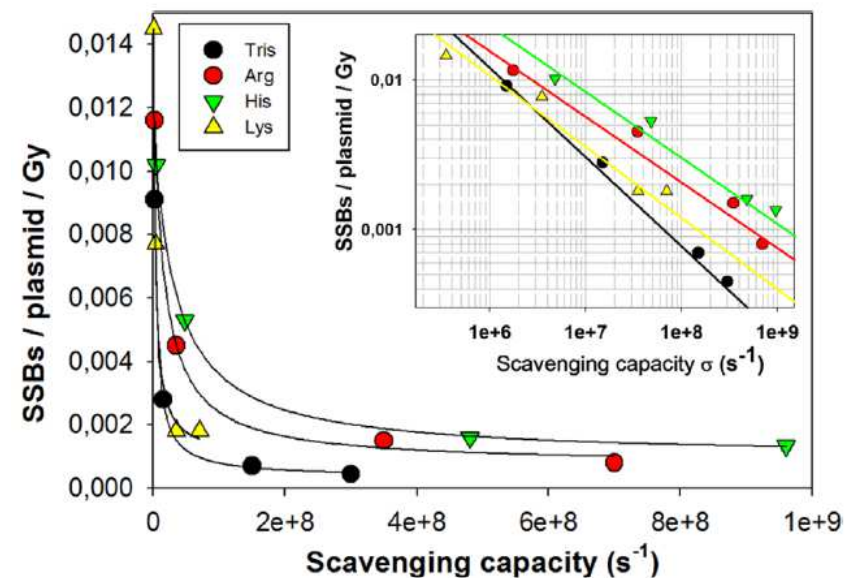
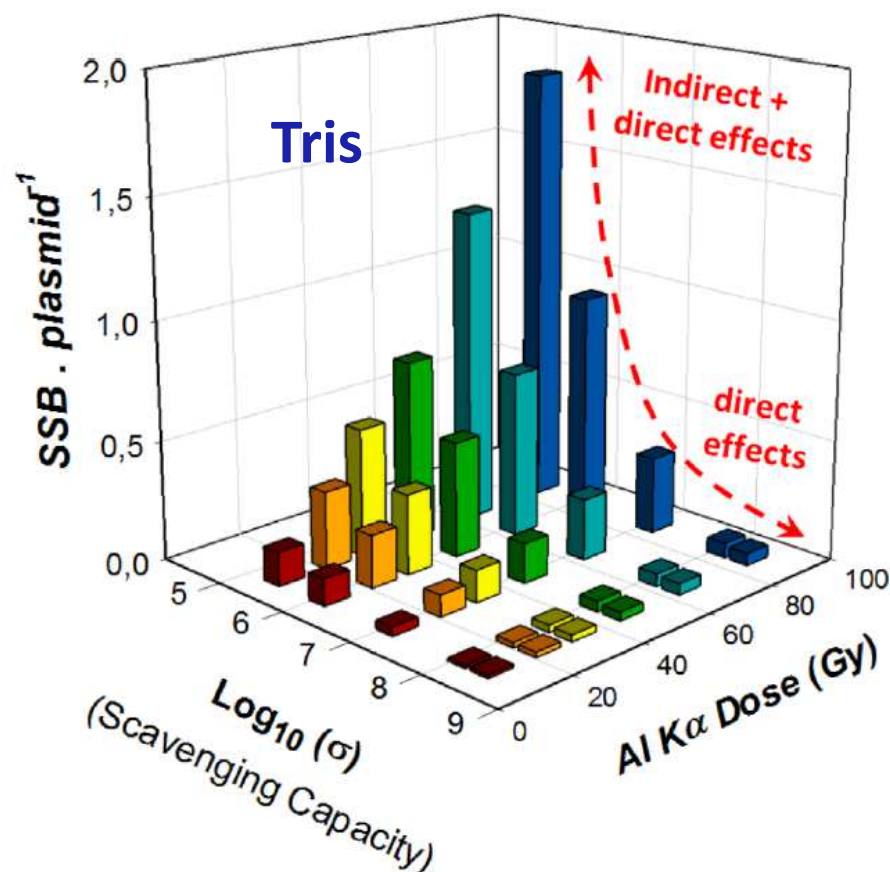
| Scavenger concentration (mM) | Scavenging capacity $\sigma$ ( $\text{s}^{-1}$ ) $\sigma$ | Life time $\cdot\text{OH}$ (s) $\tau = 1/\sigma$ | Mean diffusion distance of $\cdot\text{OH}$ (nm) $\langle x \rangle$ | Mean diffusion distance of plasmid DNA (nm) |
|------------------------------|-----------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|
| <i>Tris</i>                  |                                                           |                                                  |                                                                      |                                             |
| 1                            | $1.5 \times 10^6$                                         | $6.67 \times 10^{-7}$                            | 82.5                                                                 | 3.2                                         |
| 10                           | $1.5 \times 10^7$                                         | $6.67 \times 10^{-8}$                            | 26.1                                                                 | 1.0                                         |
| 100                          | $1.5 \times 10^8$                                         | $6.67 \times 10^{-9}$                            | 8.3                                                                  | 0.3                                         |
| 200                          | $3.0 \times 10^8$                                         | $3.33 \times 10^{-9}$                            | 5.8                                                                  | 0.2                                         |
| <i>Arg</i>                   |                                                           |                                                  |                                                                      |                                             |
| 1                            | $3.5 \times 10^6$                                         | $2.86 \times 10^{-7}$                            | 54.0                                                                 | 2.1                                         |
| 10                           | $3.5 \times 10^7$                                         | $2.86 \times 10^{-8}$                            | 17.1                                                                 | 0.7                                         |
| 100                          | $3.5 \times 10^8$                                         | $2.86 \times 10^{-9}$                            | 5.4                                                                  | 0.2                                         |
| 200                          | $7.0 \times 10^8$                                         | $1.43 \times 10^{-9}$                            | 3.8                                                                  | 0.2                                         |

Estimation of the mean diffusion distance of plasmid DNA during the same time is also reported

## II.- Résultats

### II.2.- Rayons X ultra-mous et ADN plasmidique en solution

Captures du radical hydroxyle par le Tris, l'arginine, la lysine et l'histidine.



Régressions effectuées avec la fonction  $\text{SSB} = (a+b\sigma)/(1+c\sigma)$

|      | a      | b                       | c                      | R <sup>2</sup> | $\xi$ (% I.E.) |
|------|--------|-------------------------|------------------------|----------------|----------------|
| Tris | 0.0126 | $9.1850 \cdot 10^{-11}$ | $2.6513 \cdot 10^{-7}$ | 0.9999         | 97.2           |
| Arg  | 0.0128 | $4.6129 \cdot 10^{-11}$ | $6.2330 \cdot 10^{-8}$ | 0.9987         | 94.2           |
| His  | 0.0115 | $2.8641 \cdot 10^{-11}$ | $2.9956 \cdot 10^{-8}$ | 0.9999         | 91.7           |
| Lys  | 0.0163 | $3.6150 \cdot 10^{-10}$ | $3.6804 \cdot 10^{-7}$ | 0.9987         | 94.0           |

94.7 $\pm$ 2.1%

Tomita et al. (1995) ont mesuré 97.7% avec des  $\gamma$  et des solutions congelées

### III.- Conclusions et perspectives

- Réalisation de dépôts nanométriques calibrés en épaisseur et mesures de données (sections efficaces absolues, longueurs d'atténuation), obtention de renseignements sur l'effet de l'environnement chimique proche de l'ADN,
- Exposition de solution aqueuses d'ADN plasmidique aux RX ultra-mous avec capture de radicaux (détermination des % d'effets indirects).
- Utilisation de couches nanométriques pour exposition à des faisceaux de protons dans le vide (sections efficaces rendements radiolytiques et taux de cassures simples et doubles dans la région du pic de Bragg),
- Utilisation de couches nanométriques où l'ADN est complexé à Arg, His, Lys pour exposition aux EBE et étude de la désorption stimulée,
- Utiliser l'ADN plasmidique comme sonde en présence de capteurs spécifiques de radicaux pour comprendre l'effet radio sensibilisant des nanoparticules d'or pour la radiothérapie,
- .....



**Faculté de médecine et des sciences de la santé**  
**Département de médecine nucléaire et**  
**radiobiologie**



Pr Léon Sanche



Dr Pierre Cloutier



Dr Andrew Bass



Dr Talat T Khalil



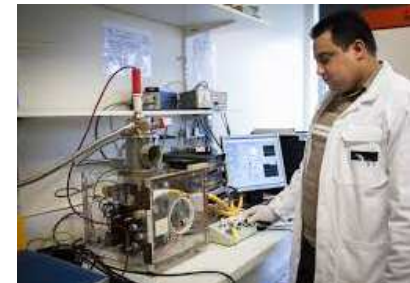
Dr Omar  
Boulanouar



Pr Frank Palmino  
FEMTO-ST



Ouiza Manseur



Dr Mounir Souici