

Phénomènes pré-disruptifs dans les liquides

Olivier LESAINT

*Laboratoire de Génie Electrique de Grenoble (G2E lab)
CNRS / Grenoble INP / Université Grenoble Alpes*

- ✓ Laboratoire de Génie Electrique de Grenoble (Section 08 CNRS)
- ✓ Equipe « Matériaux Diélectriques et Electrostatique »
 - matériaux pour le génie électrique

Activités en lien avec les plasmas

- **Décharges dans les liquides** (*N. Bonifaci, O. Lesaint, A. Denat*)
 - Isolation THT: propriétés fonctionnelles des liquides
 - Phénomènes pré-disruptifs
 - Caractérisation « large spectre »
 - processus de base (liquides cryogéniques)
 - Procédés (décharges dans l'eau) : dépollution, extraction (matière végétales)
- **Décharges dans les gaz** (*N. Bonifaci, O. Lesaint, R. Hanna*)
 - SF₆, HFO: Isolation THT, propriétés fonctionnelles
 - micro-gaps (< 1 μm): composants de protection intégrés

Phénomènes pré-disruptifs dans les liquides

✓ Des différences marquées avec les gaz...

* **densité élevée** \Rightarrow **champs locaux très élevés (initiation, tête décharge) ≈ 10 MV/cm**

➤ avalanches électroniques en phase liquide ≈ 7 MV/cm (cyclohexane), taille $\approx \mu\text{m}$

➤ d'autres mécanismes possibles ?

- ionisation de champ ? (Halpern & Gomer: hydrocarbures ≈ 15 MV/cm)
- dissociation renforcée par le champ ? (Onsager)

* liquides « standards » (hydrocarbures, eau):

\Rightarrow pas de porteurs de charge rapides en phase liquide

durée de vie électrons ≈ 10 ps, \rightarrow ions ($E < 2$ MV/cm)

Phénomènes pré-disruptifs dans les liquides

✓ Des différences marquées avec les gaz...

* pas de propagation possible sans changement de phase liquide → gaz

⇒ Phase gazeuse transitoire, hors d'équilibre, conditions extrêmes ...

* des paramètres supplémentaires

- Permittivité ϵ (80 dans l'eau)

- Conductivité (temps de relaxation dans l'eau 1mS/cm : 7 ns)

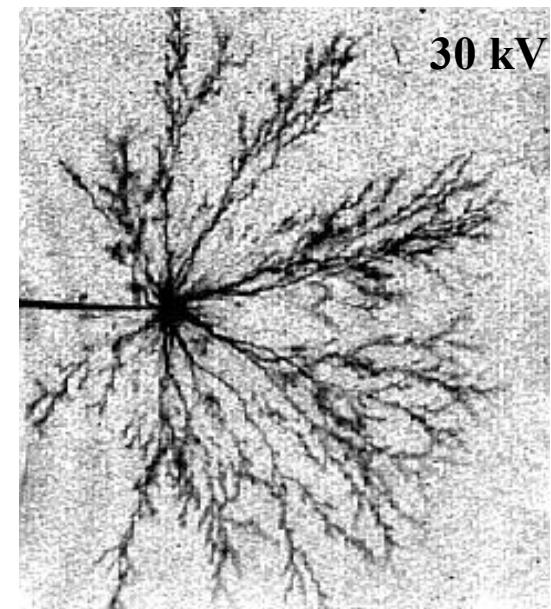
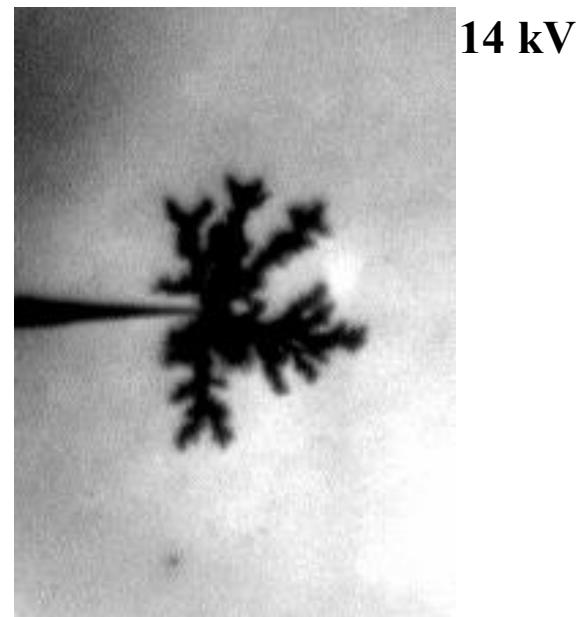
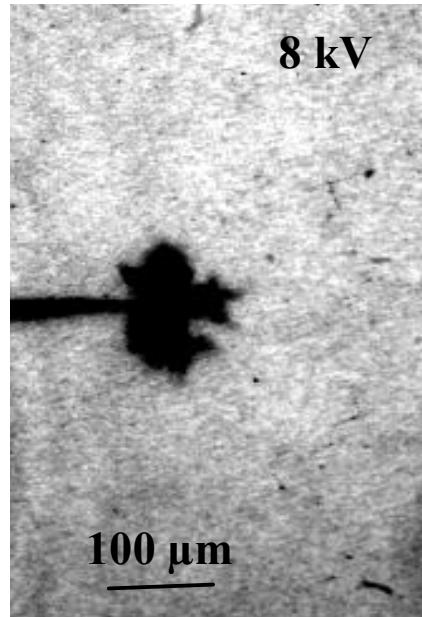
- large variété de liquides, rôle important d'additifs

* pas de modèles prédictifs (très partiels)

- I - Phénoménologie phénomènes prédisruptifs
 - caractères génériques: « modes » de propagation
 - cas de l'eau
 - Nature du liquide et additifs
- II - Nature gazeuse des canaux, influence de la pression
 - Caractérisation expérimentale, corrélation pression-vitesse
 - Représentation schématique, hypothèses, questions ...
- III - Propriétés électriques « macroscopiques » des canaux
 - Courant, paramètres
 - Cas de l'eau
- IV – Génération des streamers
 - Hydrocarbure non-polaire: cyclohexane
 - eau

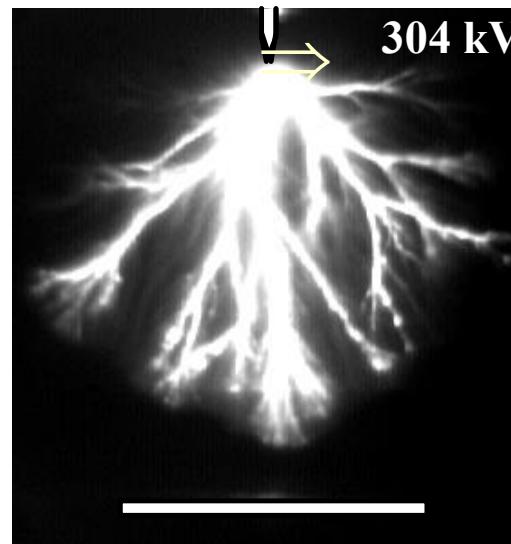
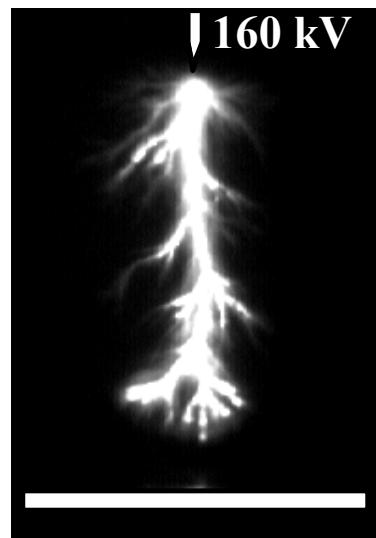
I - une large variété de phénomènes ...

0.1 km/s
« 1er mode »

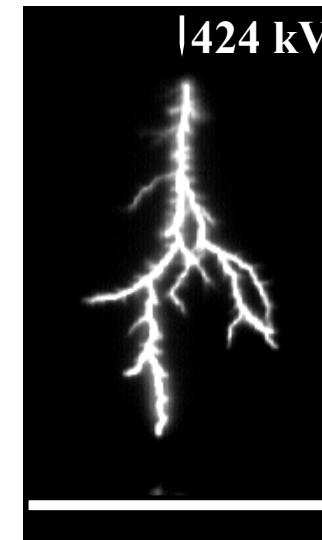


2 km/s
« 2nd mode »

2 km/s
« 2nd mode »



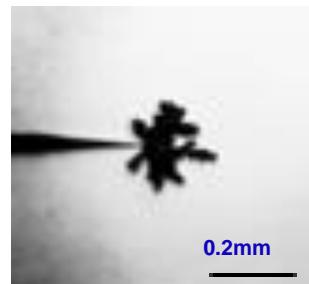
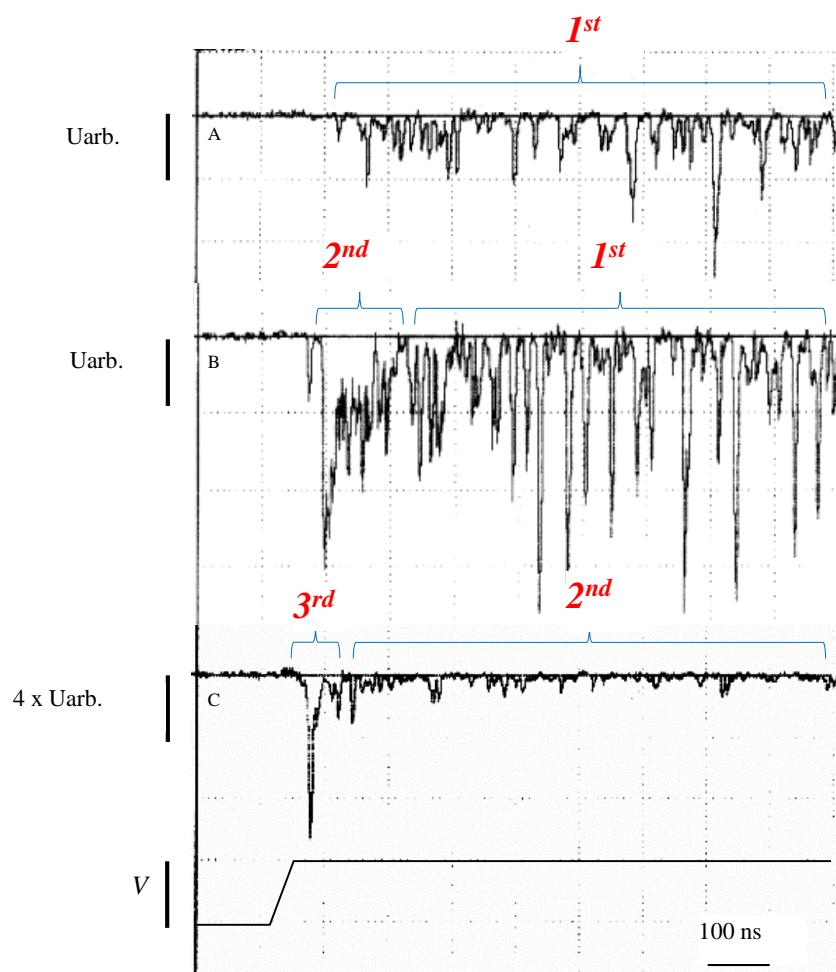
10 km/s
« 3rd mode »



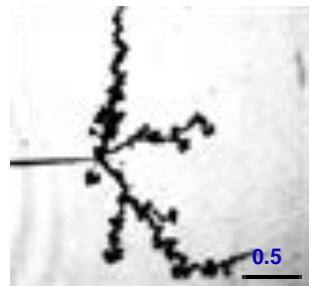
> 100 km/s
« 4ème mode »

- ✓ Terme générique “streamer” → très inapproprié !!
- ✓ “Modes”: typologie descriptive (vitesse, ...)

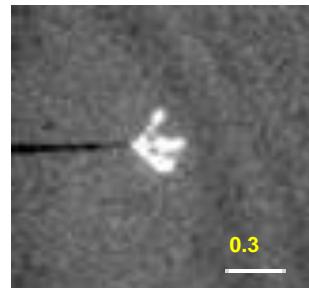
I – “modes” : exemple cyclohexane



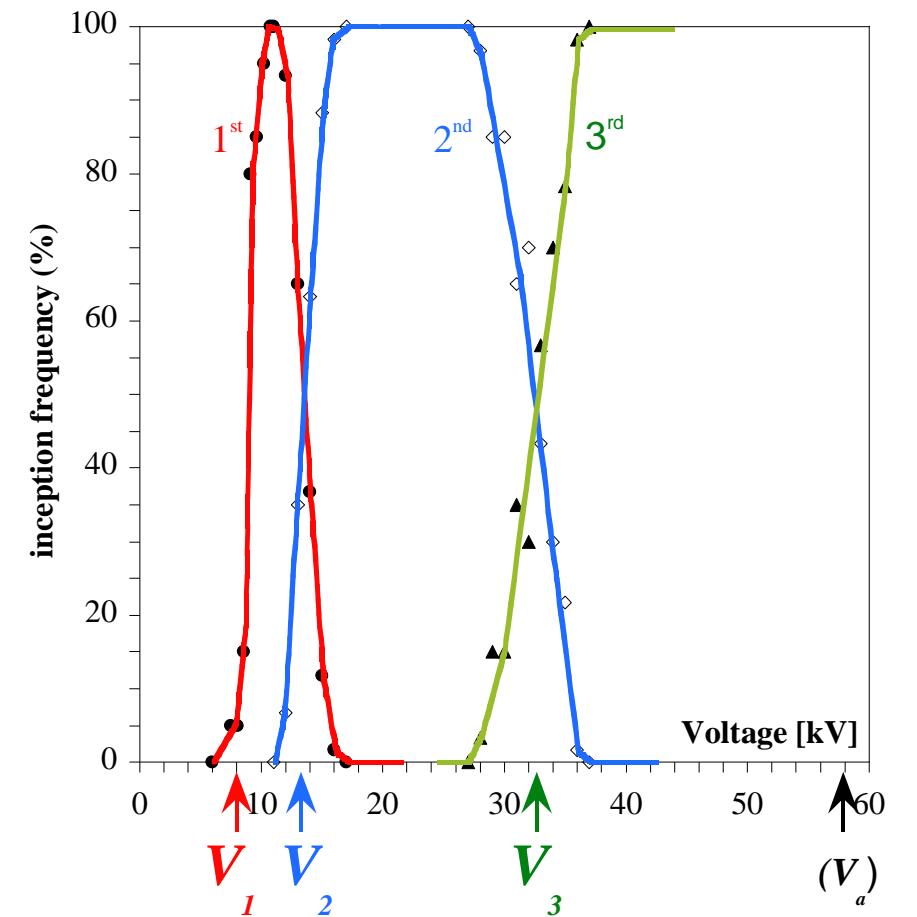
1st mode
 $V = V_2 = 14$ kV



2nd mode
 $V = V_2 = 14$ kV

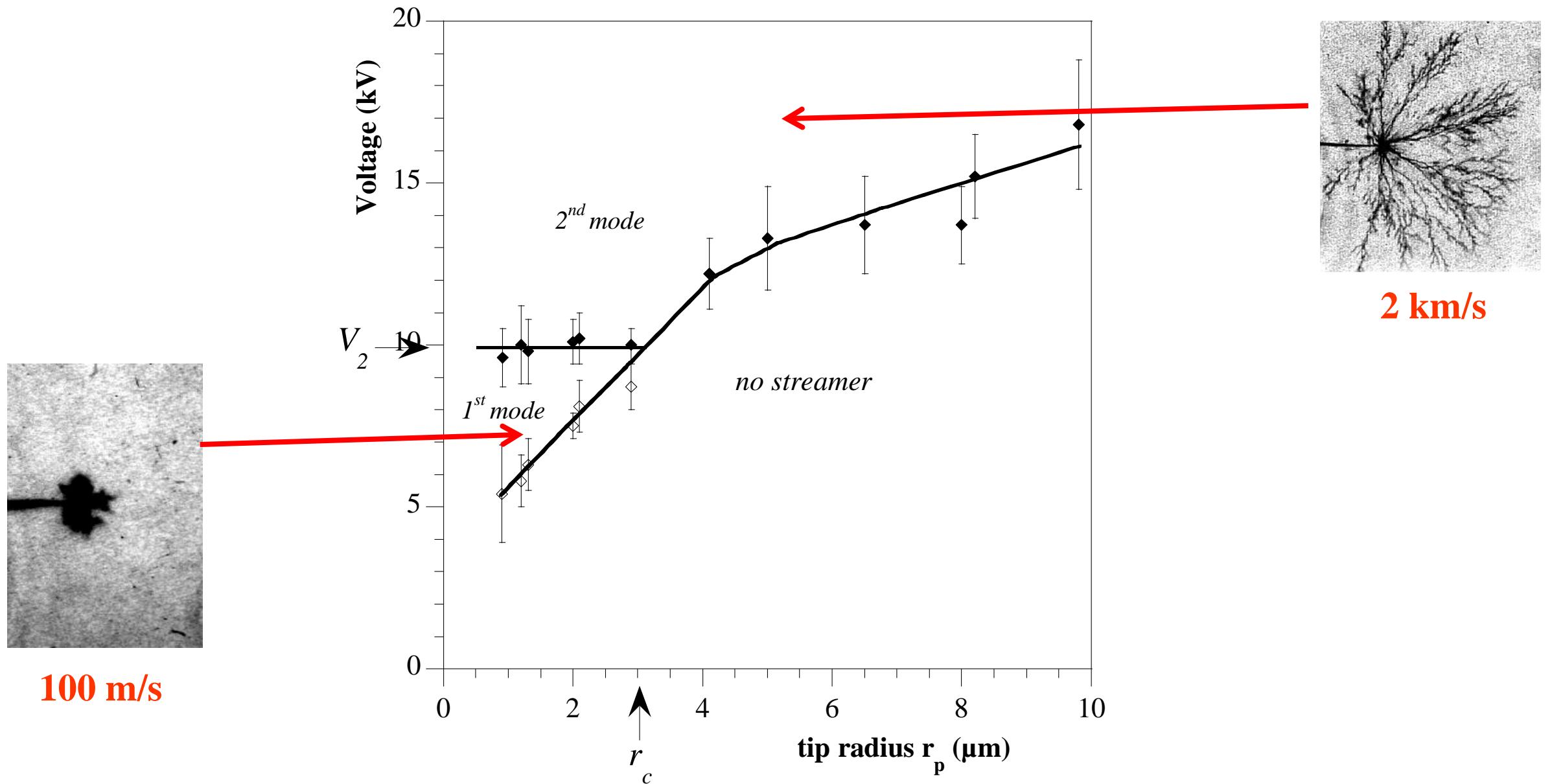


3rd mode
 $V = 36$ kV



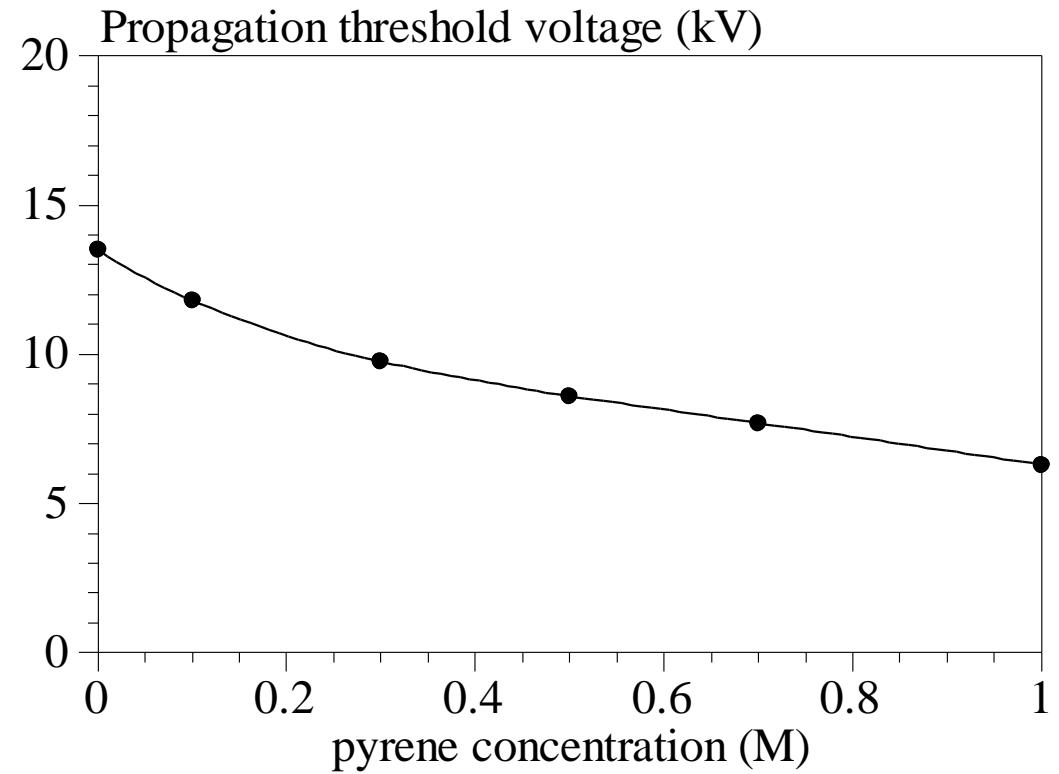
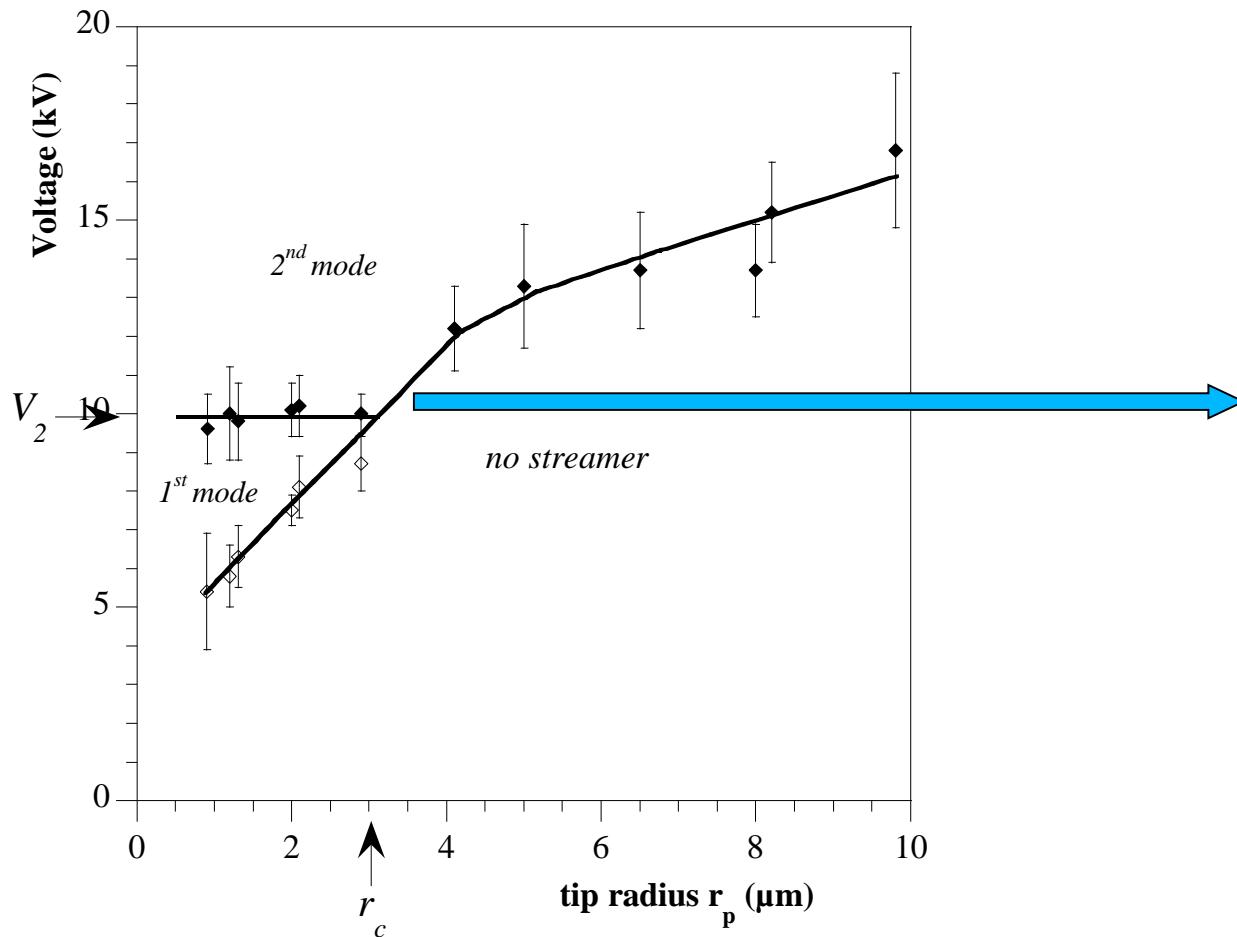
✓ Clairement observable uniquement sous front raide ($t_{\text{montée}} \approx 10$ ns)

I - exemple: transition 1^{er} / 2^{ème} mode (pentane)

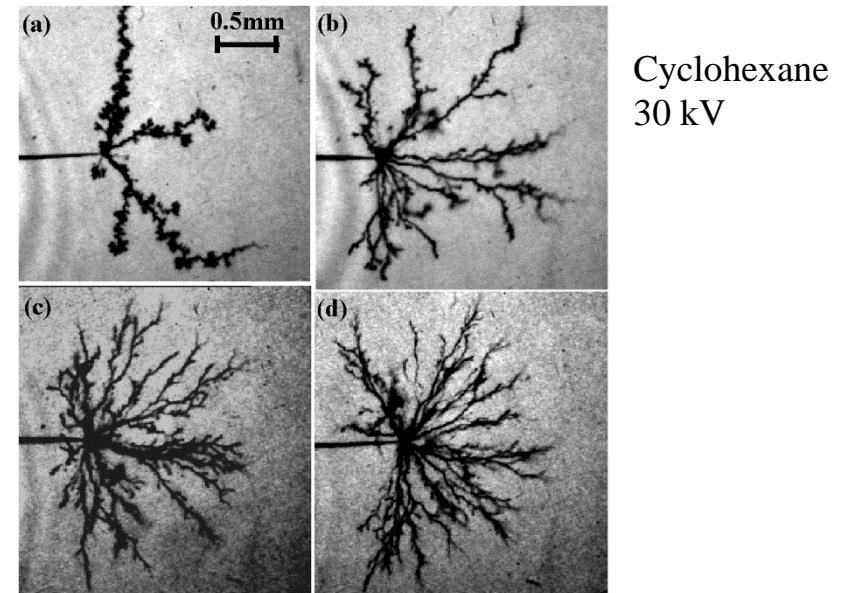


- ✓ transition \Leftrightarrow seuil de propagation V_2
 - \rightarrow paramètre caractéristique de la formation de filaments

I – rôle additifs ionisables (pyrène, $E_i \approx 7$ eV)

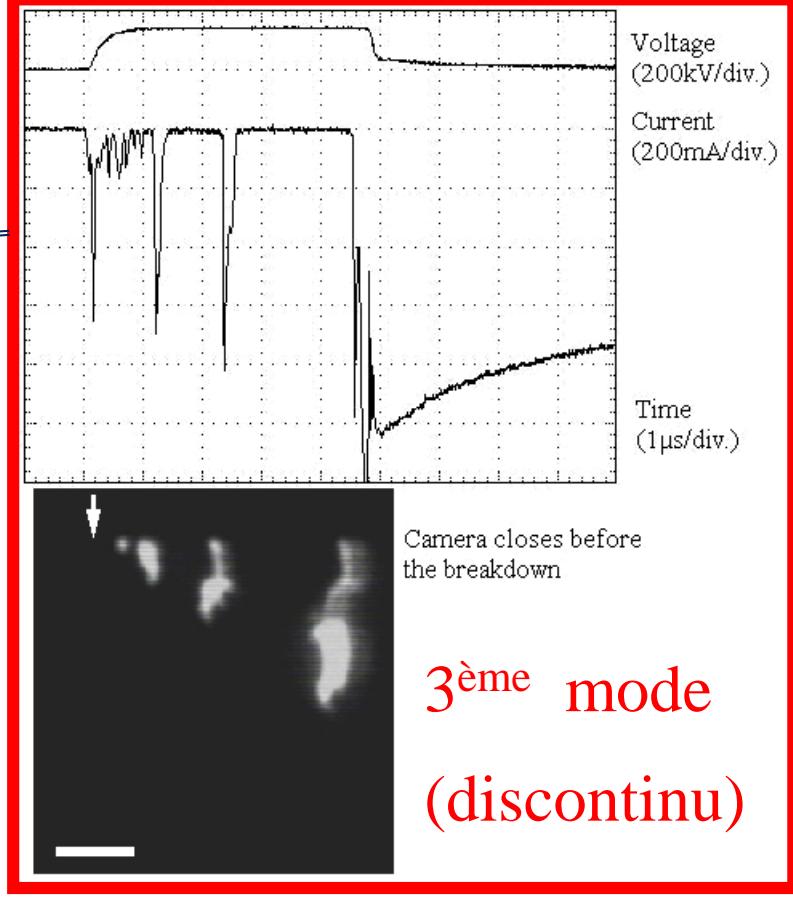
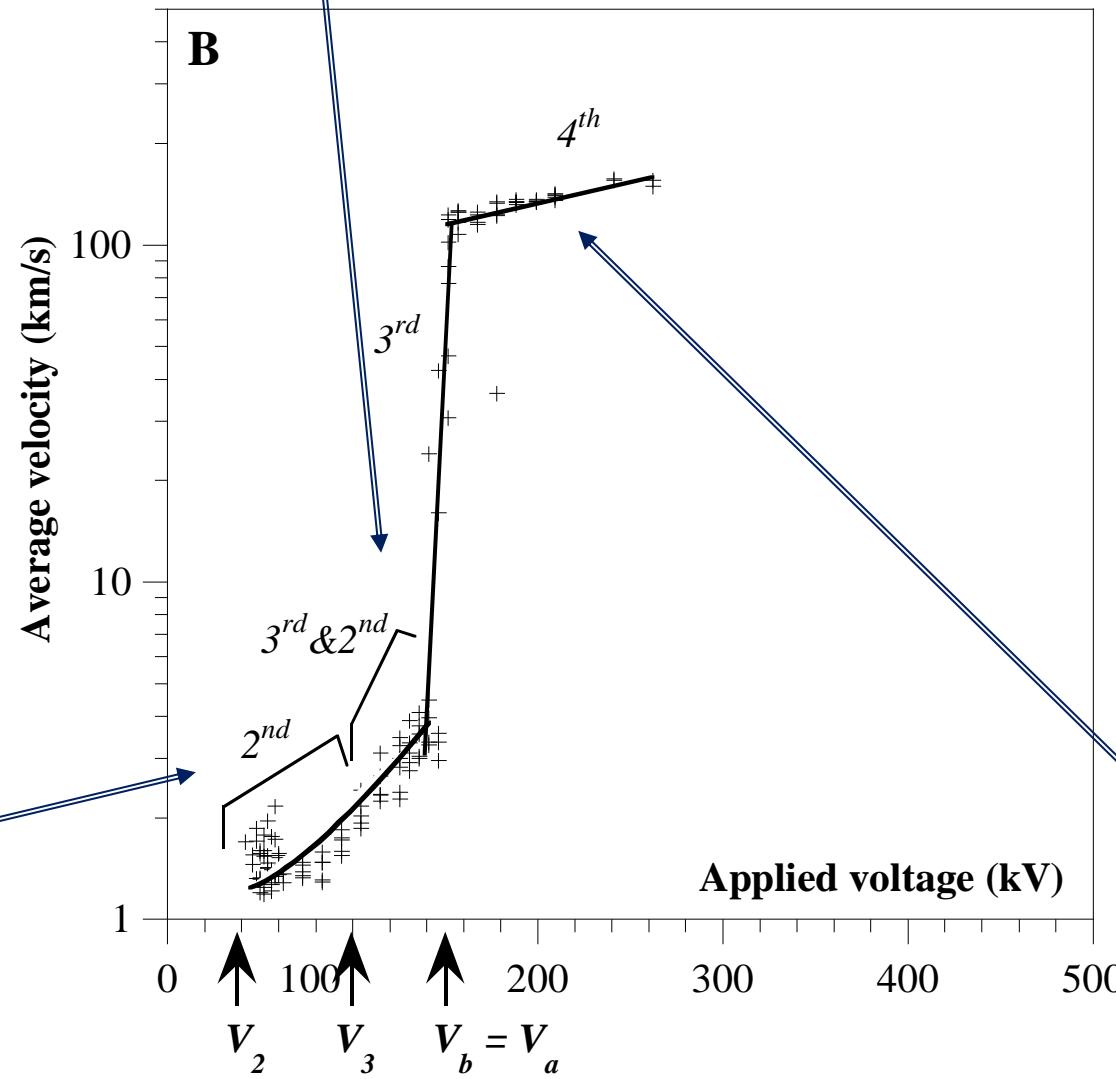
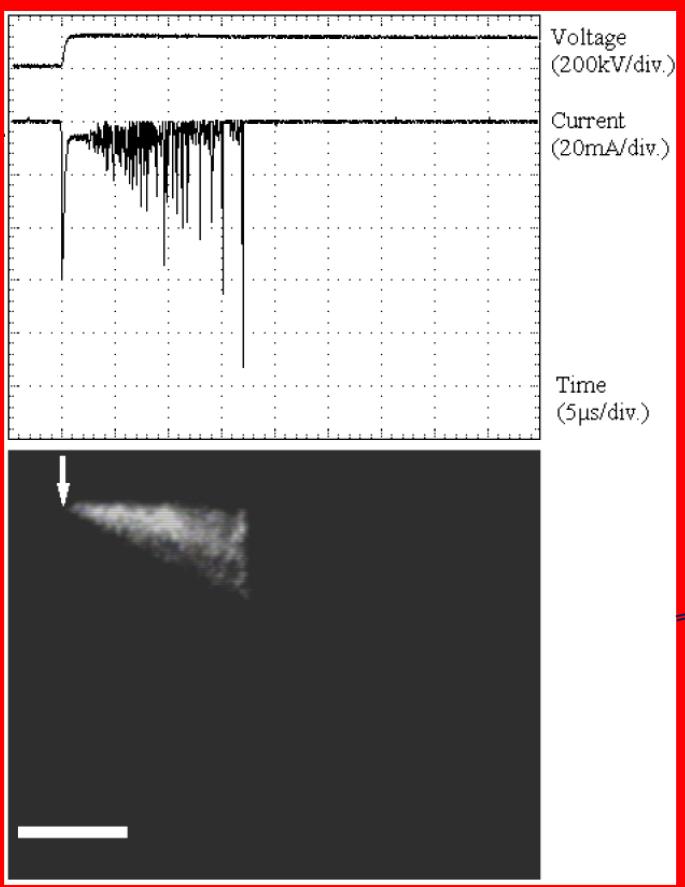


- ✓ seuil de propagation $V_2 \downarrow$
- ✓ ramification fortement accentuée
- ✓ streamers “auto-stabilisants”



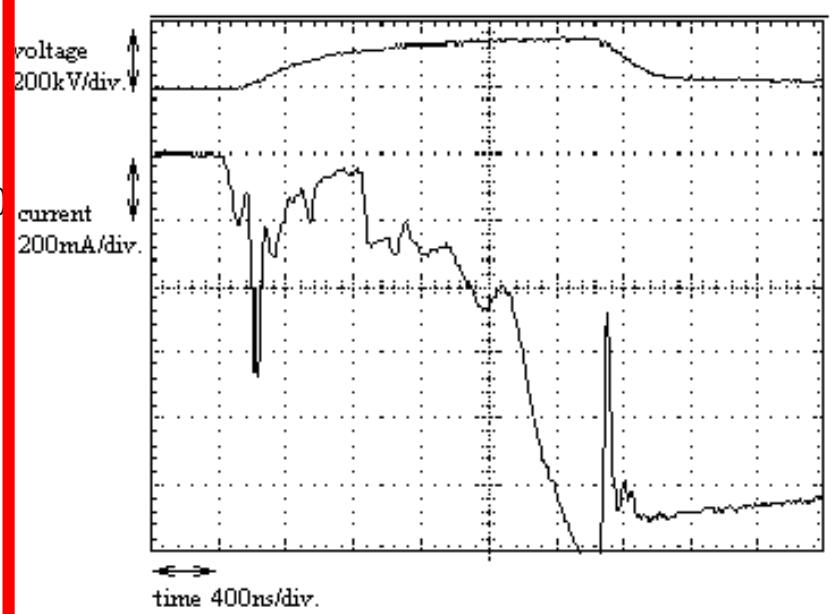
I – transition 2/3/4^{ème} modes: ester naturel

2^{ème} mode (continu)

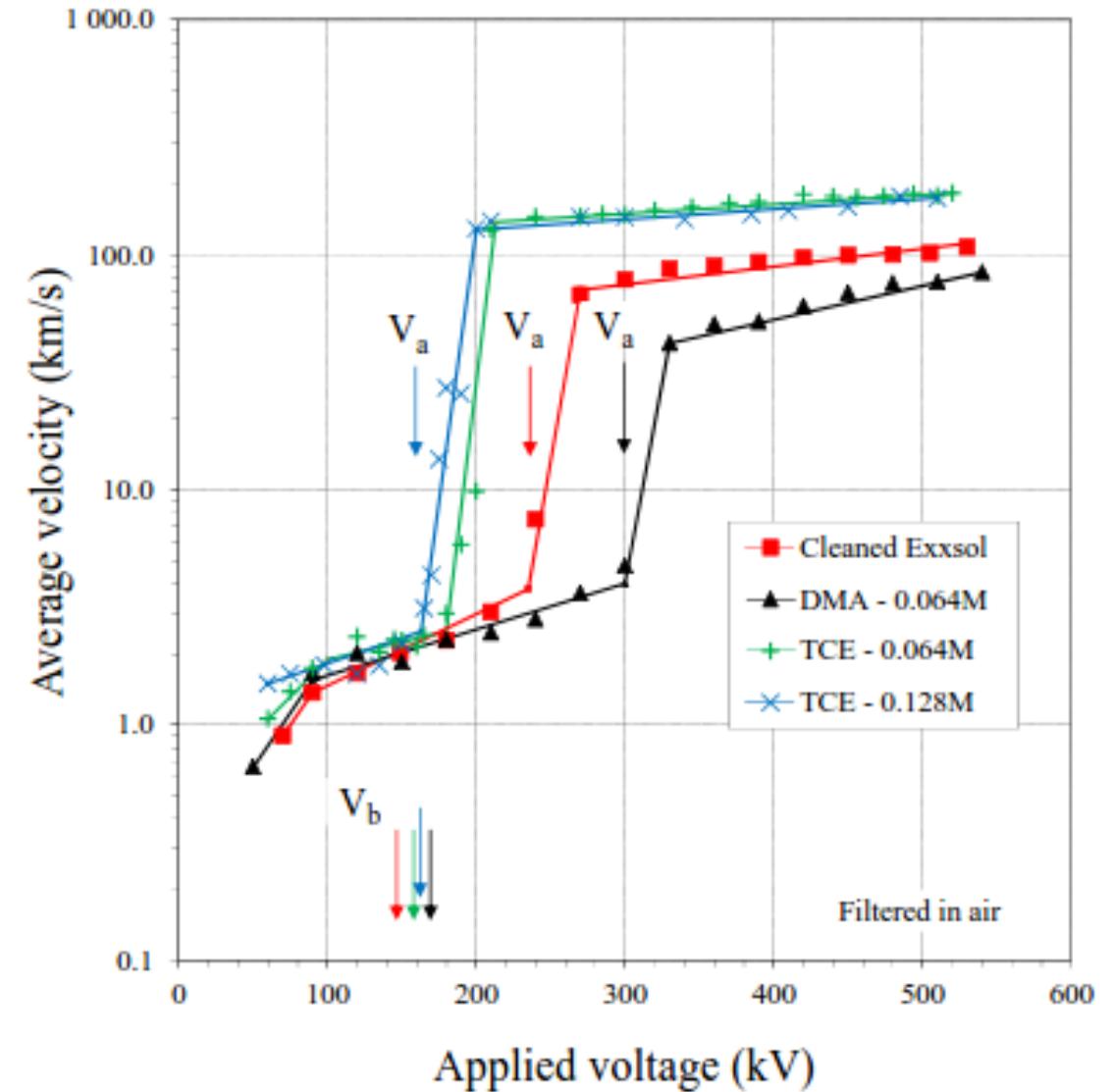
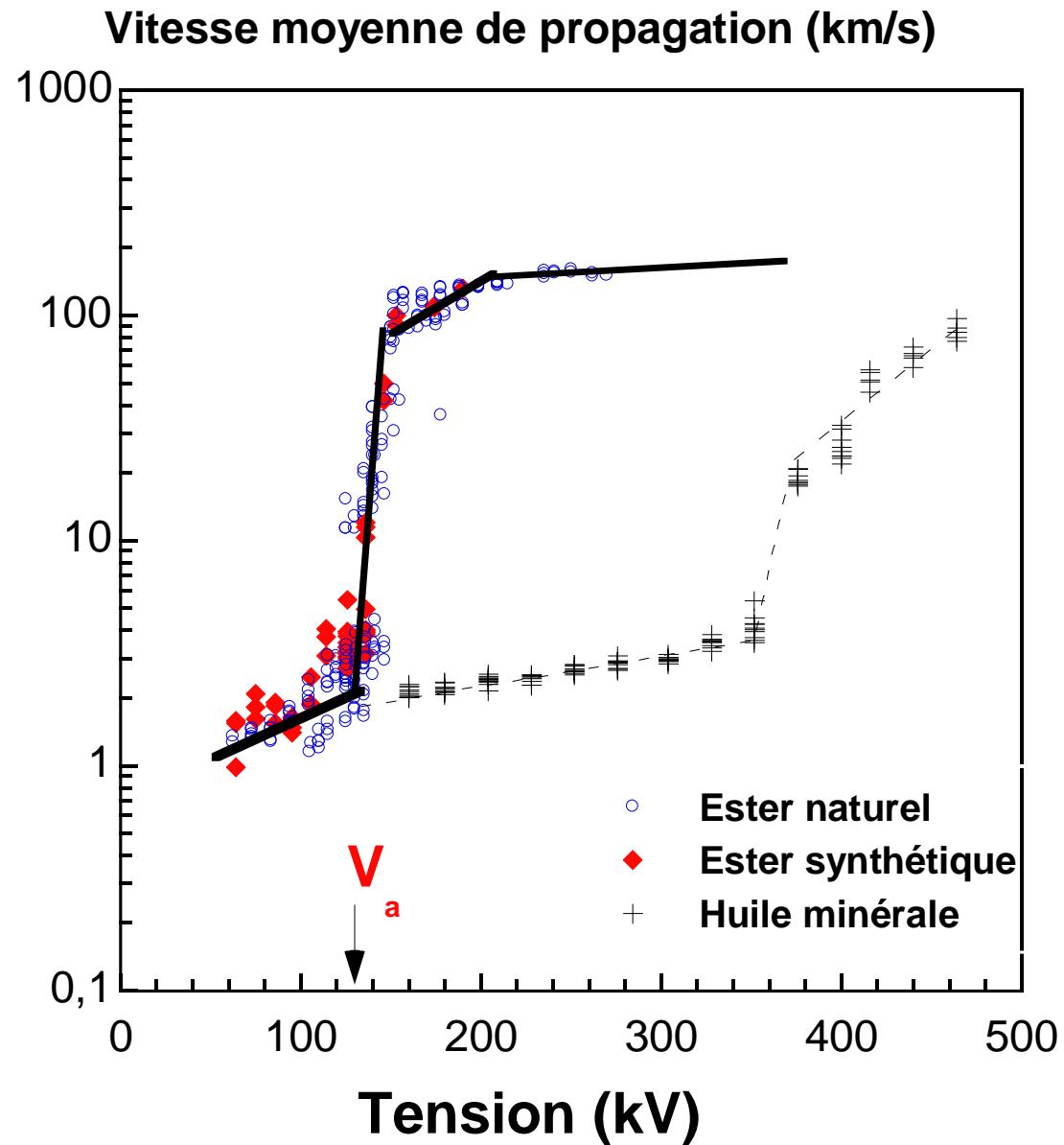


3^{ème} mode (discontinu)

4^{ème} mode

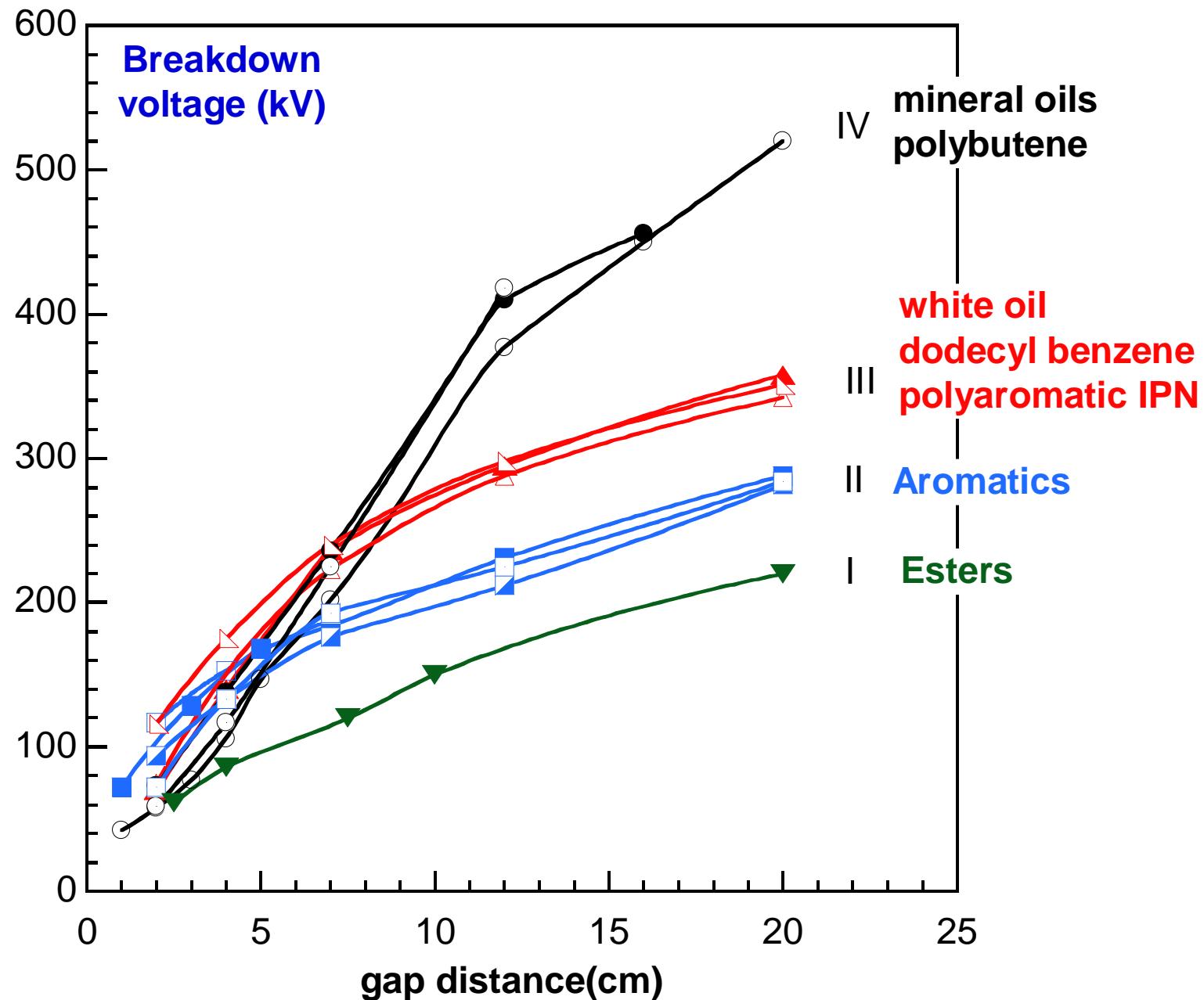


I – Modes, nature du liquide et additifs



✓ Très sensible à la nature du liquide & additifs

I – applications: propriétés fonctionnelles de liquides non-polaires pour l'isolation électrique



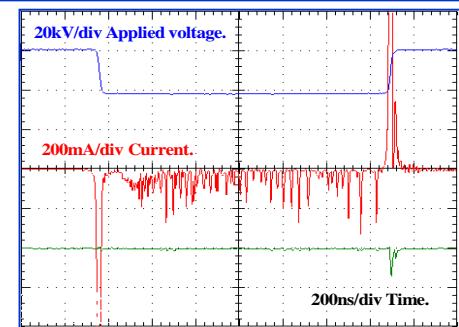
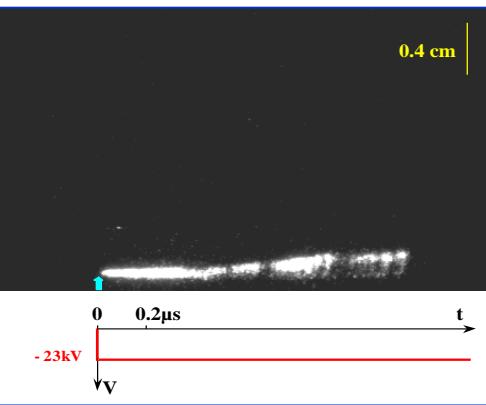
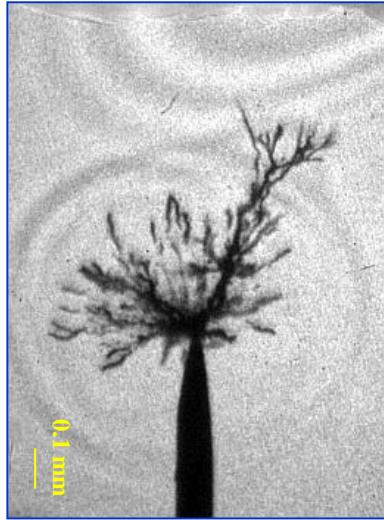
✓ Forte sensibilité à la nature du liquide & additifs

→ Paramètres « streamers » utiles pour le dimensionnement

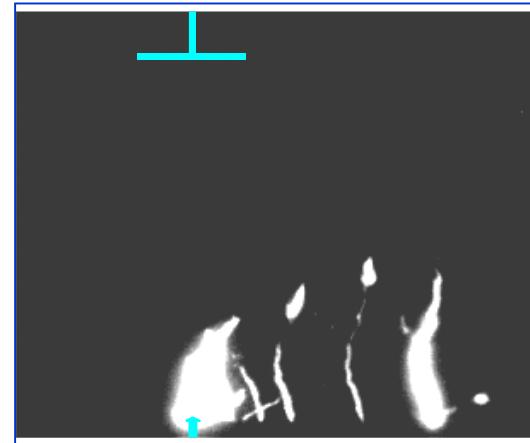
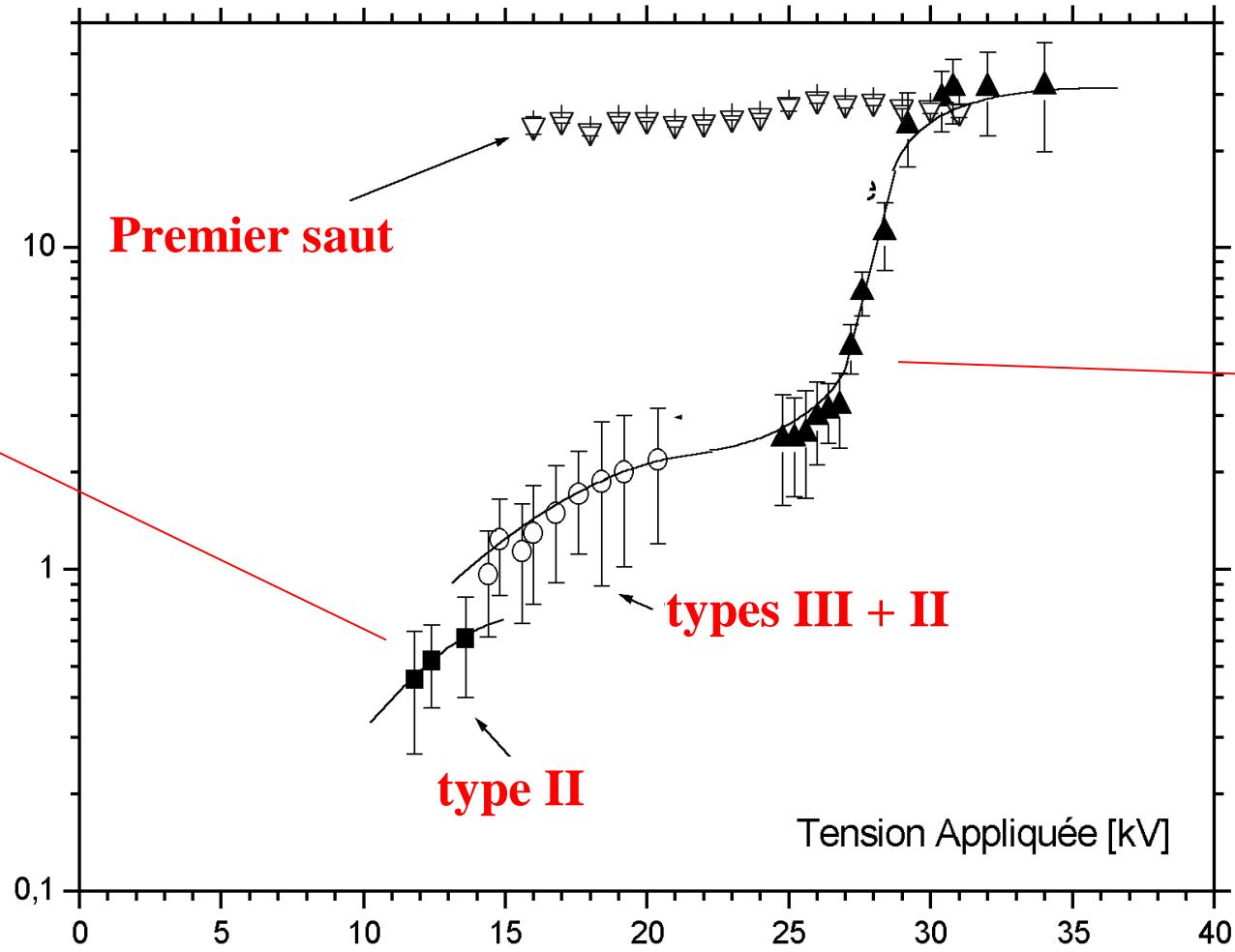
I - autre exemple: eau

$$\epsilon = 80$$

$$\sigma = 0,1 - 1000 \mu\text{S/cm}$$



Vitesse moyenne (km/s)



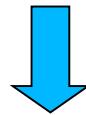
- ✓ “modes” comparables
- ✓ Tensions d'apparition <<

- I - Phénoménologie phénomènes prédisruptifs
 - caractères génériques: « modes » de propagation
 - cas de l'eau
 - Nature du liquide et additifs
- II - Nature gazeuse des canaux, influence de la pression
 - Caractérisation expérimentale, corrélation pression-vitesse
 - Représentation schématique, hypothèses, questions ...
- III - Propriétés électriques « macroscopiques » des canaux
 - Courant, paramètres
 - Cas de l'eau
- IV – Génération des streamers
 - Hydrocarbure non-polaire: cyclohexane
 - eau

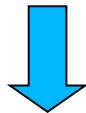
II - Nature gazeuse, processus élémentaire: génération d'une cavité par une avalanche électronique

- pointe-plan ($r_p \approx 0.5 - 10 \mu\text{m}$)
- hydrocarbures ultra purs, pointe négative
- impulsions de courant indépendantes de la pression → 250 bars

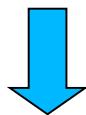
$E > 7\text{MV/cm}$



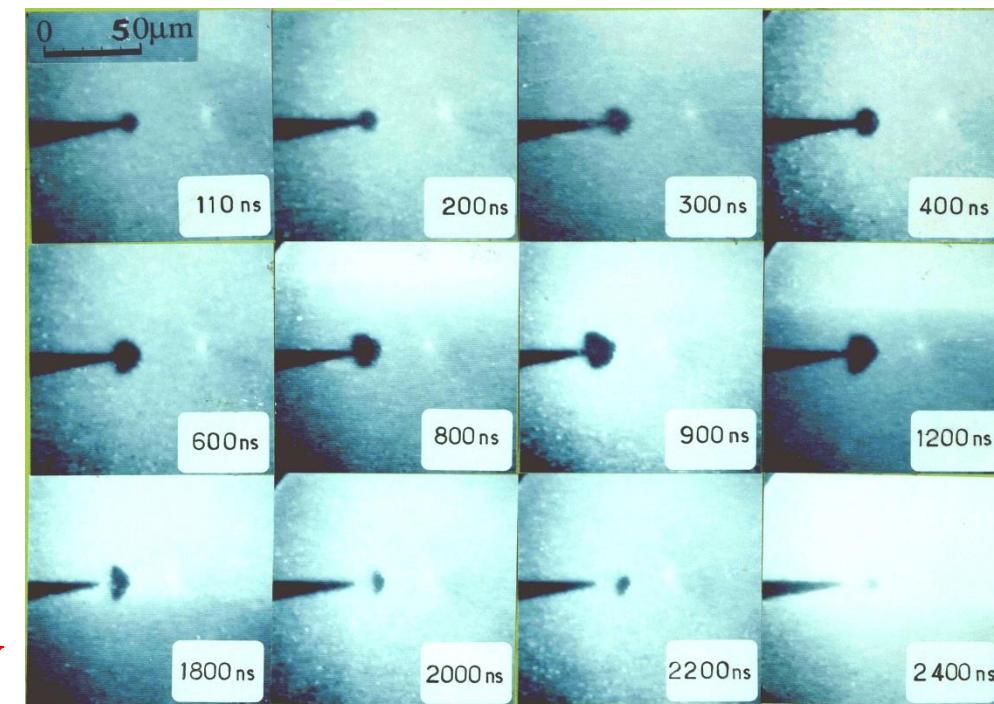
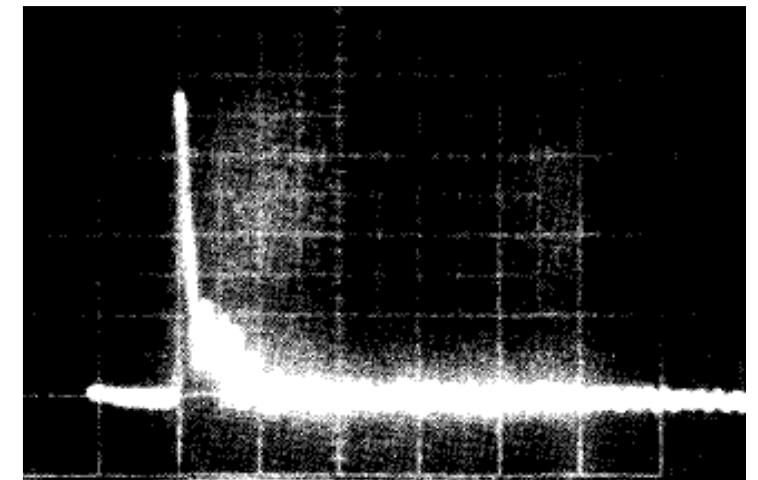
Avalanche électronique en phase liquide



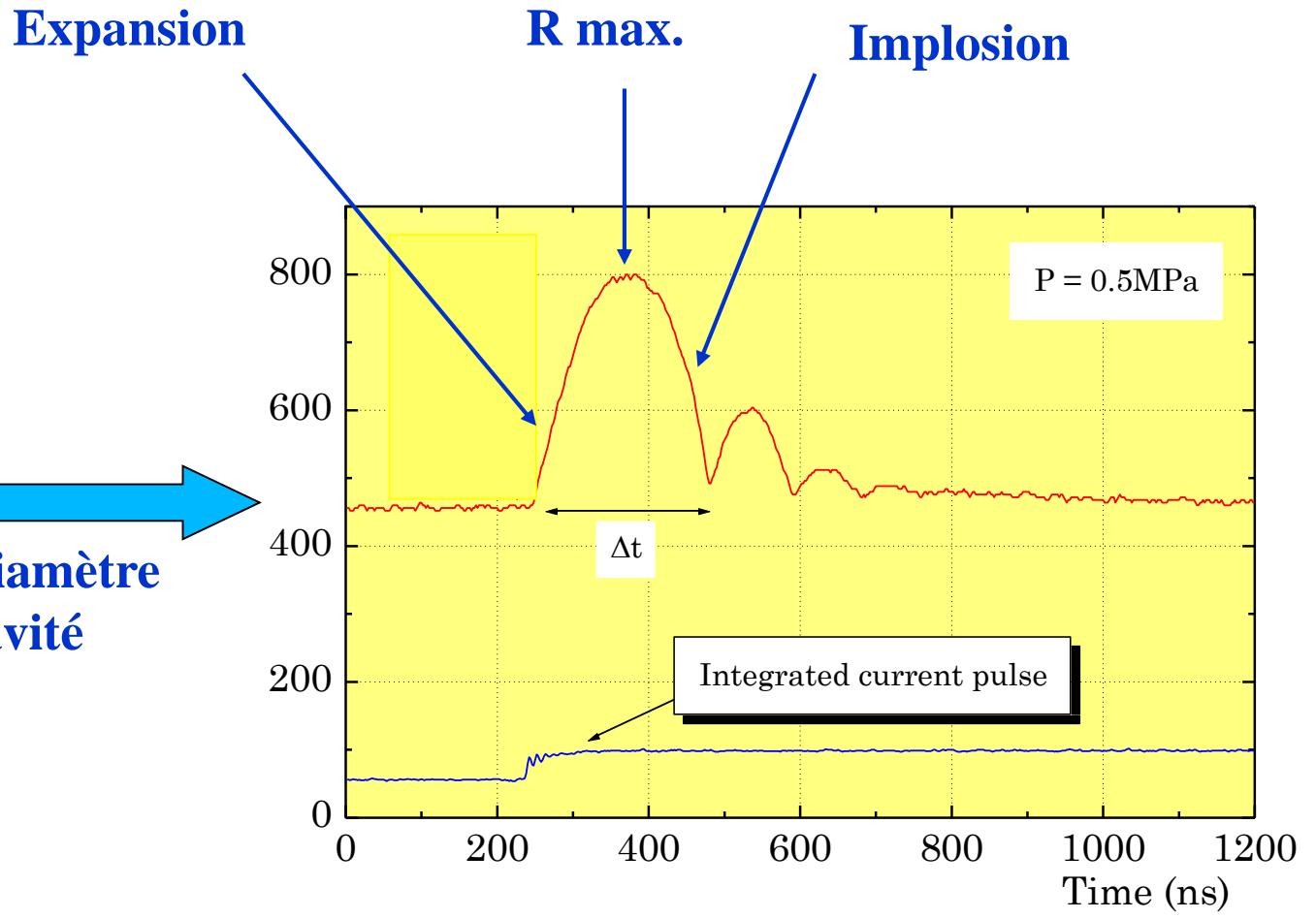
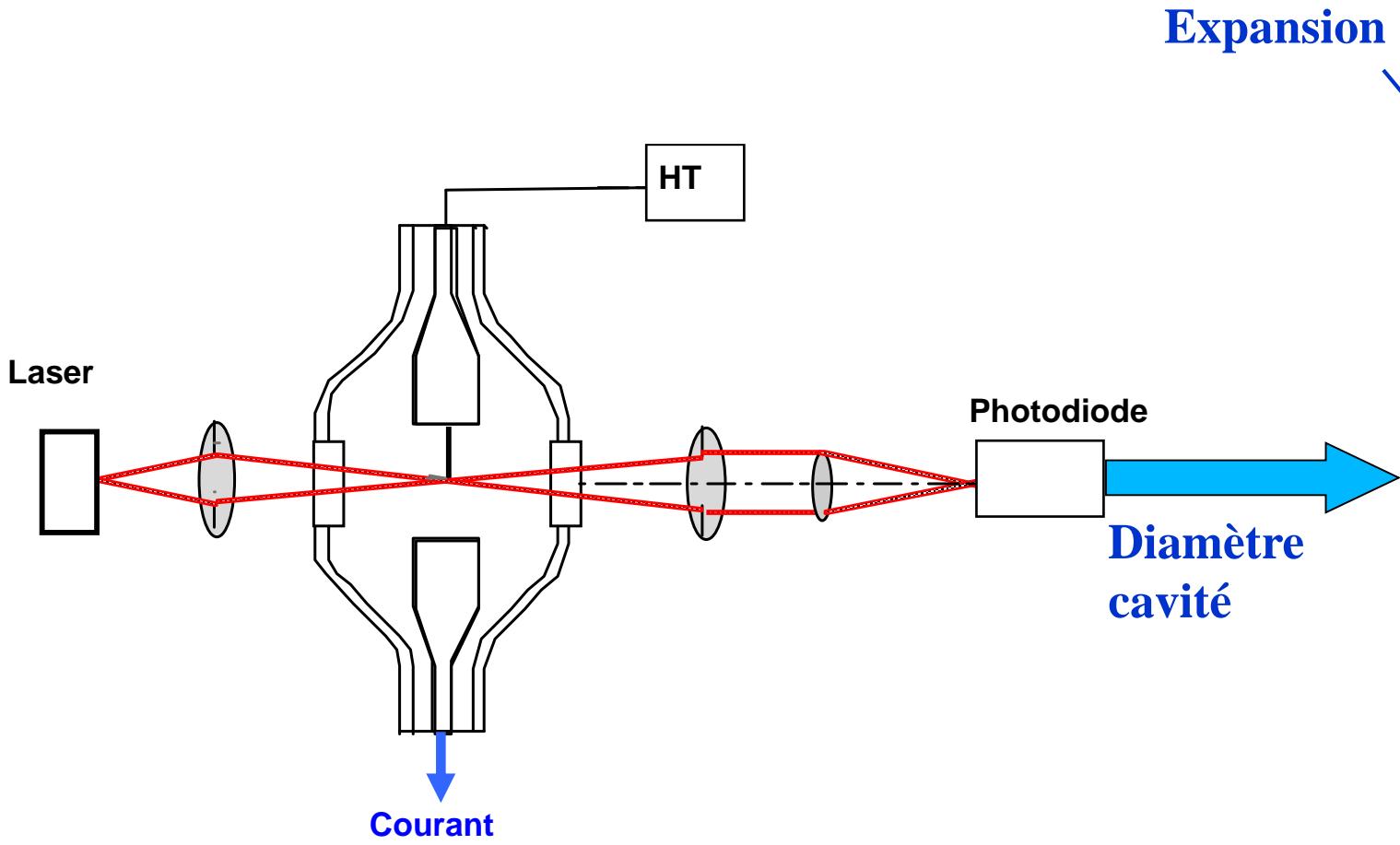
Onde de choc



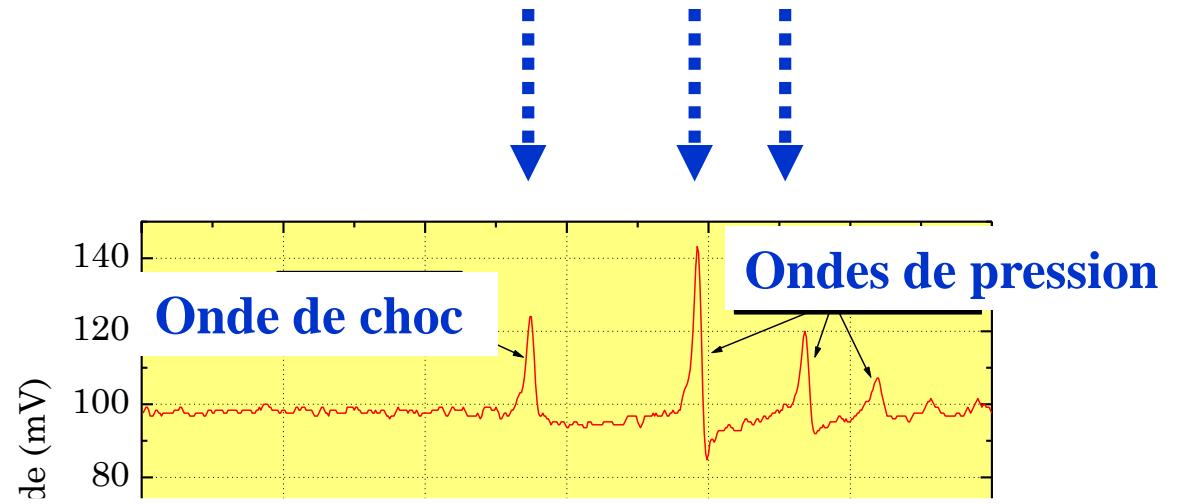
génération d'une cavité gazeuse



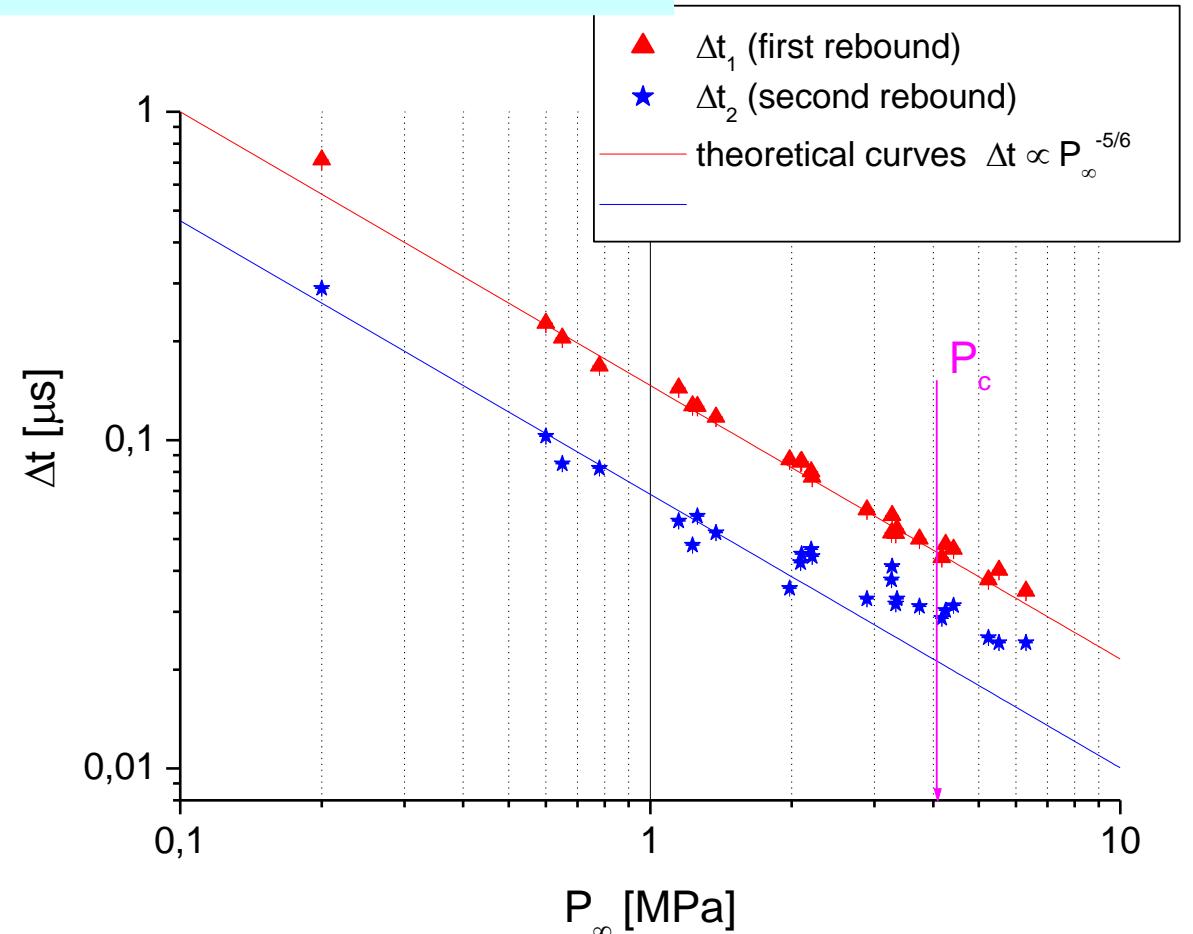
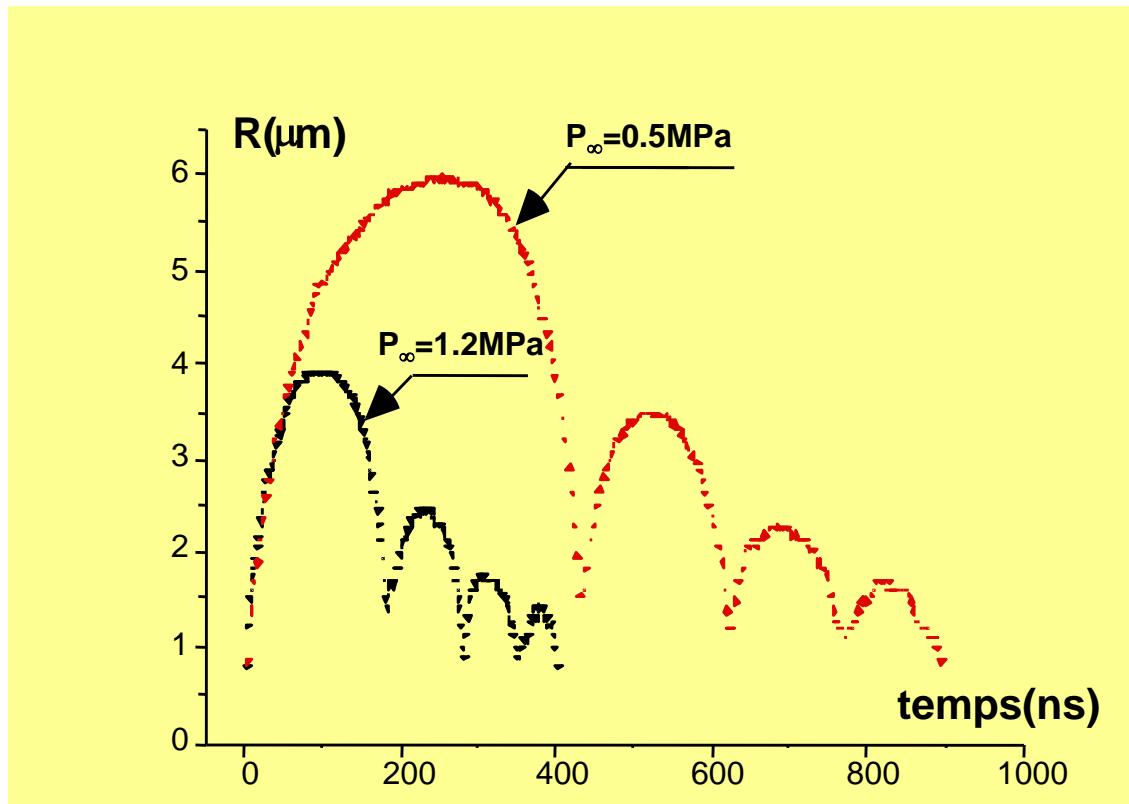
II - nature gazeuse: dynamique cavité (diffusion laser \approx ns)



→ Dynamique \approx bulle de cavitation



II - cavitation: modèle hydrodynamique

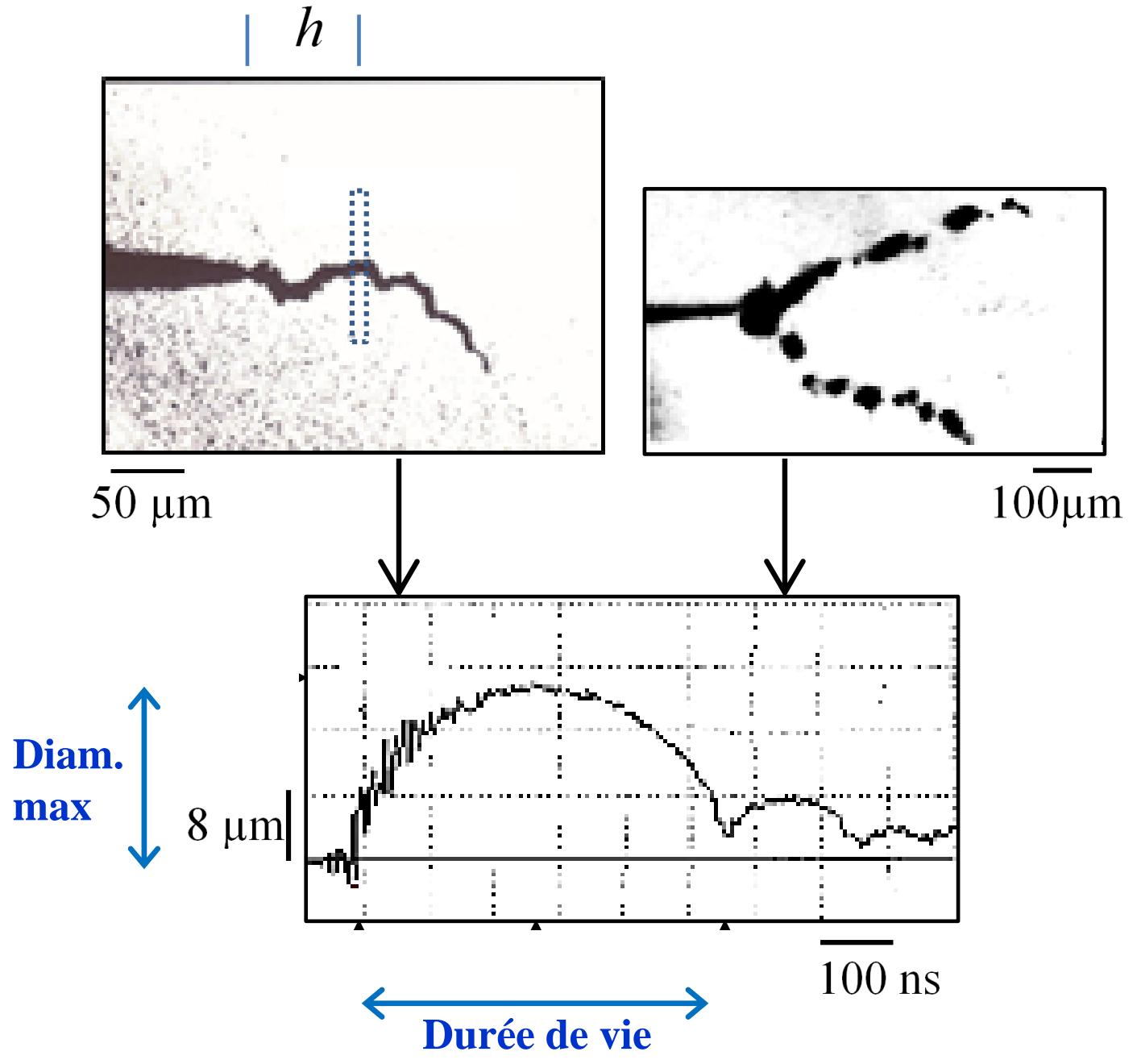
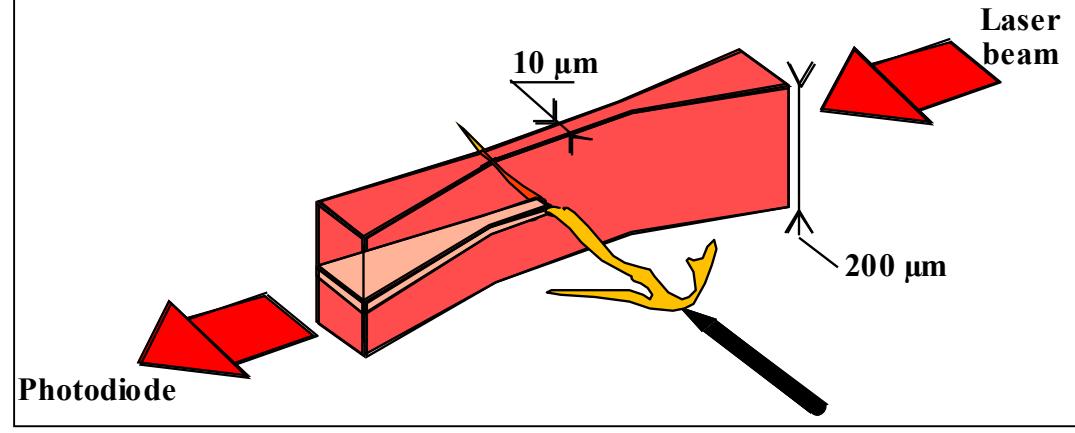


Modèle de Rayleigh (incompressible, non visqueux, bulle vide) $\Delta t = 0,91468 * R_{ray} * \sqrt{\frac{\rho_\infty}{P_\infty}}$

Bilan énergétique (volume de liquide vaporisé) W_i – énergie injectée $R_w = k \left(\frac{W_i}{P_\infty} \right)^{1/3}$

- ✓ Dynamique → **inertie du liquide**
- ✓ forces électriques → **effet négligeable**
- ✓ cavité → **essentiellement constituée de vapeur**

II - nature gazeuse: canaux "2^{ème} mode"



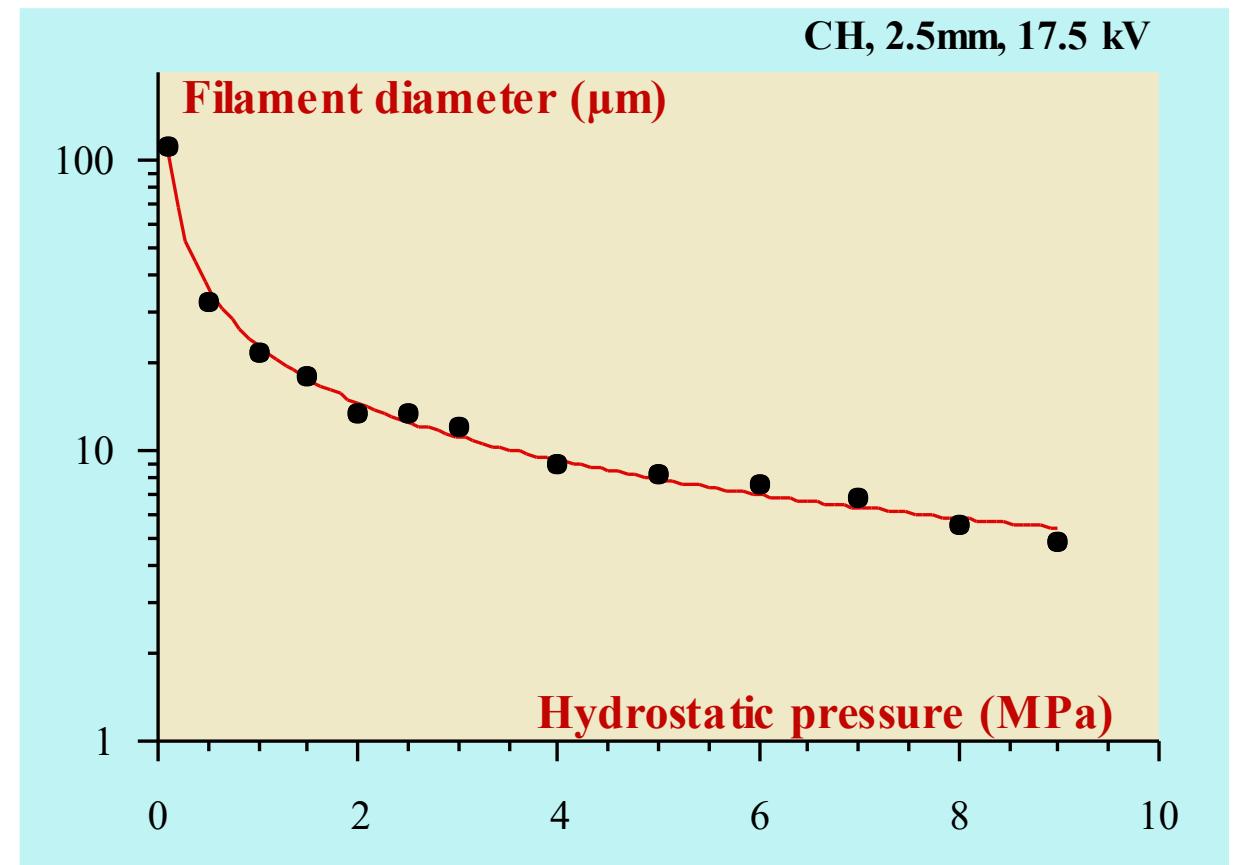
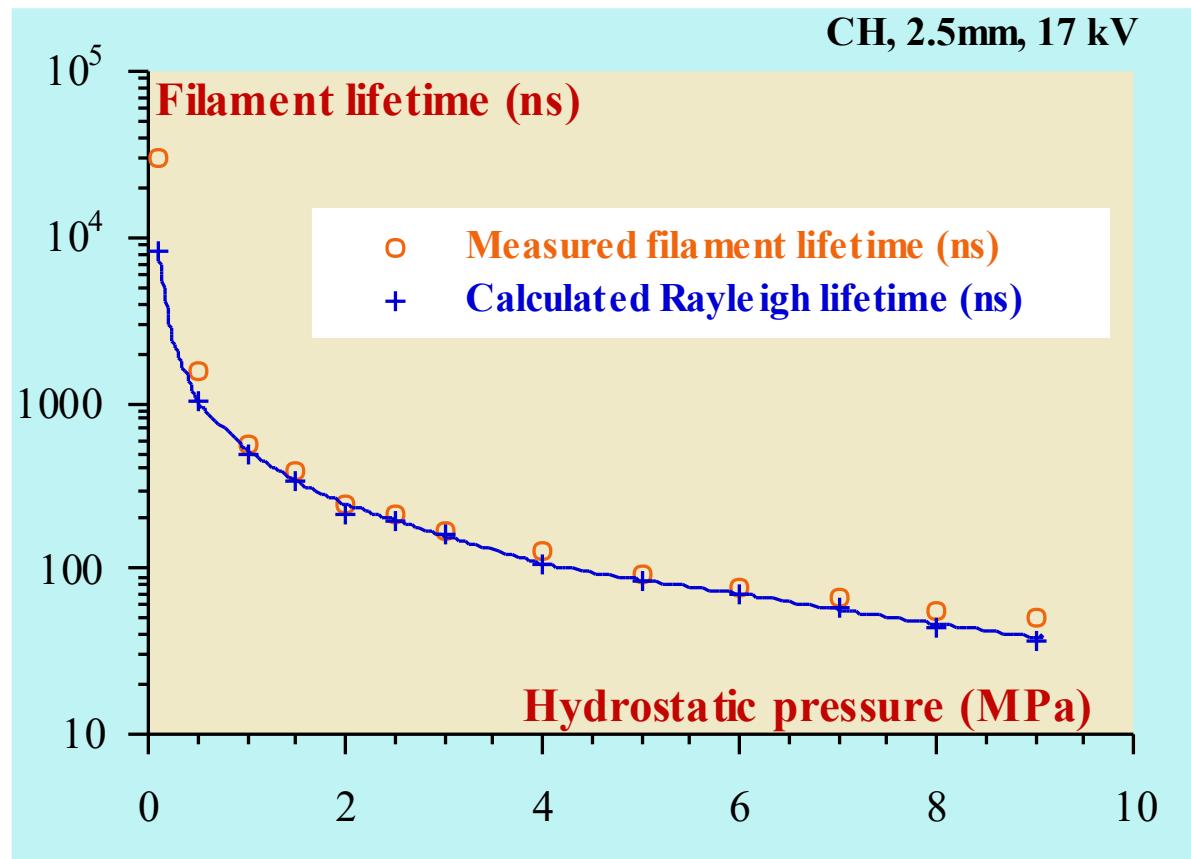
**Coupure filaments:
Implosion canal → arrêt**

→ "streamer"
= canal vapeur en expansion

(Gournay et al. J Phys D 94)

(pentane, 17 kV, 1.1MPa)

II - nature gazeuse: influence pression hydrostatique

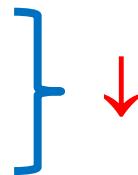


Pression ↑



Canal gazeux:

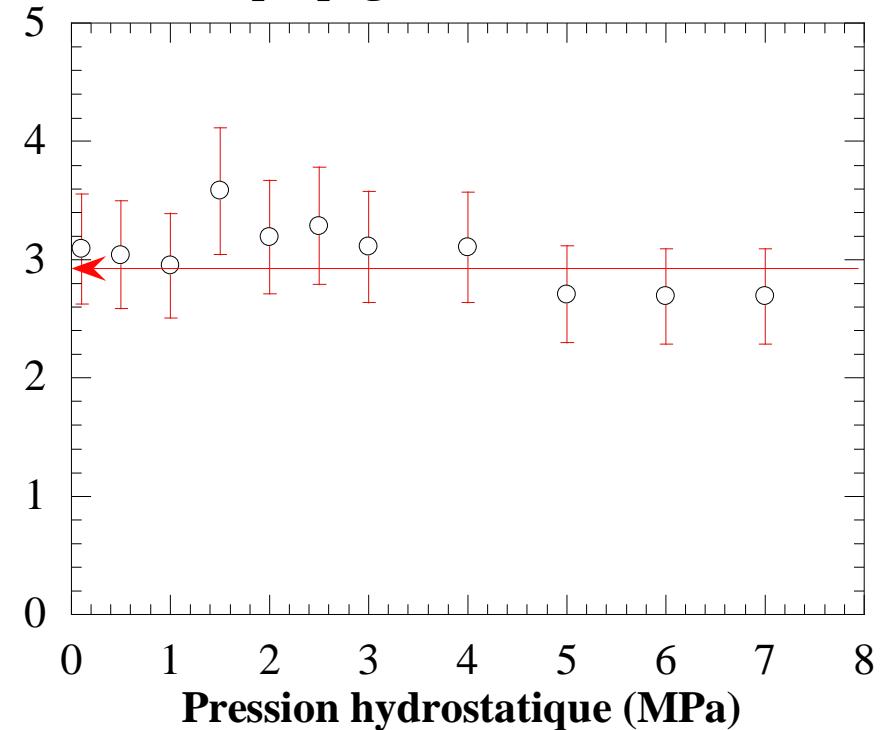
durée de vie (→ arrêt)
diamètre



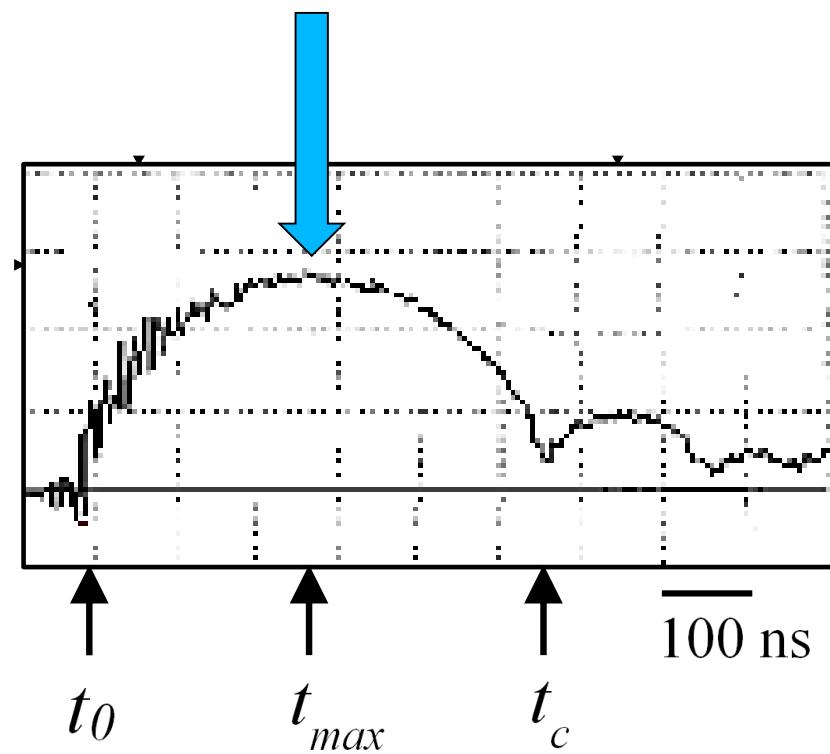
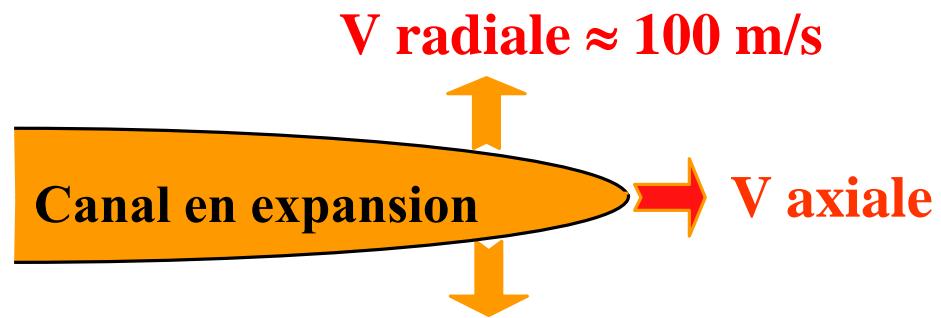
Tête:

vitesse inchangée (phase liquide)

Vitesse de propagation (km/s)



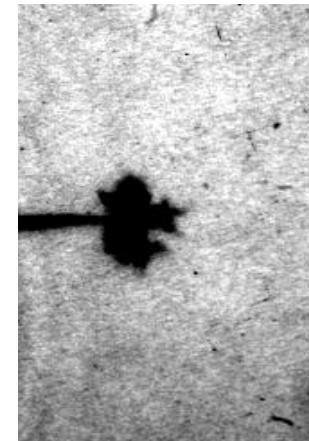
II – Canal : corrélation vitesse \Leftrightarrow pression interne



$$V_a \approx V_r$$

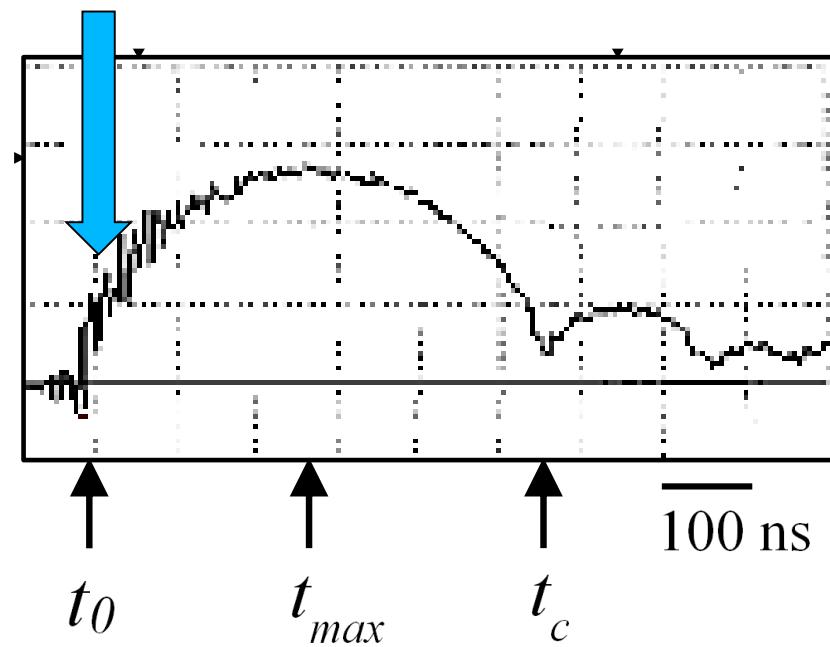
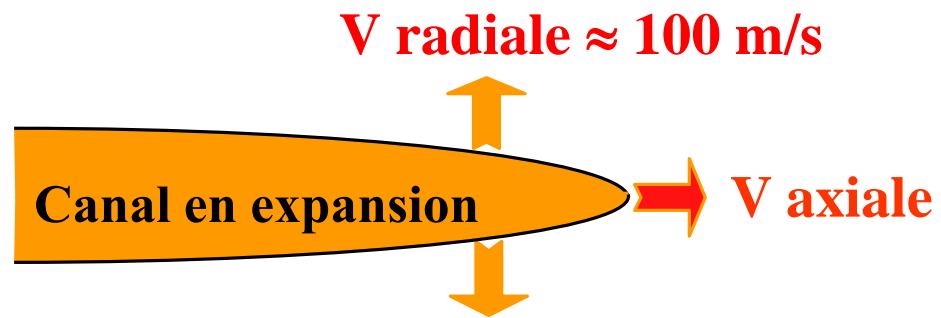
1^{er} mode

100 m/s



1 – 10 bars

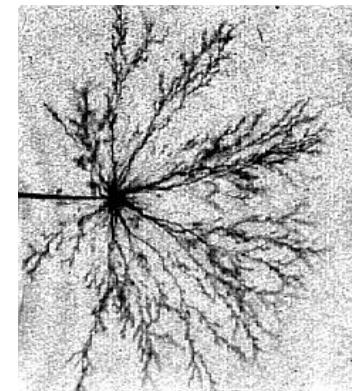
II – Canal : corrélation vitesse \Leftrightarrow pression interne



$V_a > V_r$

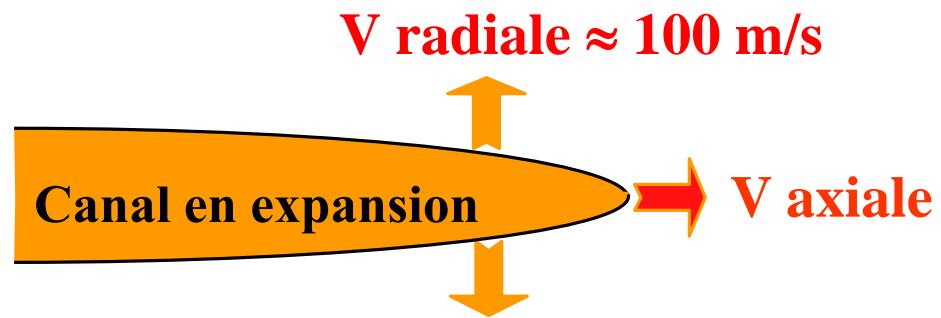
2^{ème} mode

2 km/s



10 – 100 bars

II – Canal : corrélation vitesse \Leftrightarrow pression interne



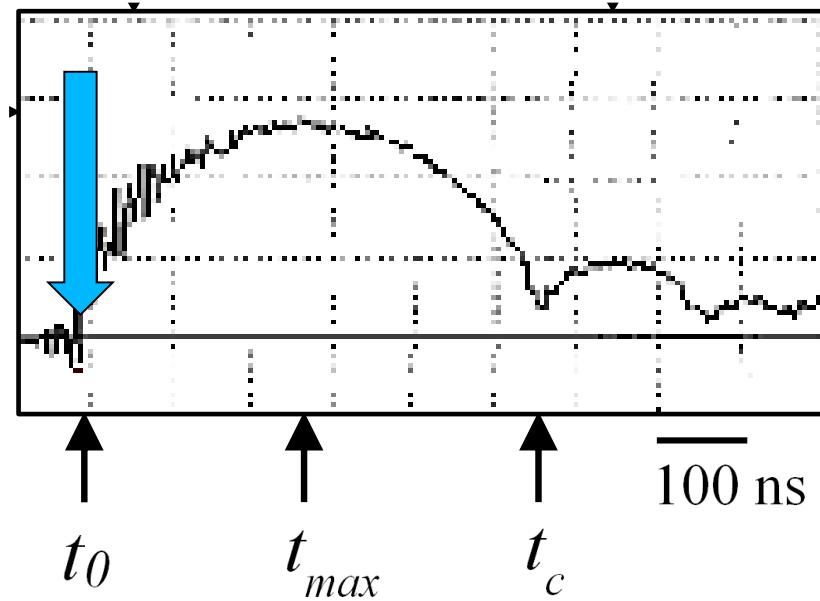
$V_a \gg V_r$

3/4^{ème} mode

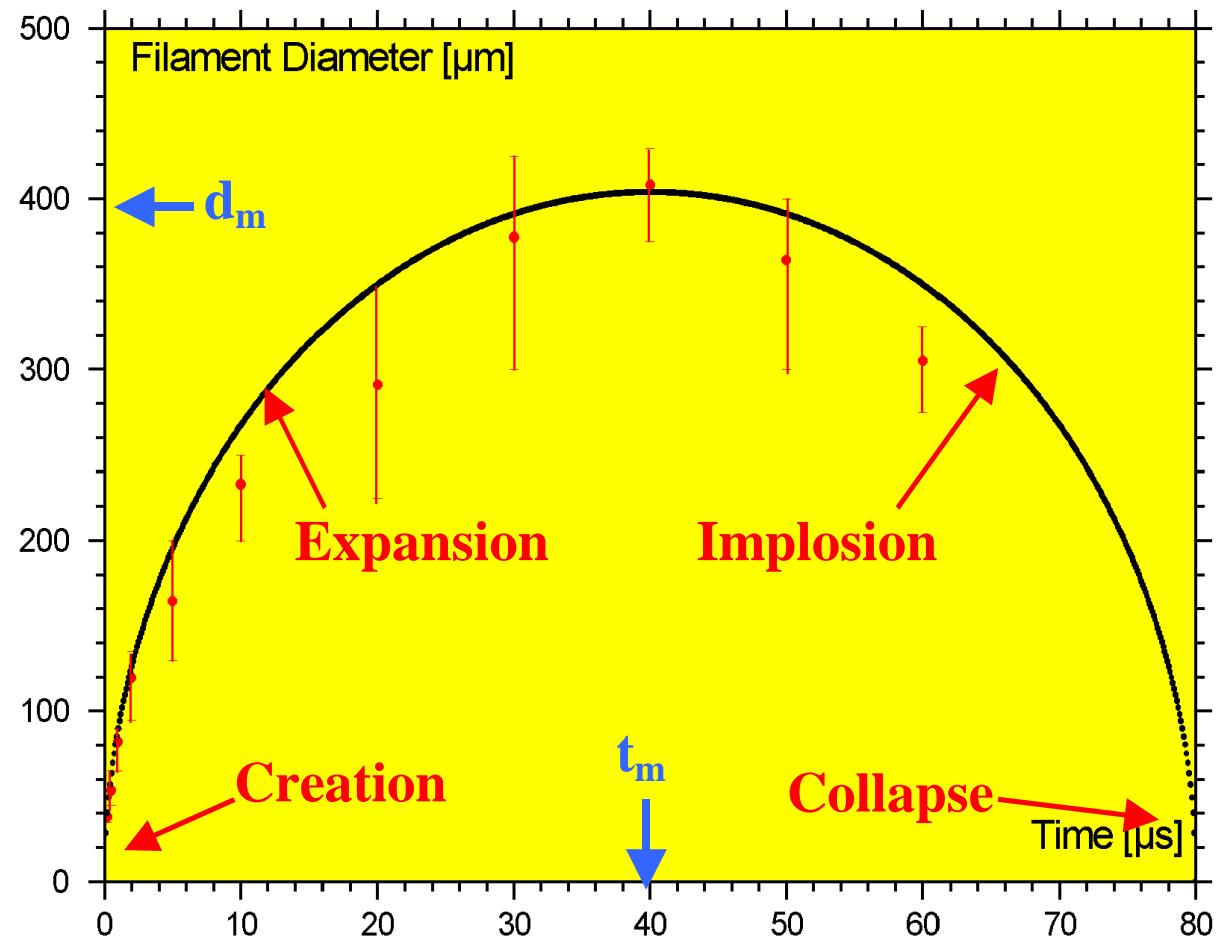
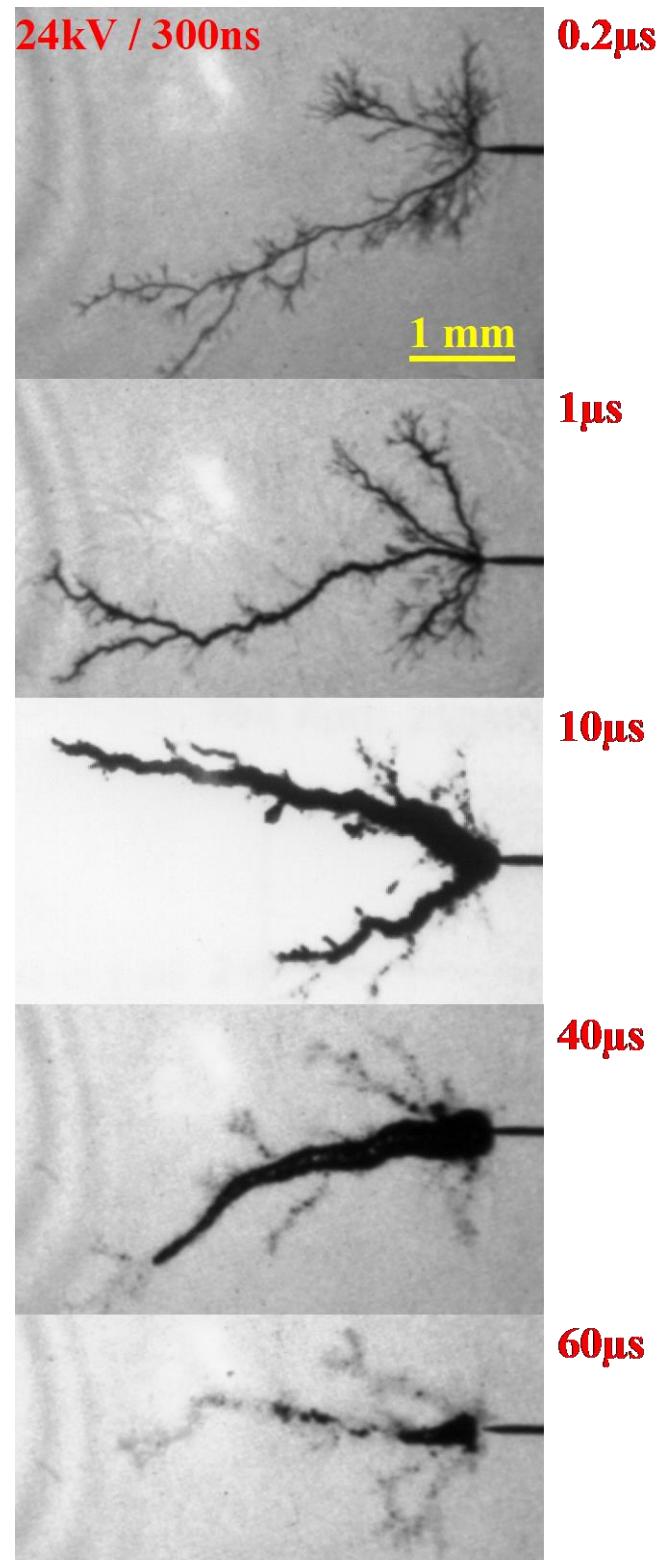
30 km/s



100 – 1000 bars ?



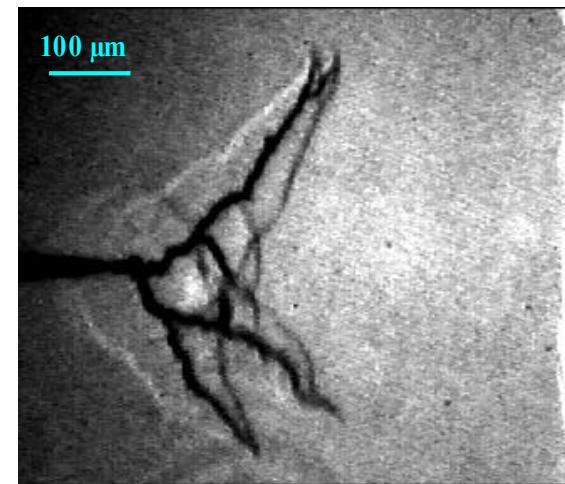
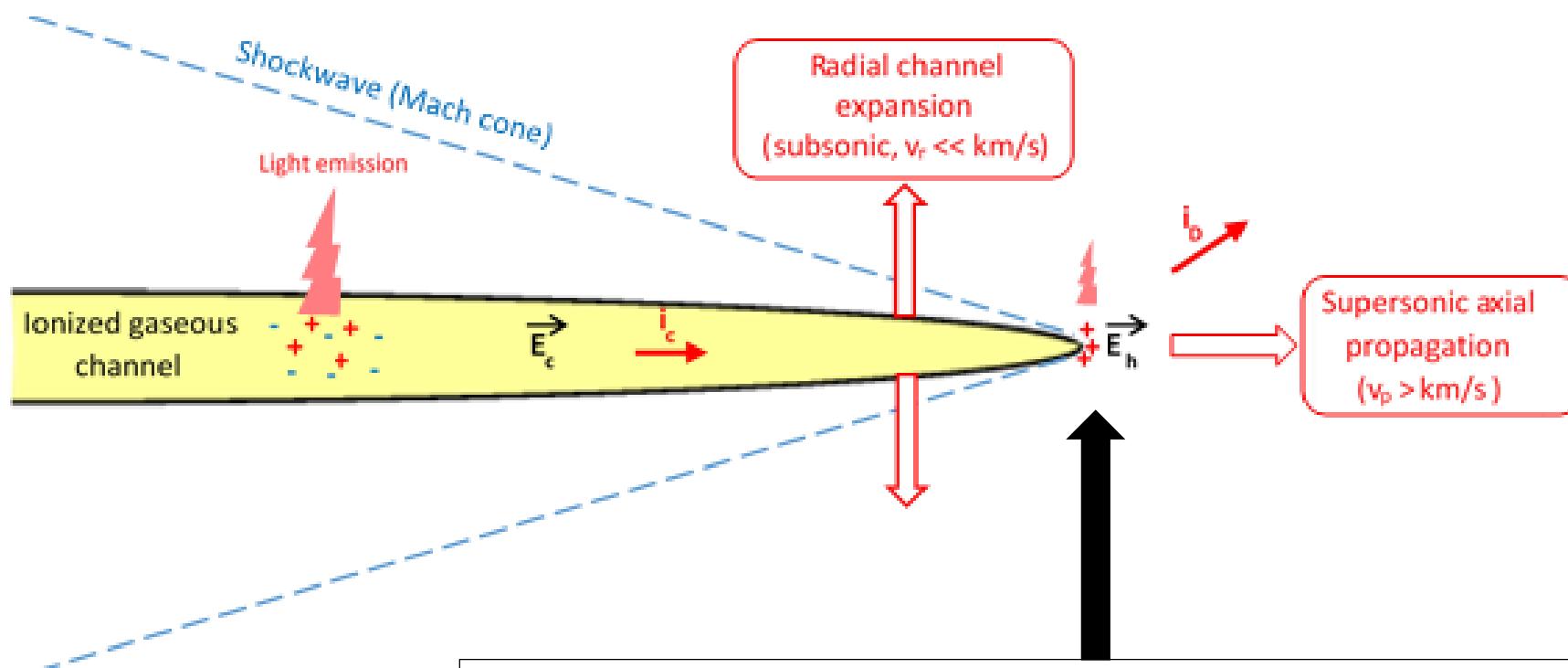
II - Autre exemple: eau



ϵ + conductivité élevés

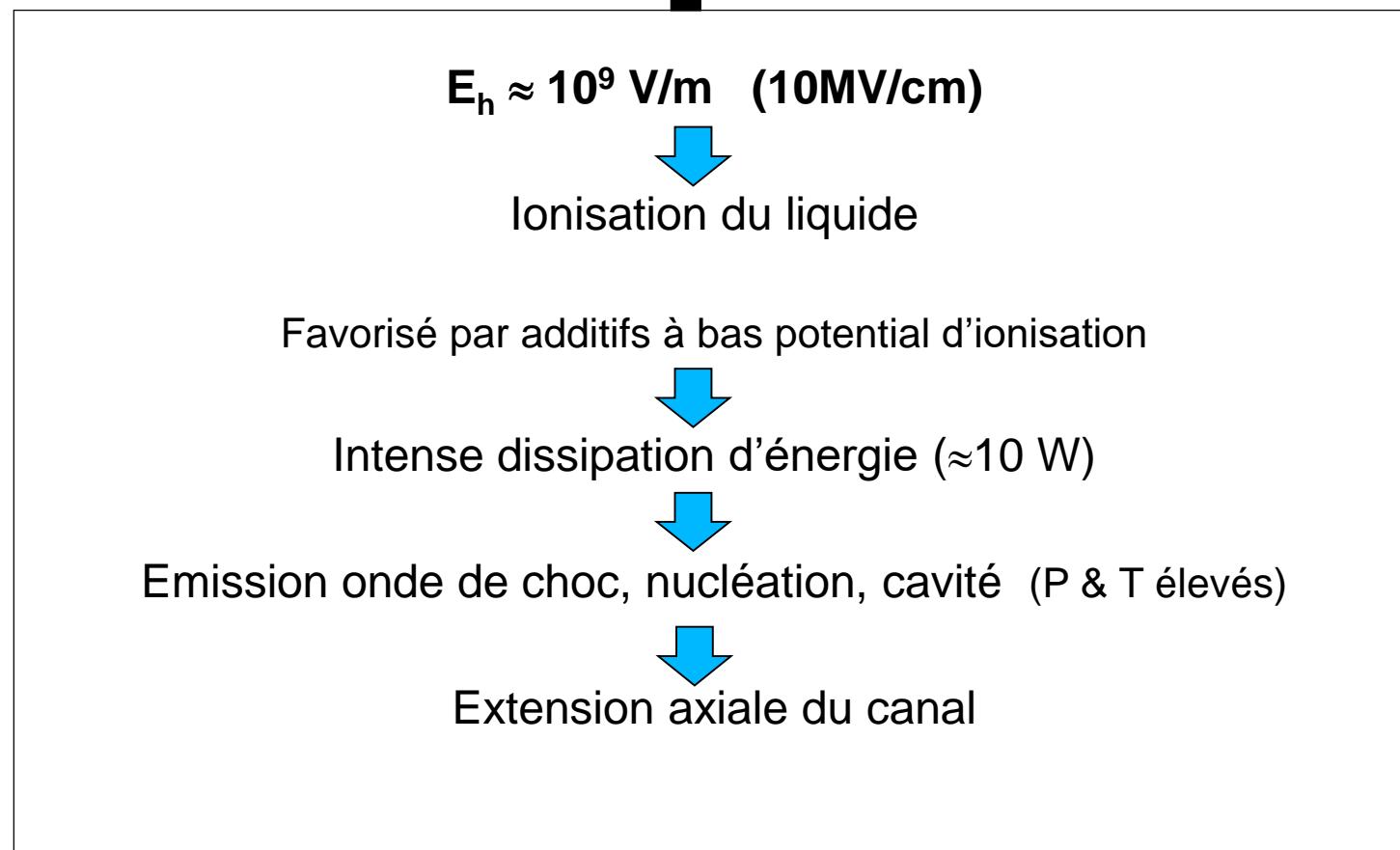
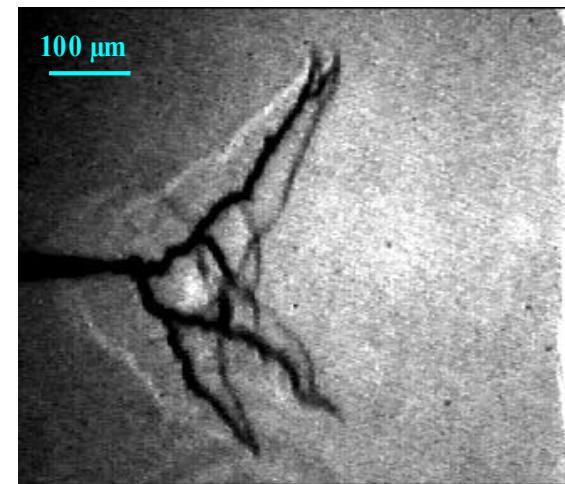
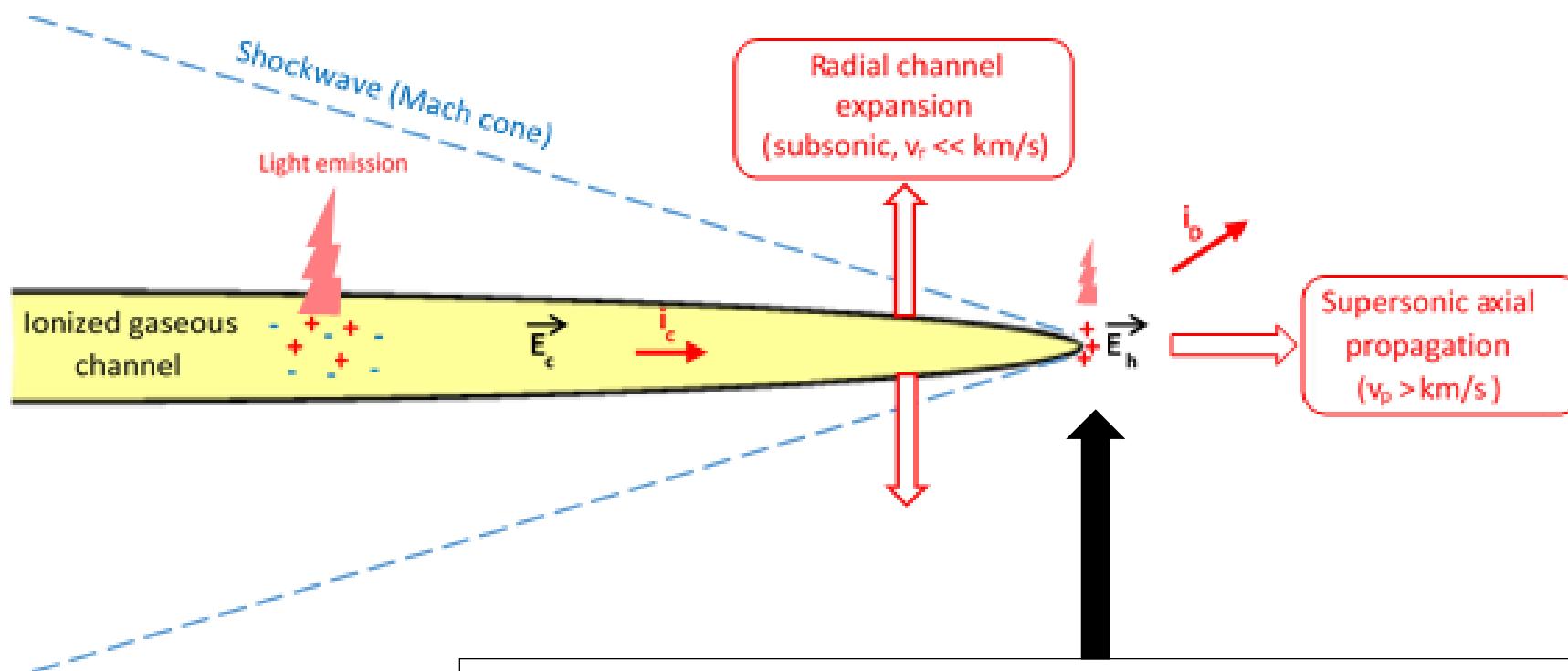
→ Dissipation d'énergie >>

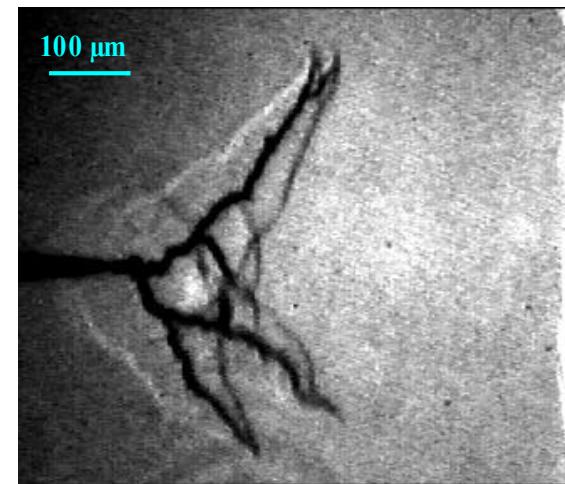
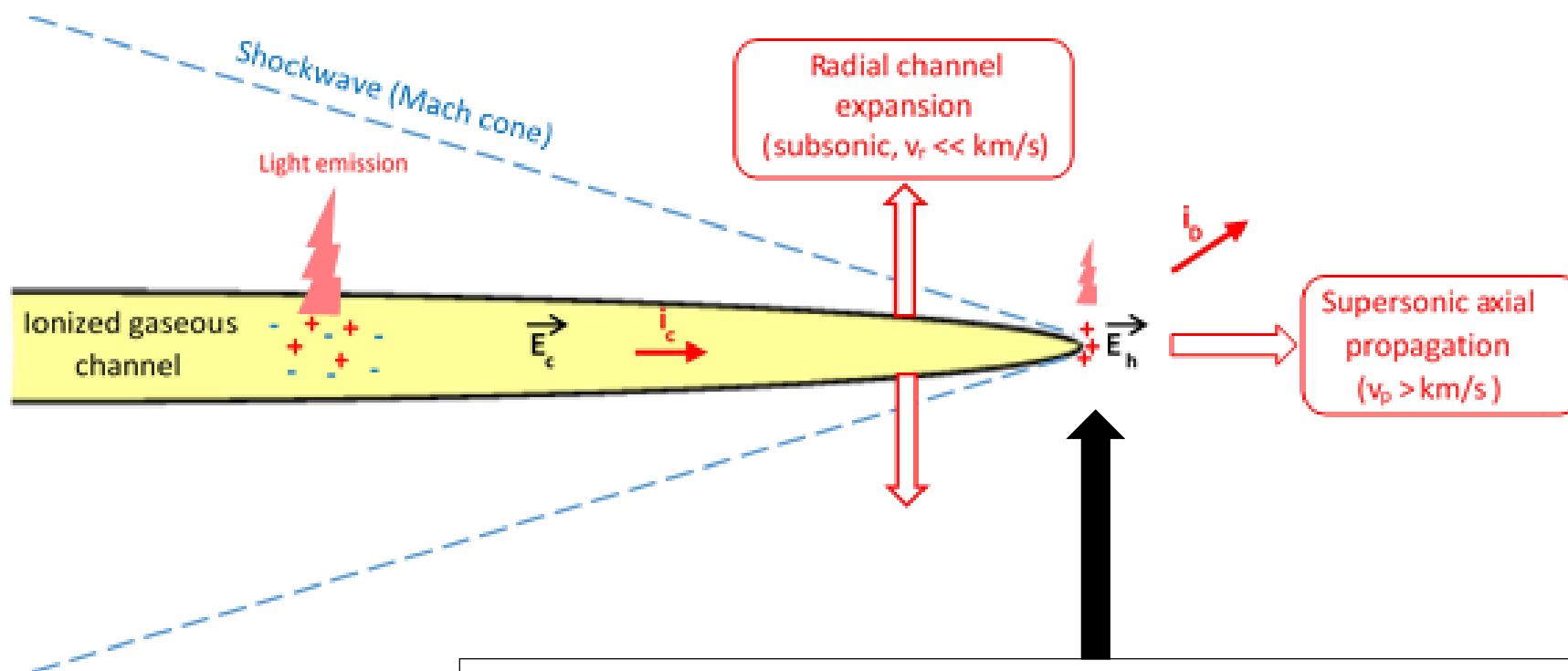
→ diamètre canaux >>



Tête décharge: phénomènes en phase liquide

- Vitesse indépendante de:
 - pression (100 bars)
 - Présence de gaz dissous
- Modifié par additifs à bas potentiel d'ionization





Mécanismes d'ionisation ?

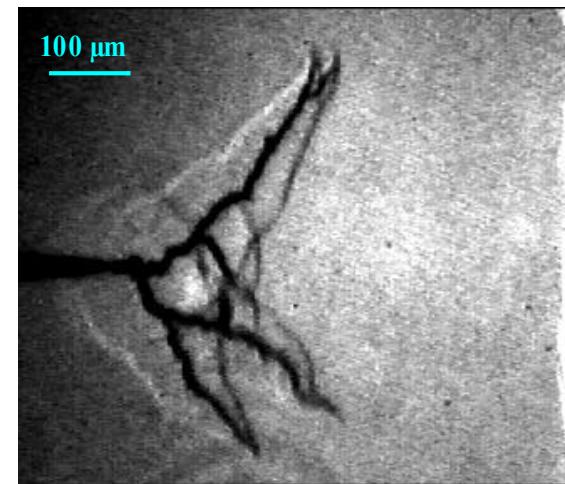
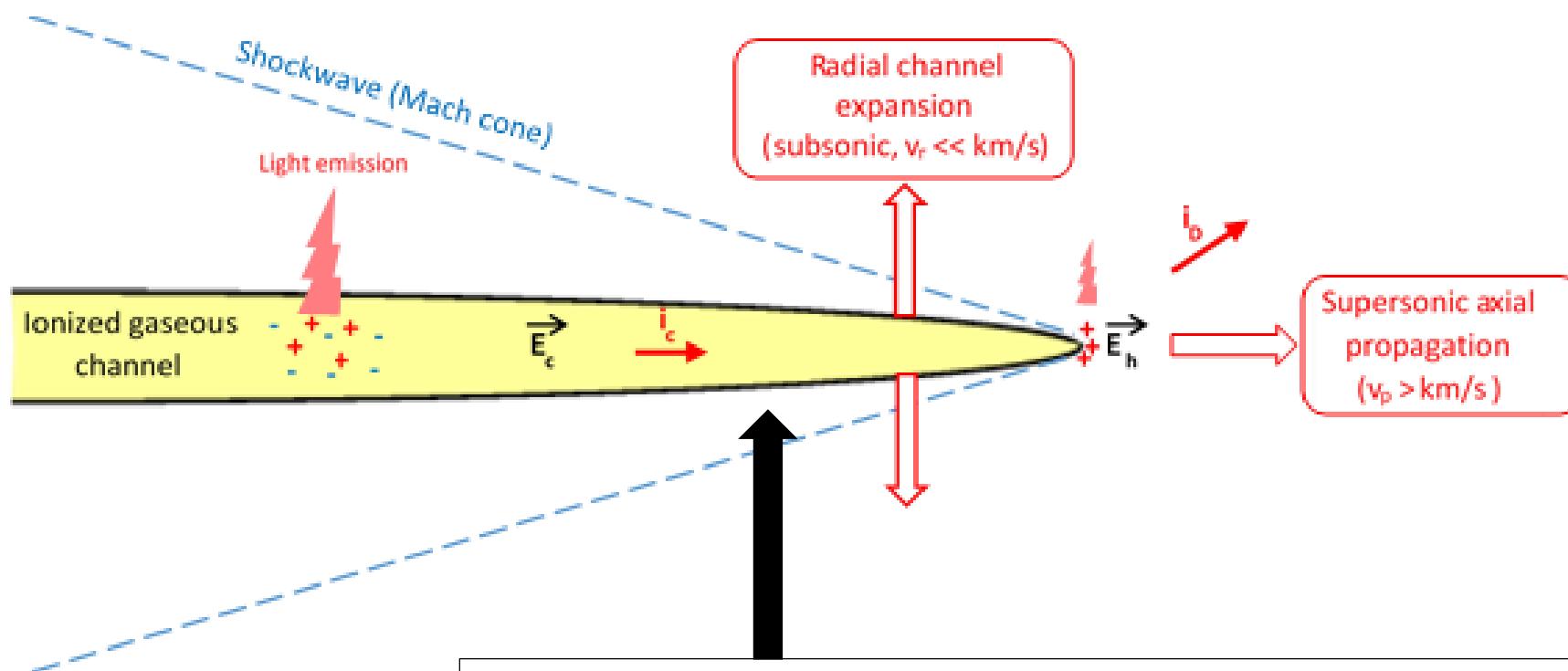
multiplication électronique ? ionisation de champ ?
 dissociation renforcée (Onsager) ? photoionization ?
 Influence nature du liquide ?

Vitesse propagation ?

Transitions entre modes ?

Phénomènes électro-mécaniques ?

P electrost. \approx 100 Bar

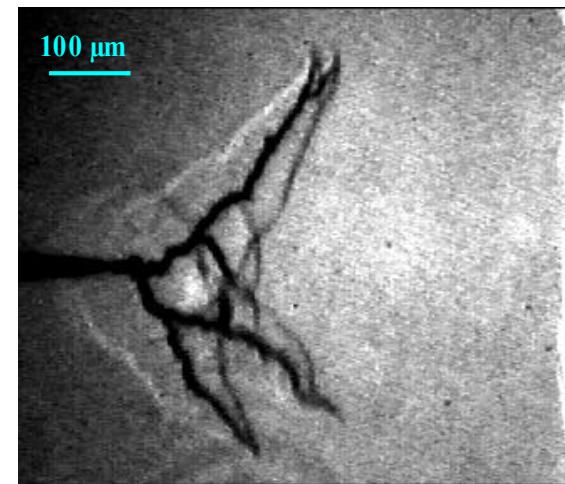
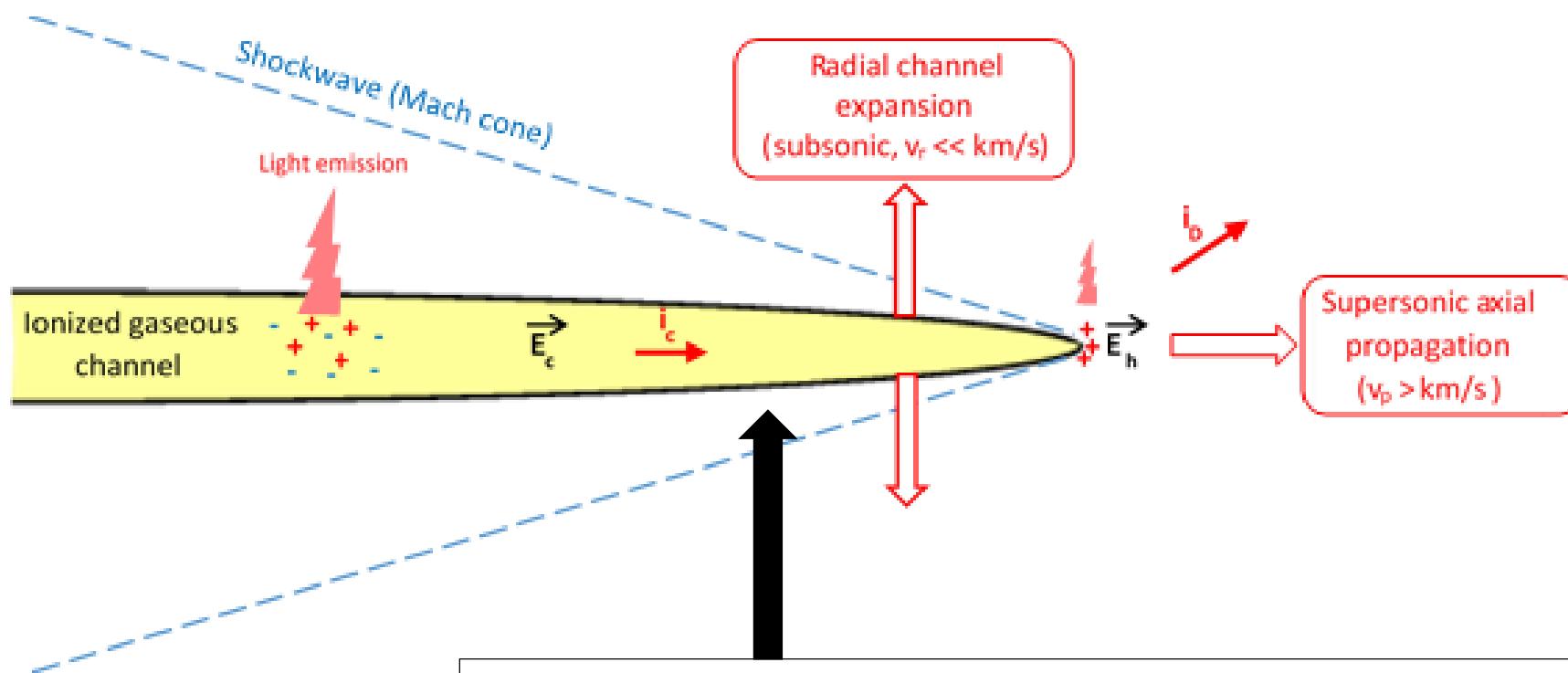


Canal: nécessairement gazeux

- $j_c \approx 10^7 \text{ A/m}^2$, $E_c \approx 10 \text{ kV/cm} \rightarrow \sigma \approx 10 \text{ (}\Omega\cdot\text{m)}^{-1}$
- hors équilibre de pression (spatial, temporel)
- **détermine l'influence de la pression sur la propagation**

$P \uparrow$ {

- durée de vie \downarrow (implosion \rightarrow arrêt)
- diamètre \downarrow
- $E_c \uparrow$ (chute de tension \rightarrow arrêt)



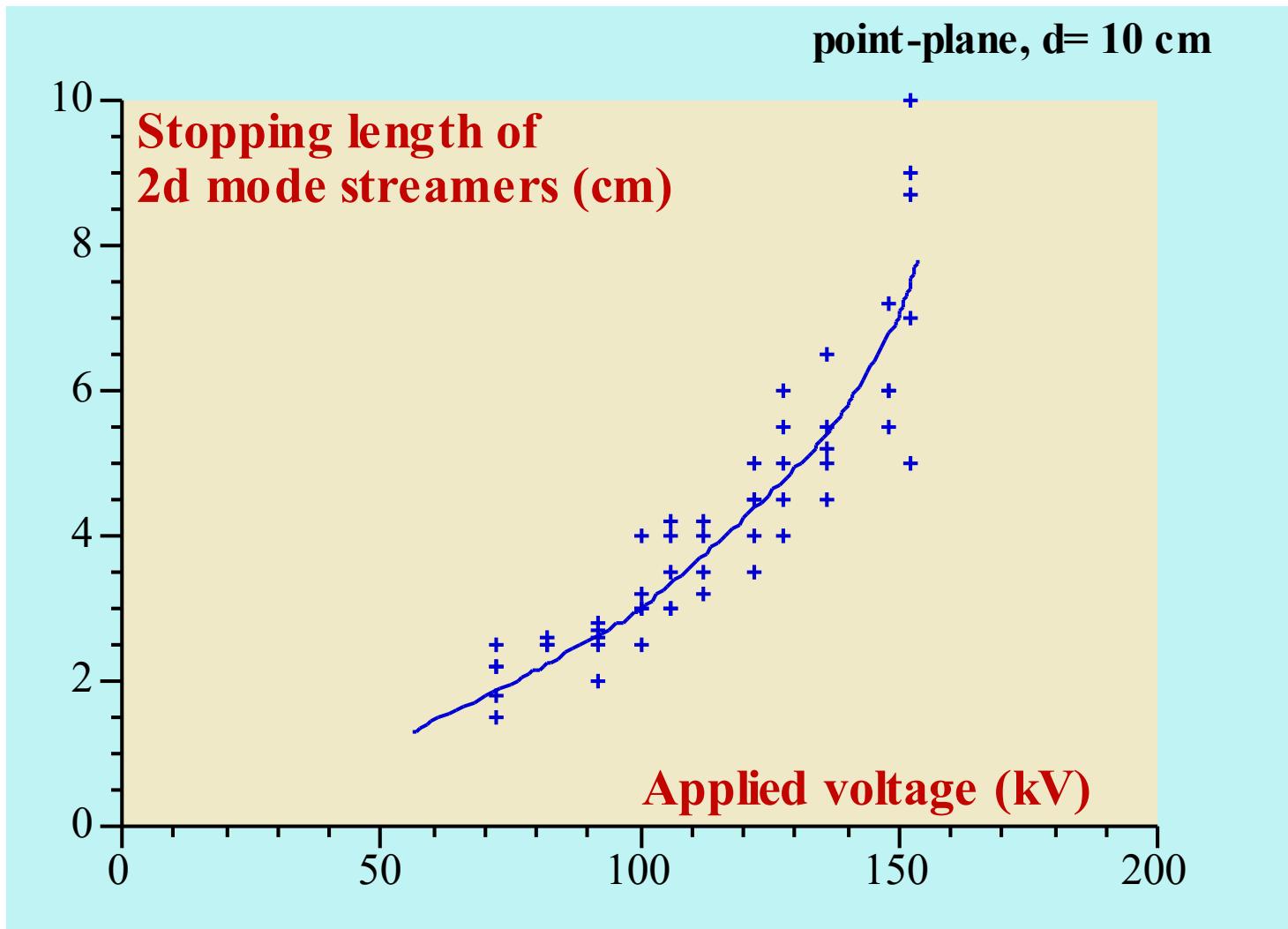
Caractérisation plasma ? → spectroscopie

Propriétés électriques ?

Transition entre modes ?

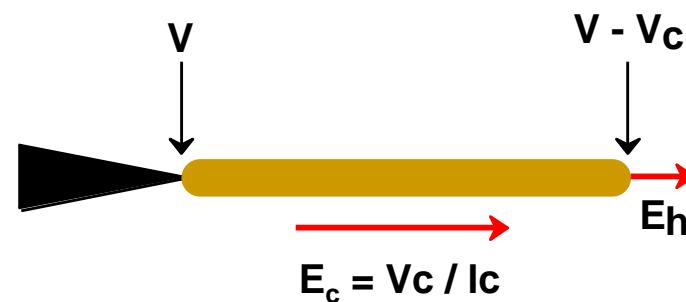
- I - Phénoménologie phénomènes prédisruptifs
 - caractères génériques: « modes » de propagation
 - cas de l'eau
 - Nature du liquide et additifs
- II - Nature gazeuse des canaux, influence de la pression
 - Caractérisation expérimentale, corrélation pression-vitesse
 - Représentation schématique, hypothèses, questions ...
- III - Propriétés électriques « macroscopiques » des canaux
 - Courant, paramètres
 - Cas de l'eau
- IV – Génération des streamers
 - Hydrocarbure non-polaire: cyclohexane
 - eau

III – Canal: propriétés électriques “macroscopiques” : chute de tension E_c

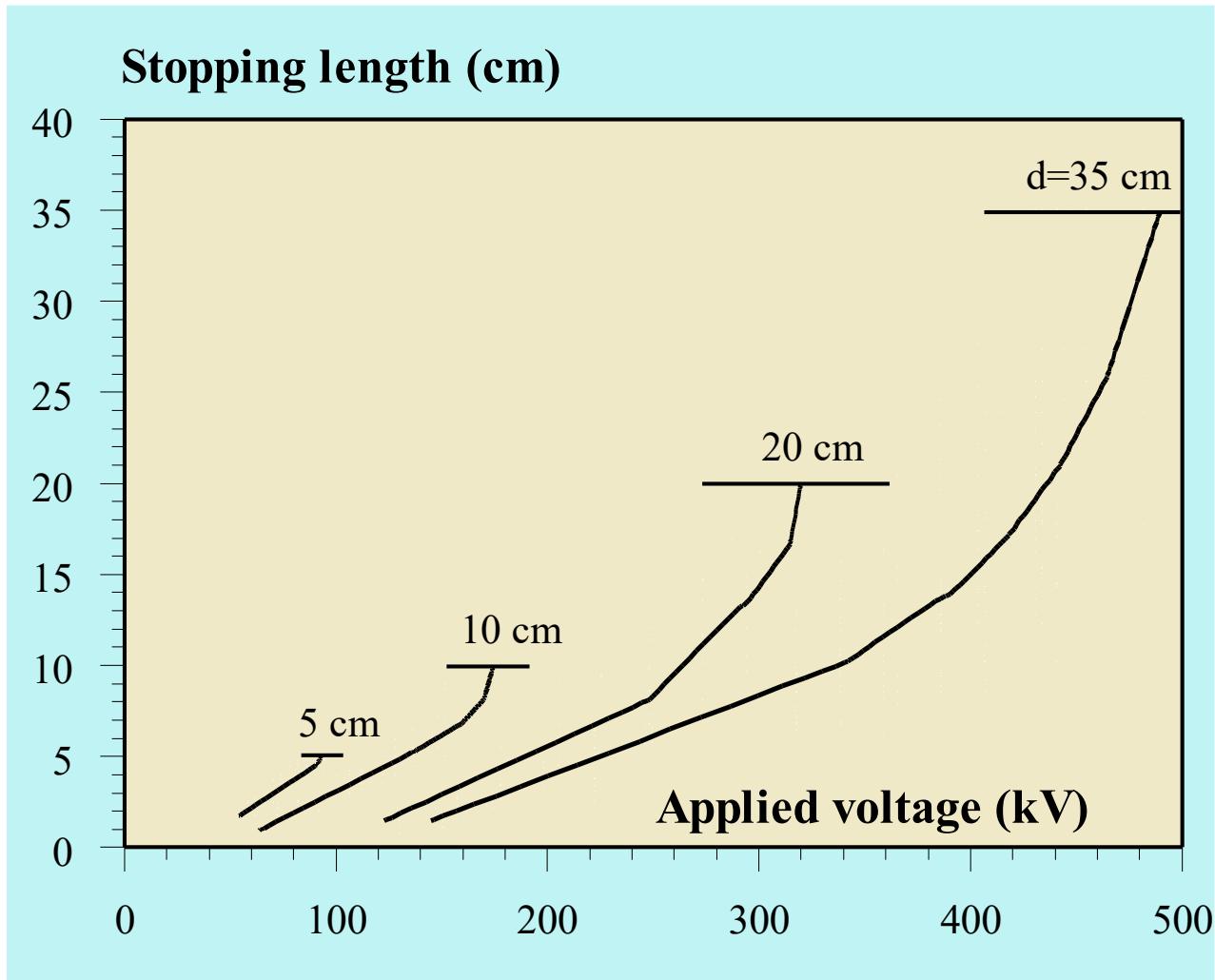


⇒ arrêt dû à la **chute de tension V_c** dans le canal

$$E_h < E_{\text{critique}} (\approx 10\text{MV/cm})$$

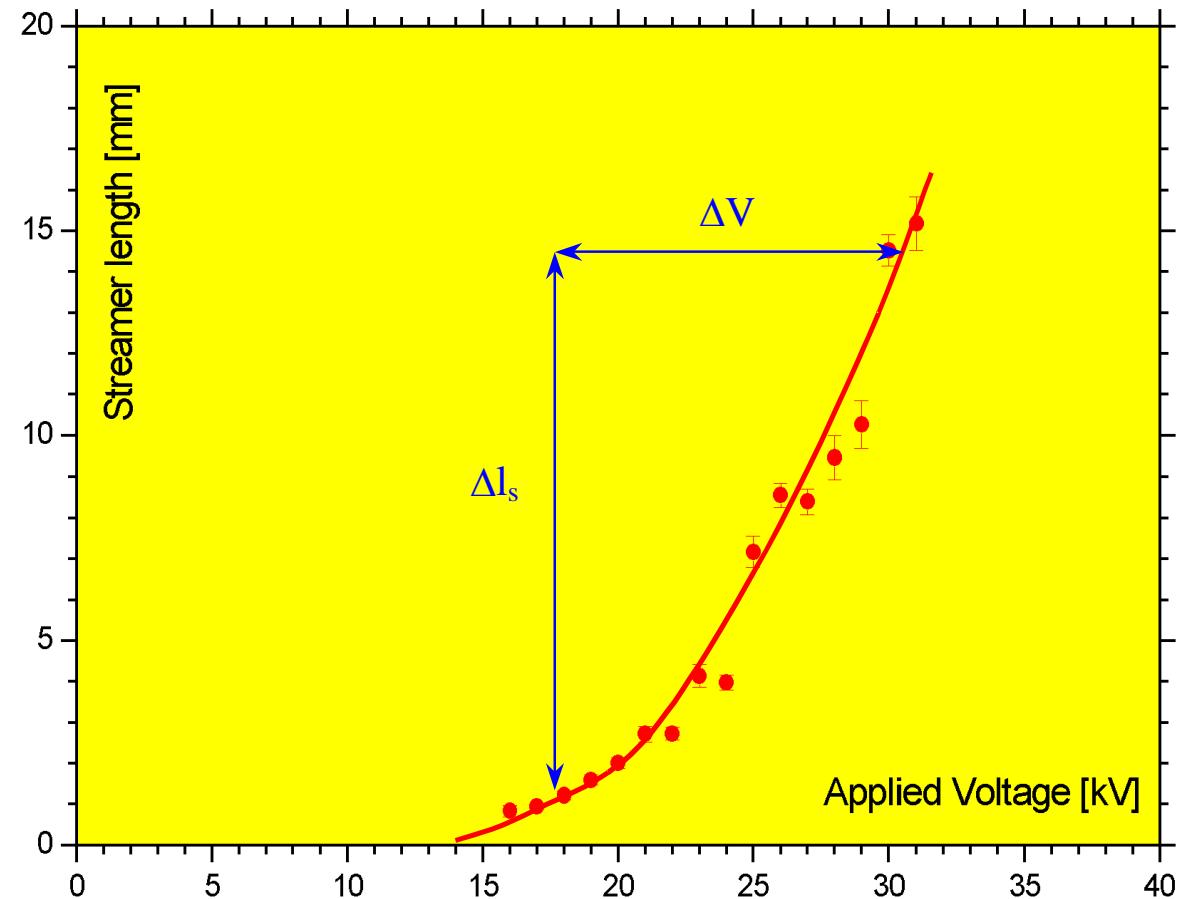


III - Canal: propriétés électriques “macroscopiques” : chute de tension E_c



⇒ huile minérale (2^{ème} mode, 2km/s)

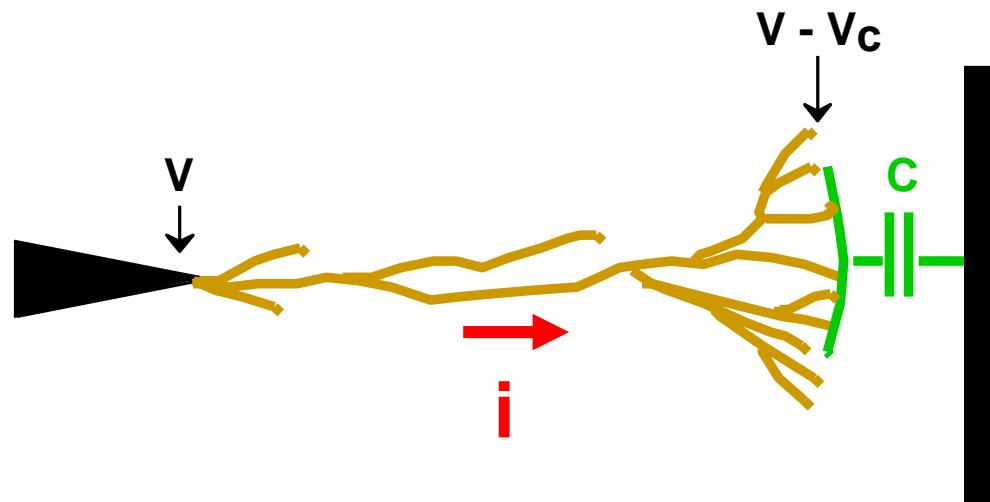
$$E \approx 5 \text{ to } 30 \text{ kV/cm}$$



⇒ eau (3^{ème} mode, 30 km/s)

$$E \approx \Delta V / \Delta l_s = 12 \text{ kV/cm}$$

III - Chute de tension E_c : paramètres sensibles



Liquides isolants:

$$i \sim V (dC/dx) v$$

$\Rightarrow E_c \downarrow$ quand $i \uparrow$ (# arc électrique)

* quand la tension $V \uparrow$

* quand la vitesse $v \uparrow$

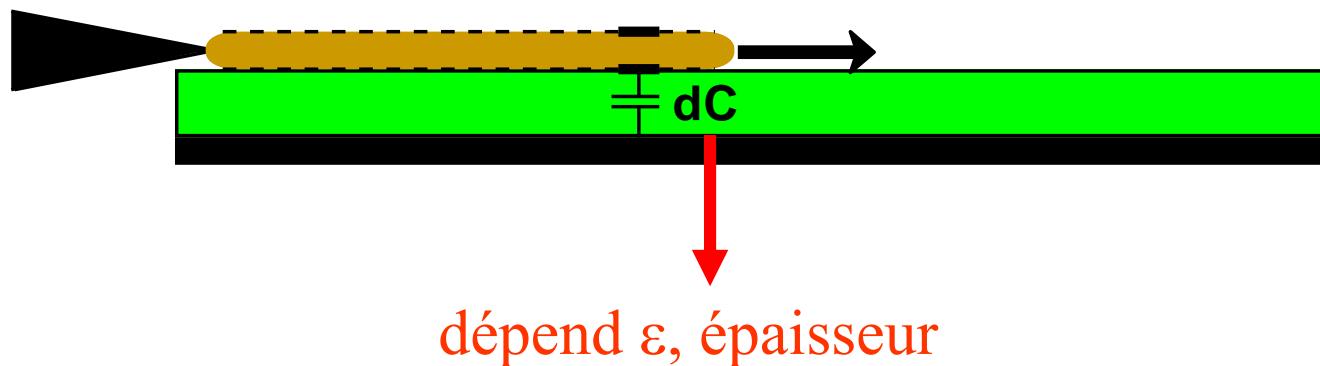
* quand la capacité linéique $dC/dx \uparrow$

$\Rightarrow E_c \uparrow$ quand Pression \uparrow (# décharge dans un gaz)

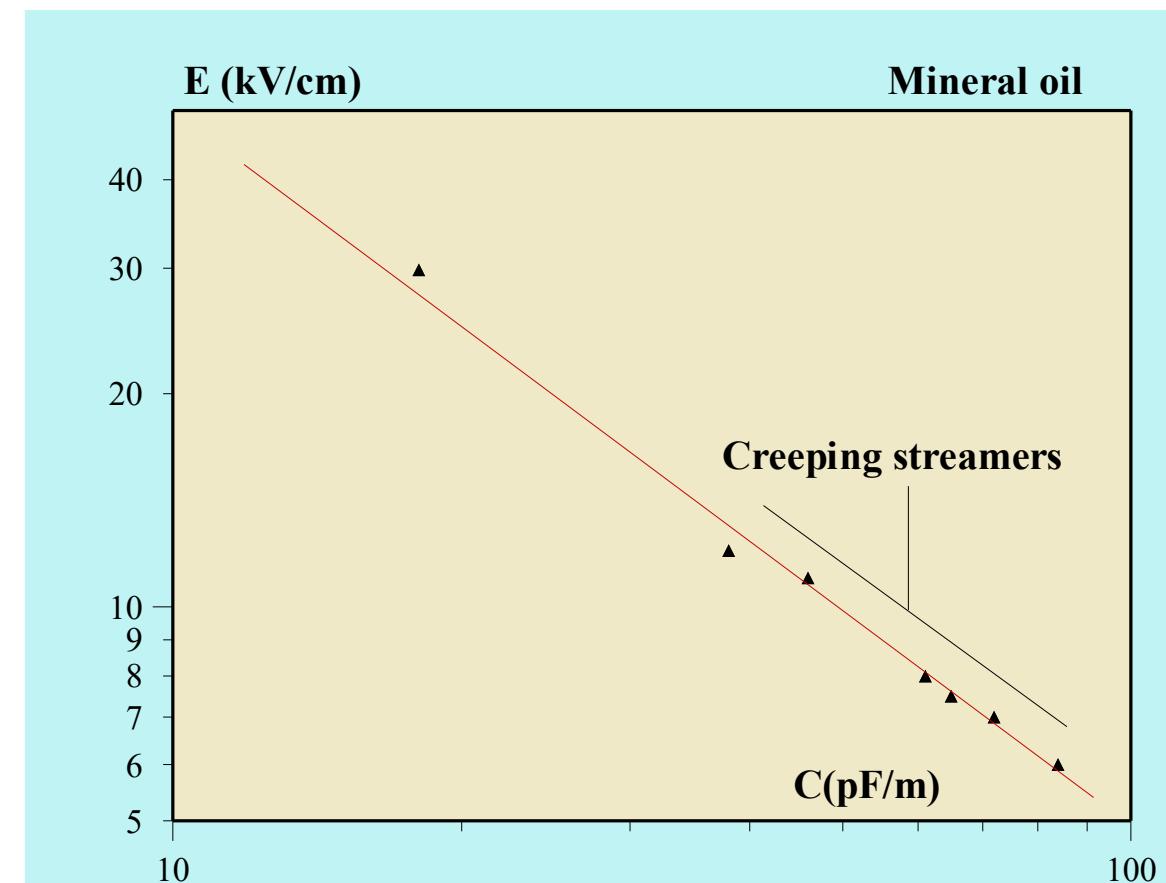
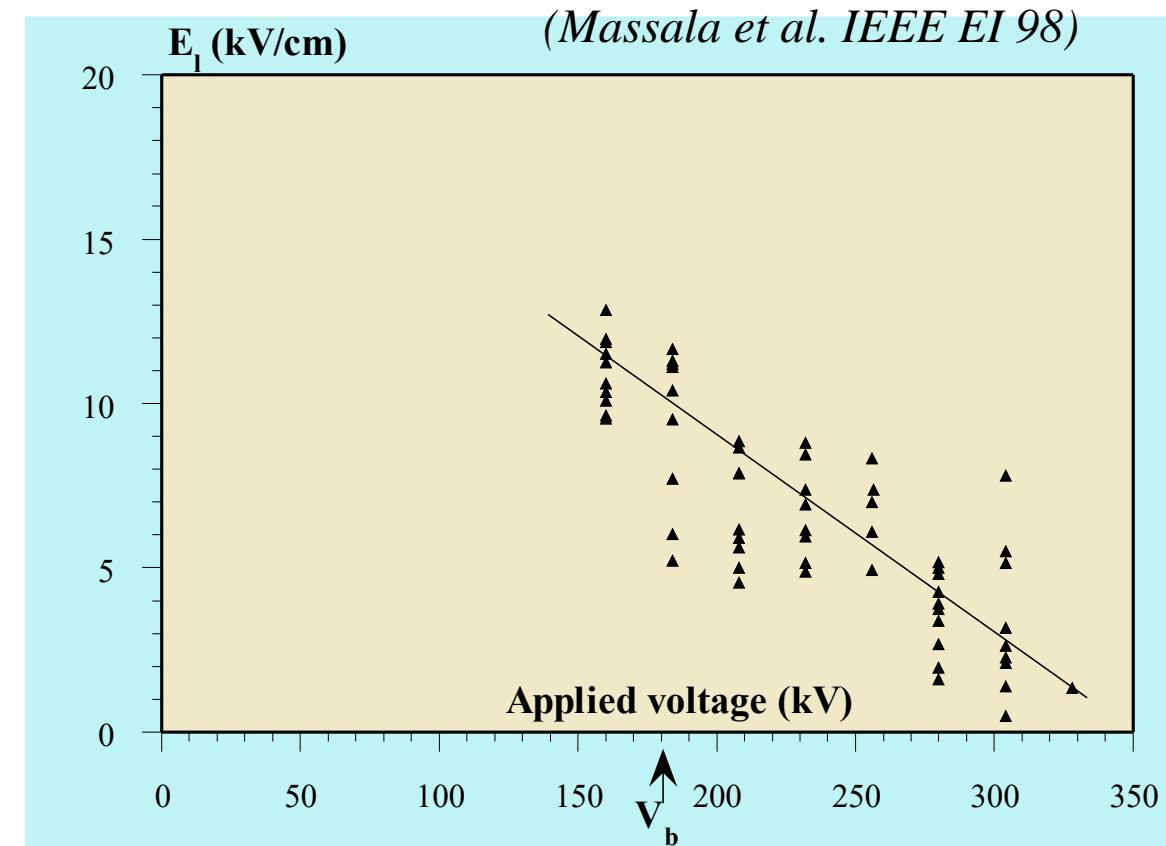
III - Chute de tension: exemple huile minérale

✓ influence tension appliquée / vitesse
(2 & 3^{ème} modes)

✓ influence “capacité linéique” dC/dx
(streamer rampant)



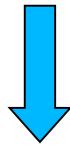
dépend ϵ , épaisseur



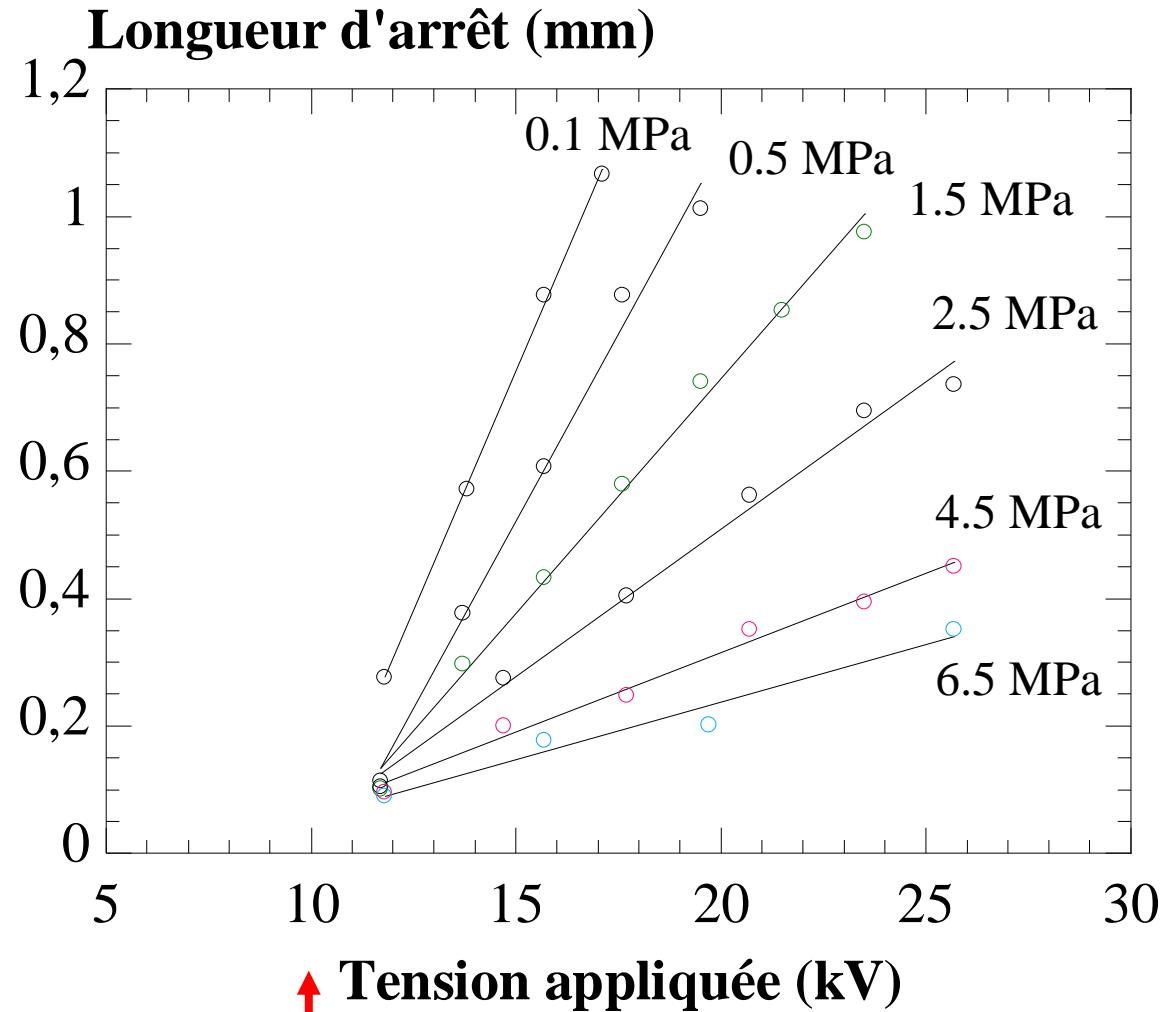
III - Chute de tension: influence pression

✓ influence pression hydrostatique:
sur le canal:

$E_c \approx 7 \text{ kV / mm (P atm)}$



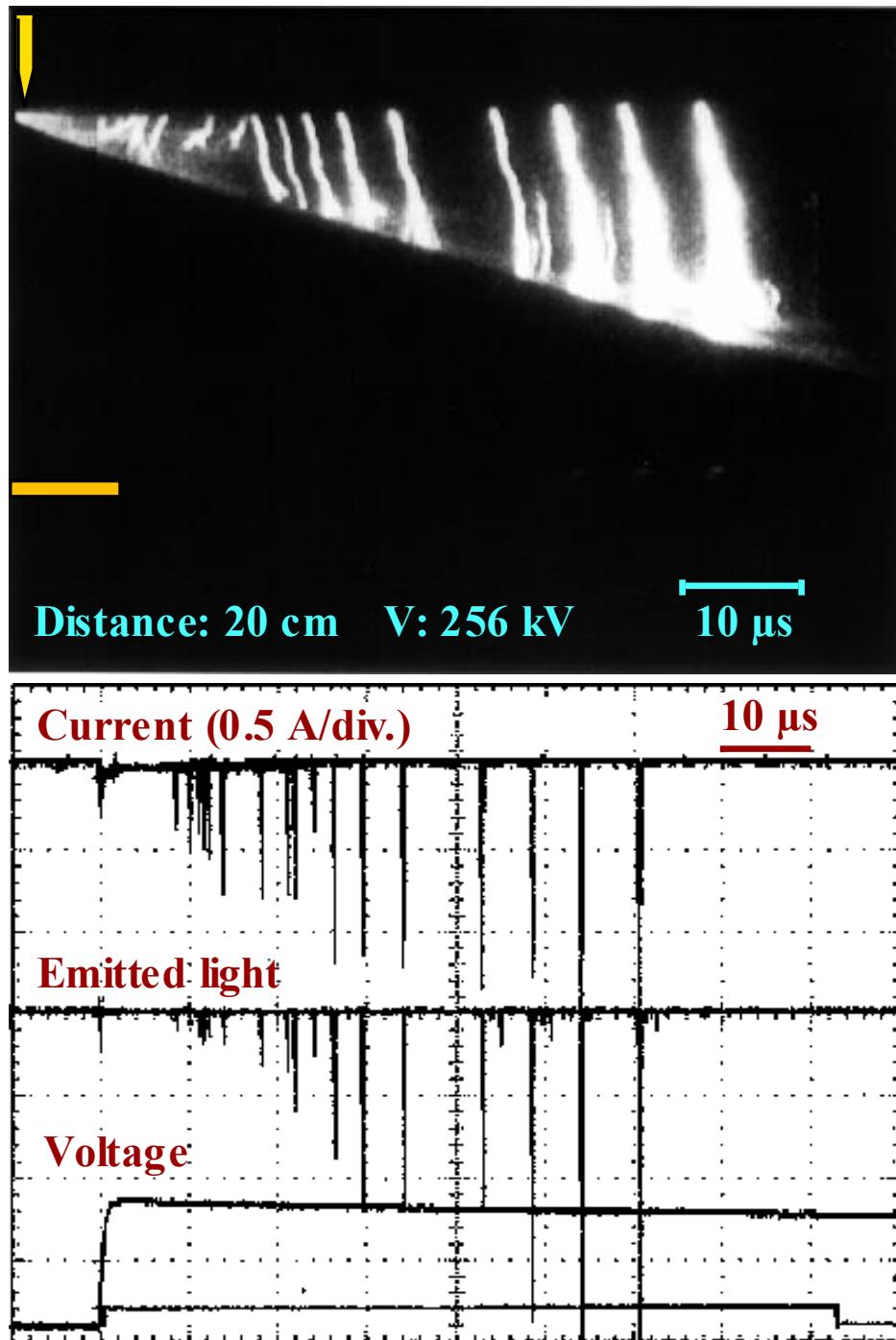
$E_c \approx 75 \text{ kV / mm (65 bars)}$



- ✓ Tension seuil propagation inchangée
- ✓ Vitesse inchangée

→ phase liquide

III – Canal: émission de lumière et courants transitoires



⇒ conduction du canal généralement intermittente

→ “réilluminations”

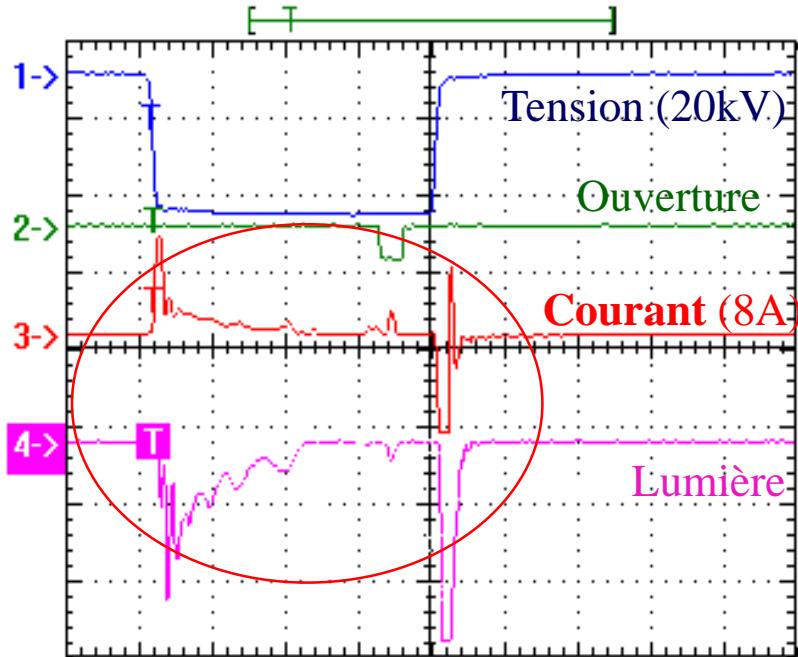
→ comparable aux “leaders” dans les gaz électronégatifs

→ étude spectroscopique: Nelly Bonifaci

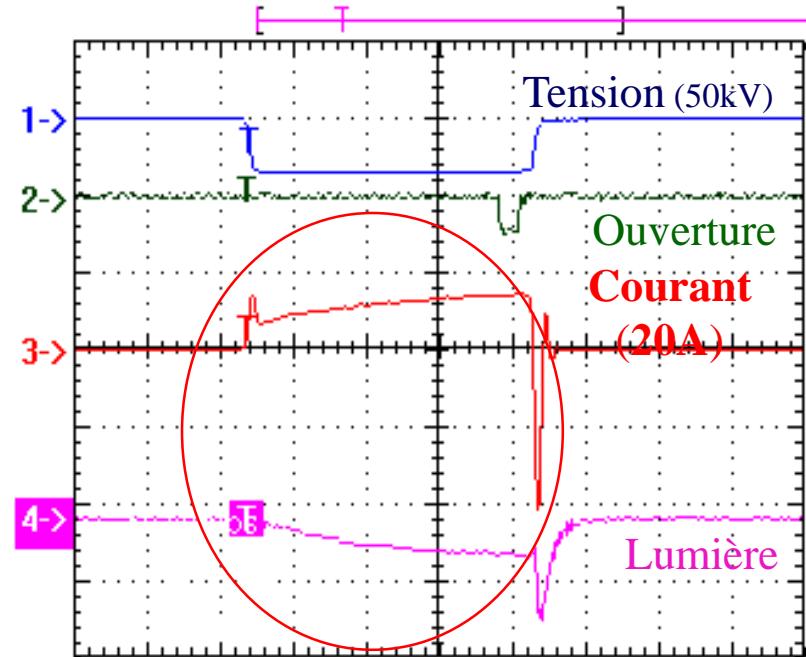
III - Un cas particulier: l'eau

→ Résistivité très variable ...

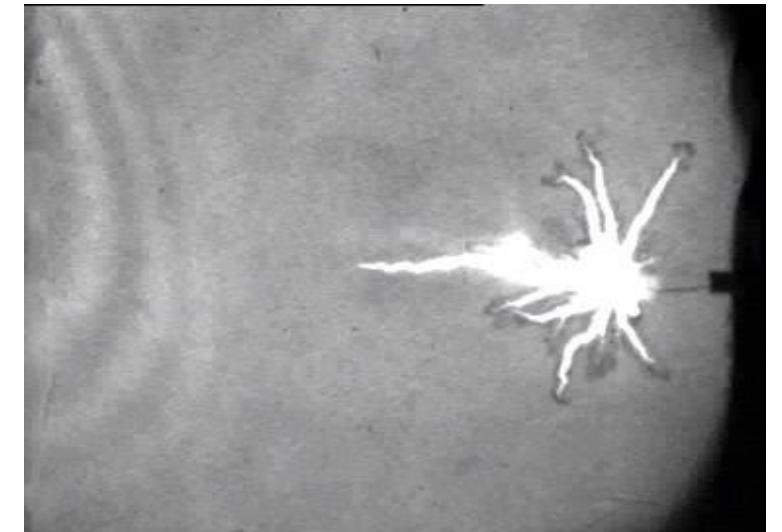
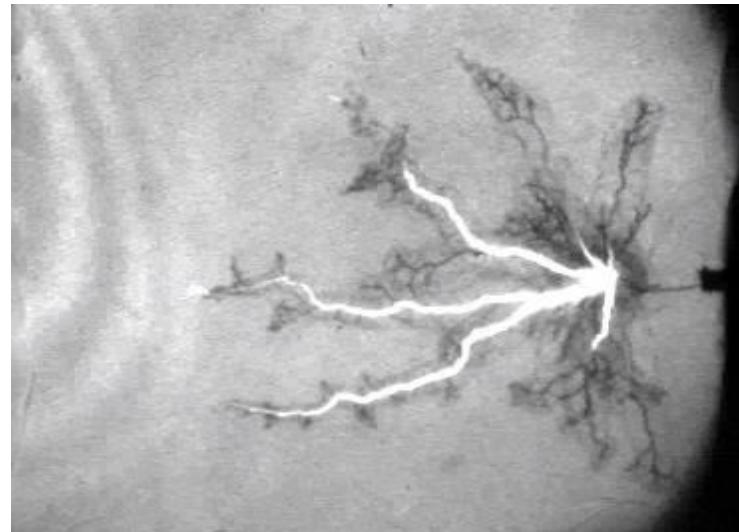
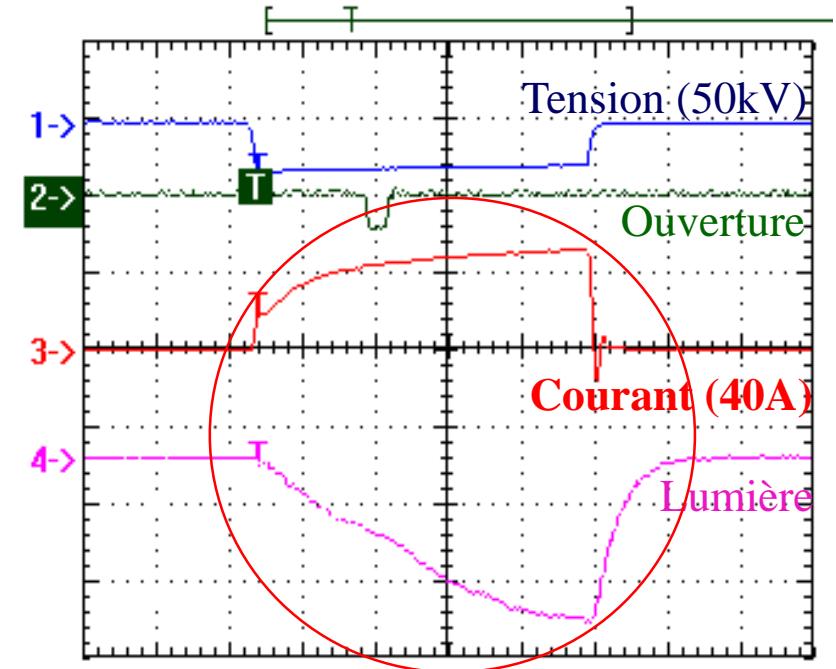
0,7 $\mu\text{S/cm}$



102 $\mu\text{S/cm}$

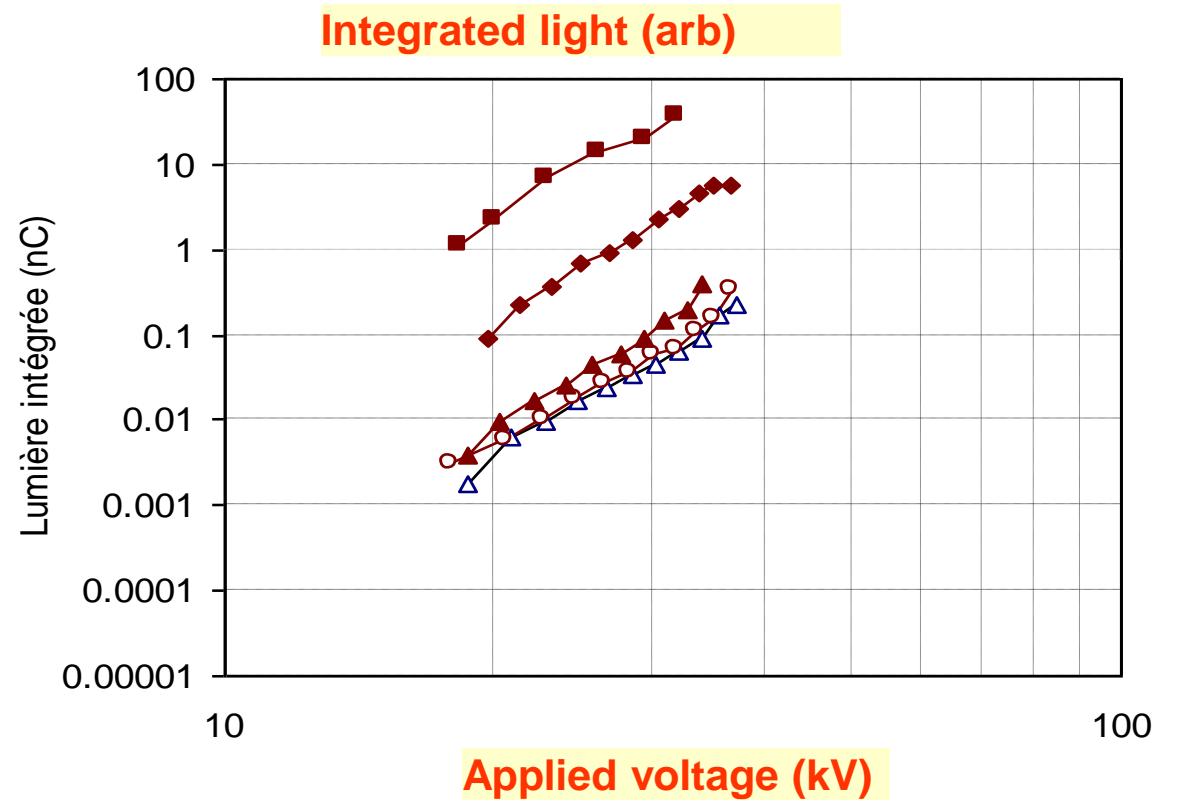
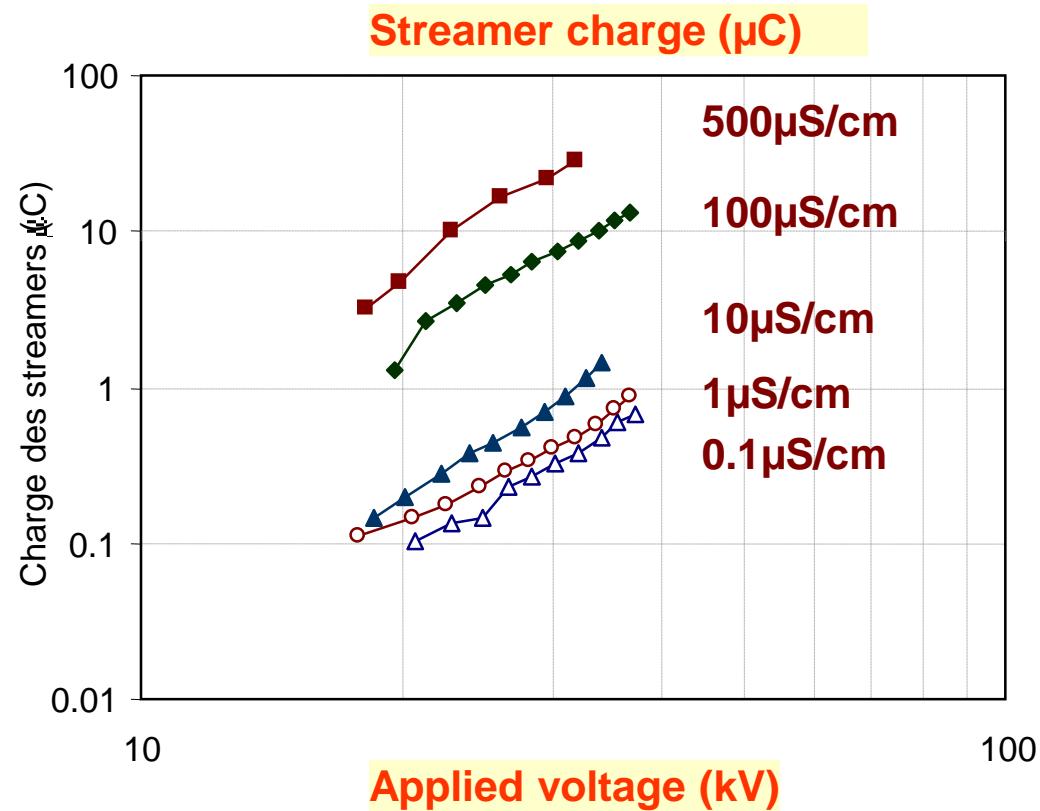


528 $\mu\text{S/cm}$



- ✓ Forte influence conductivité sur courant & lumière
- ✓ Aucune influence sur la vitesse de propagation

III - Un cas particulier: l'eau



- ✓ courant, énergie dissipée, émission de lumière augmentent fortement au-delà de $\approx 10 \mu\text{S}/\text{cm}$

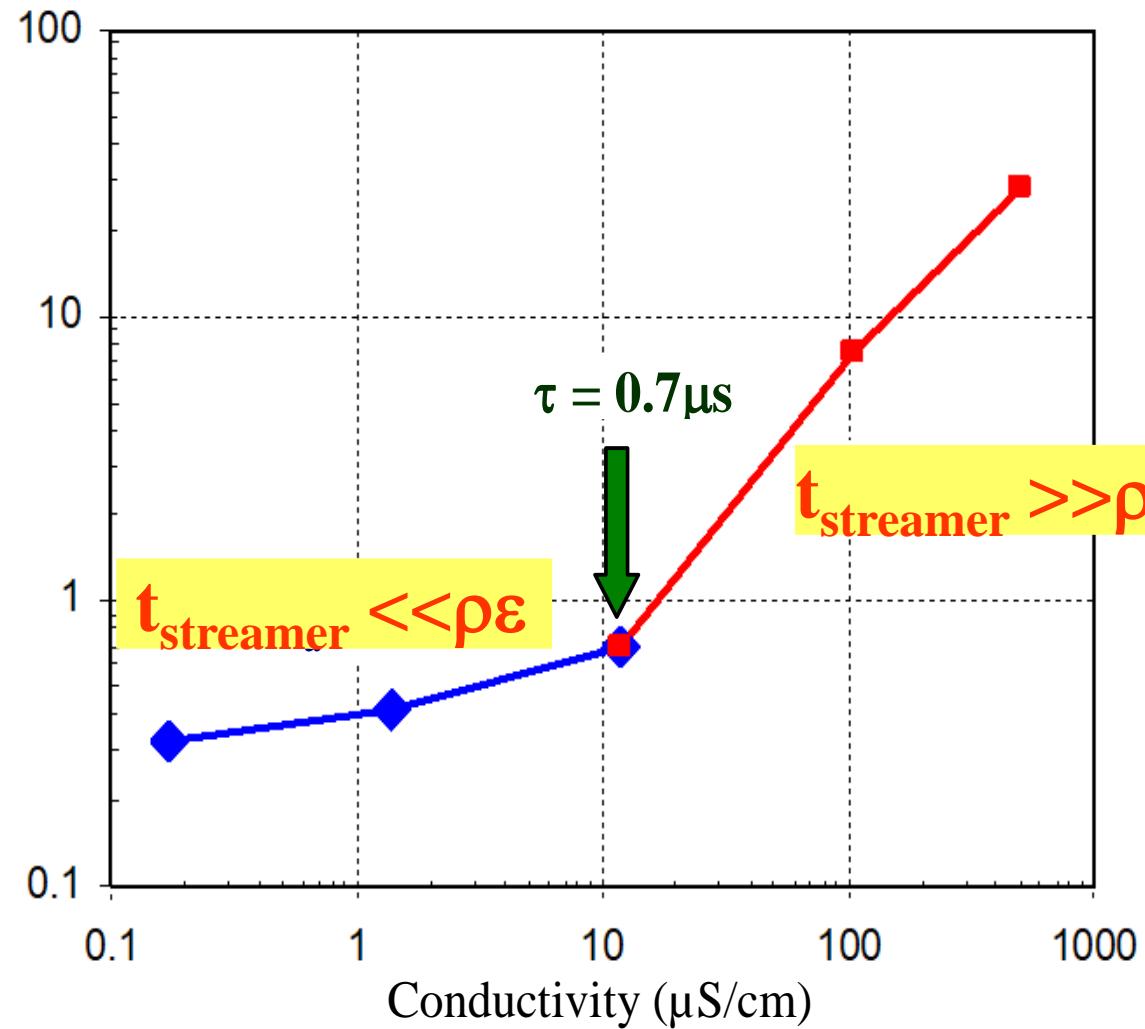
III - Un cas particulier: l'eau

$$\varepsilon = 80$$

$$\sigma = 0,1 - 1000 \mu\text{S/cm}$$

$$\text{Temps de relaxation électrique: } \tau = \varepsilon \rho = \mathbf{70\mu\text{s à } 7 \text{ ns}}$$

Streamer charge (μC)



$t_{\text{streamer}} \ll \rho\varepsilon$

$\tau = 0.7\mu\text{s}$

$t_{\text{streamer}} \gg \rho\varepsilon$

Courant de déplacement (C)

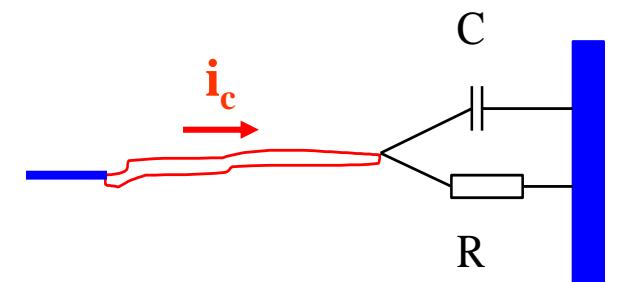
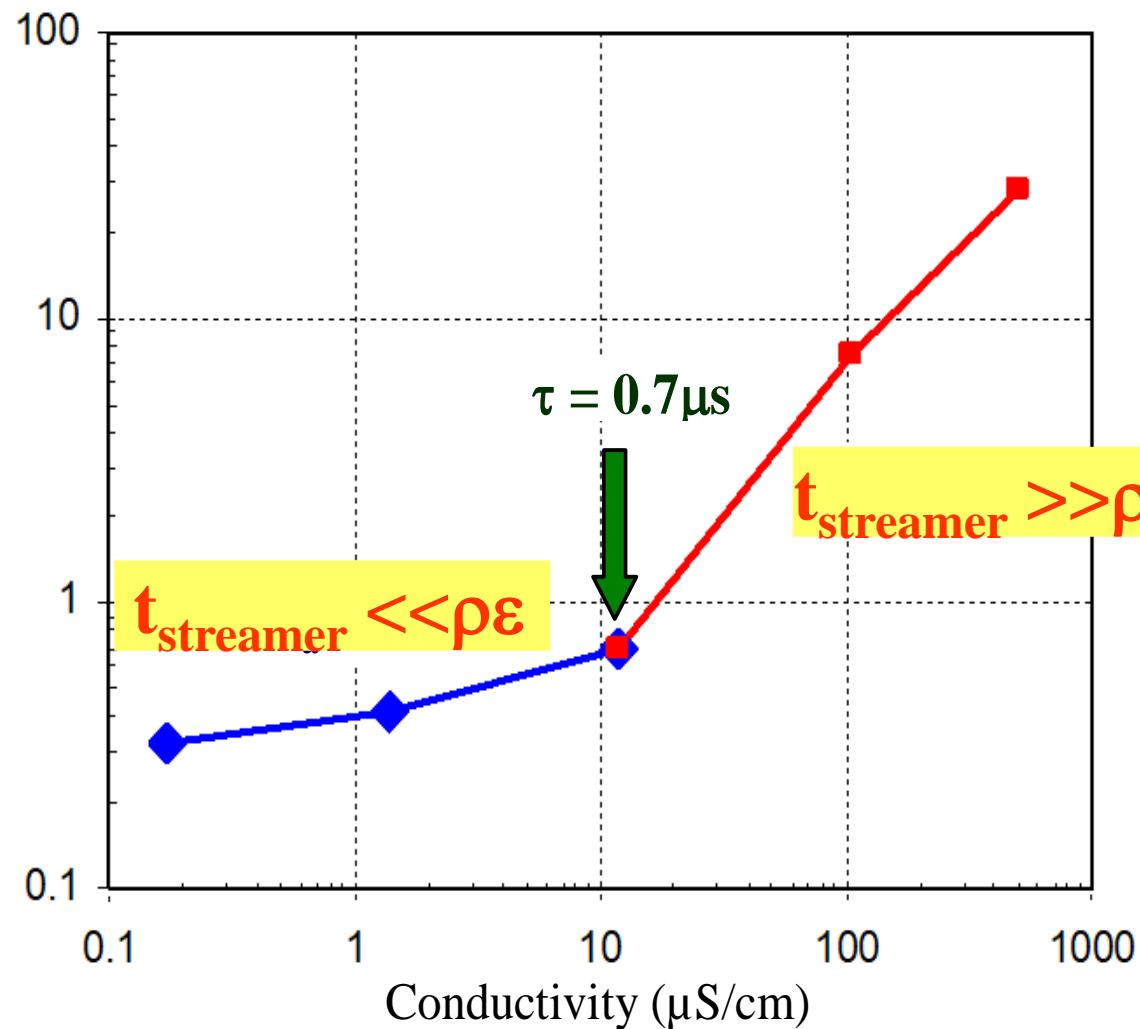
III - Un cas particulier: l'eau

$$\varepsilon = 80$$

$$\sigma = 0,1 - 1000 \mu\text{S/cm}$$

$$\text{Temps de relaxation électrique: } \tau = \varepsilon \rho = \mathbf{70\mu\text{s à } 7 \text{ ns}}$$

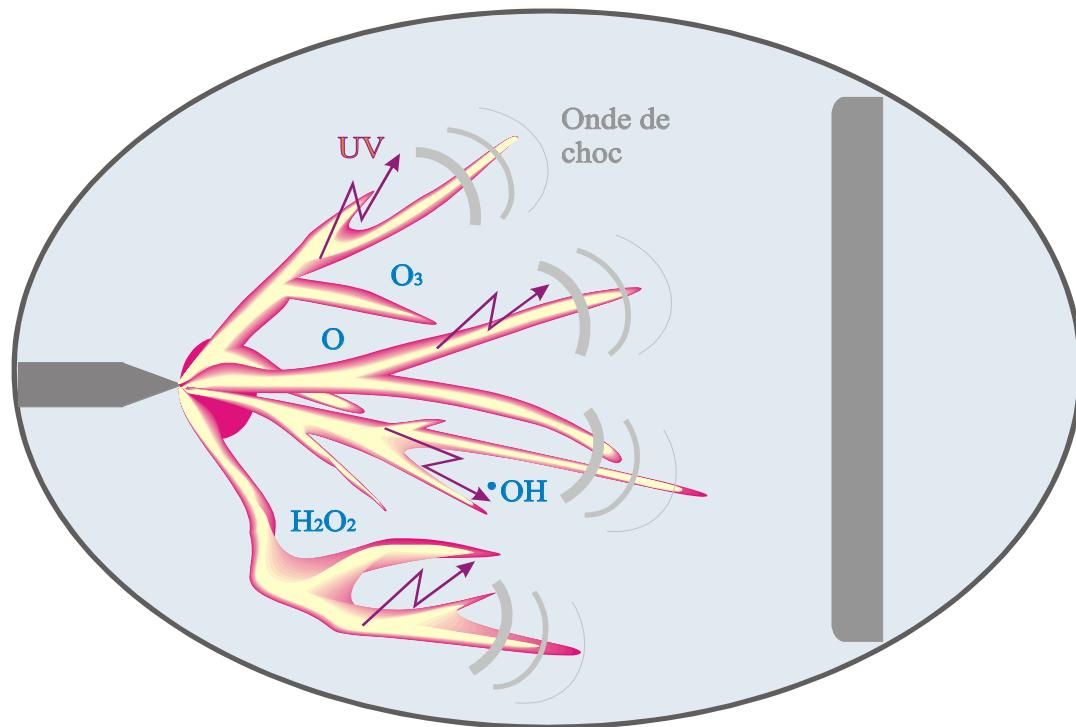
Streamer charge (μC)



déplacement (C)
+ conduction (R)

pertes Joules
autour du
streamer (R)

III - streamers dans l'eau: 1 - dégradation de polluants organiques (LCME – Poitiers)



Streamers « 3 & 4^{ème} modes » dans l'eau

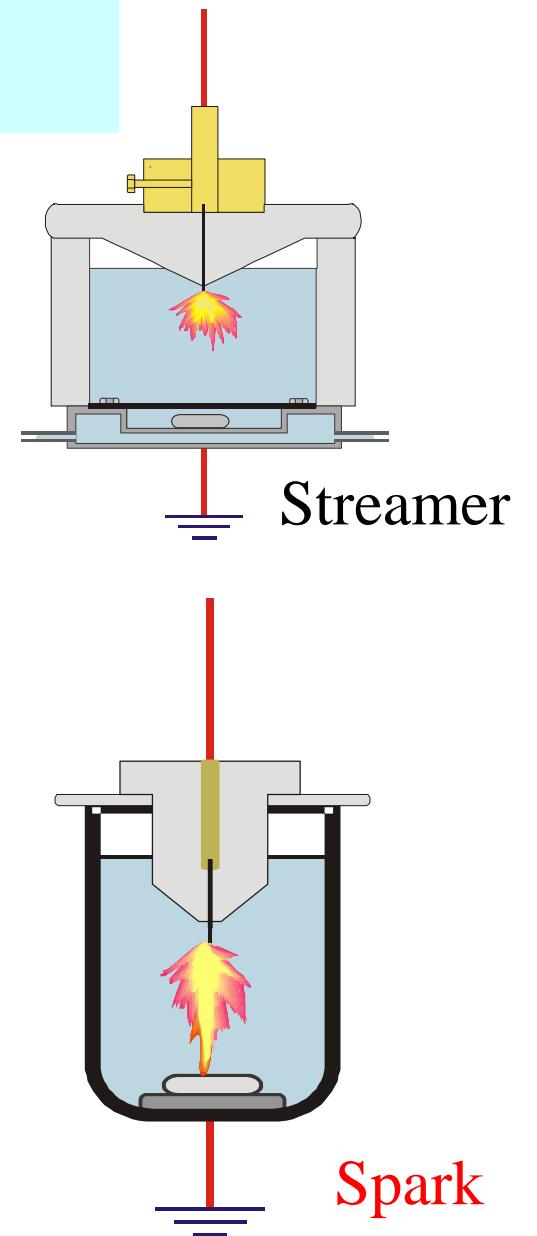
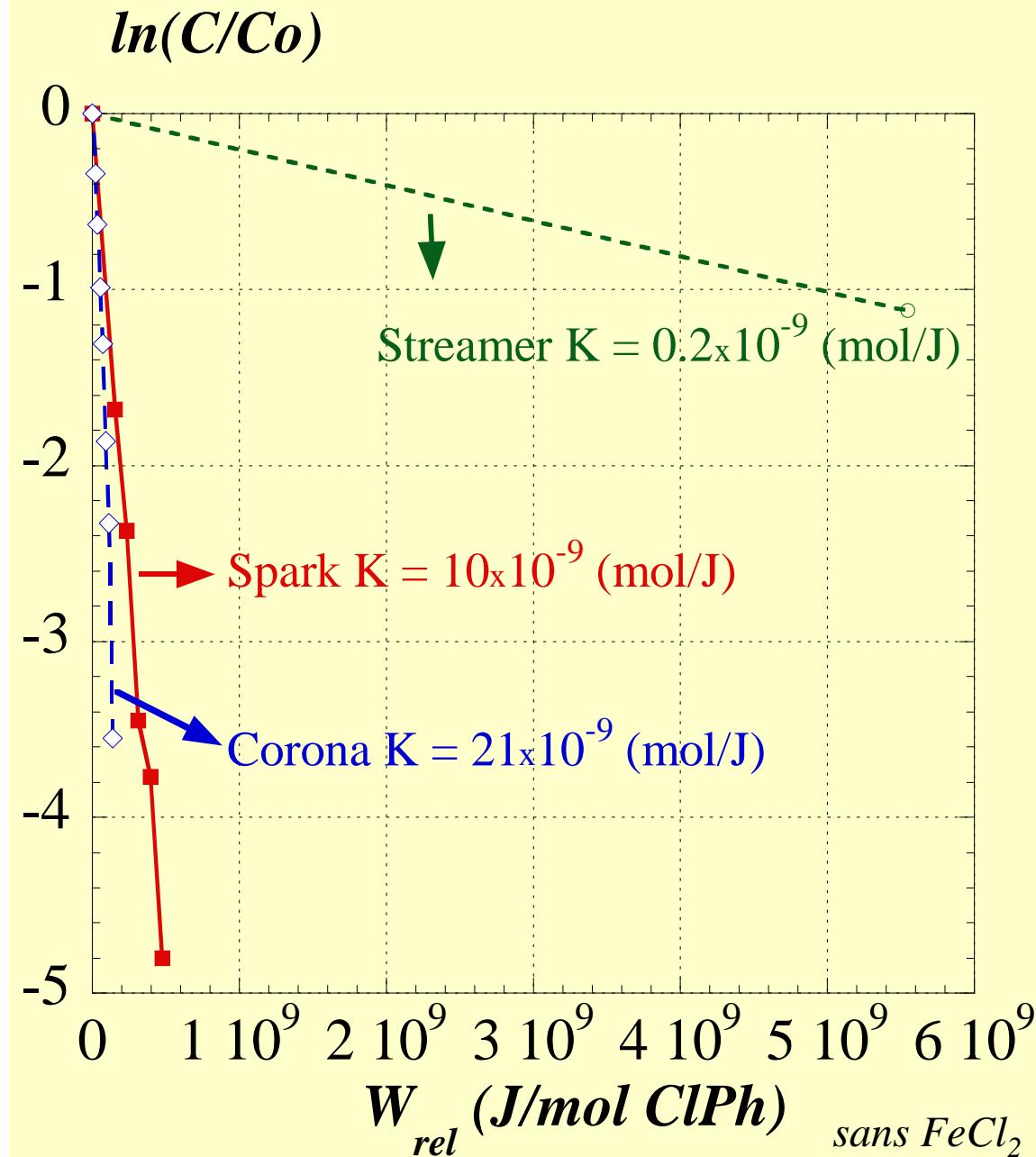
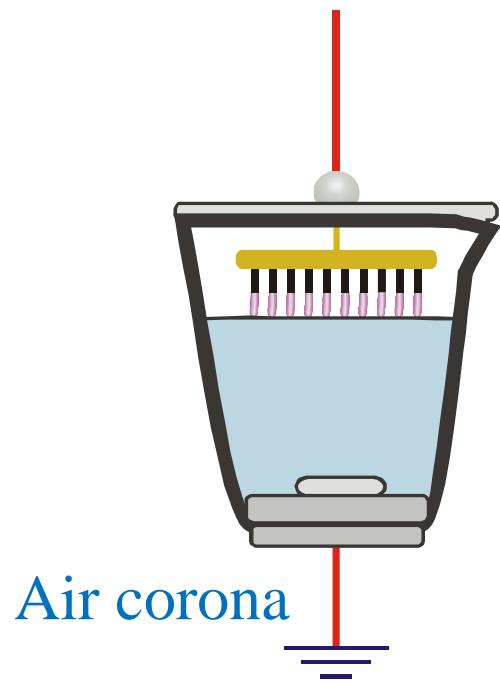
→ UV / OH / H₂O₂ / ondes de chocs

→ Dégradation de polluants organiques

→ (très) mauvaise efficacité énergétique !

- décharge haute pression ⇒ recombinaison OH ⇒ **H₂O₂ essentiellement**
- pertes par effet Joule ...

III – streamers dans l'eau: dégradation 4 - chlorophenol



Chemical yield $K(\mu\text{mol/kJ})$

$$\ln[C/C_o] \approx -k W_{rel}$$

		Streamer (eau)	Arc (eau)	Pulsed Corona (air)
4-CP	without FeCl_2	0.2	10.1	21
	with FeCl_2	5.0	15.3	36
4-NP	without FeCl_2	0.03	1	32
	with FeCl_2	2.7	6.8	51

III - streamers dans l'eau: 2 – fragmentation de matières végétales (TIMR – Compiègne)

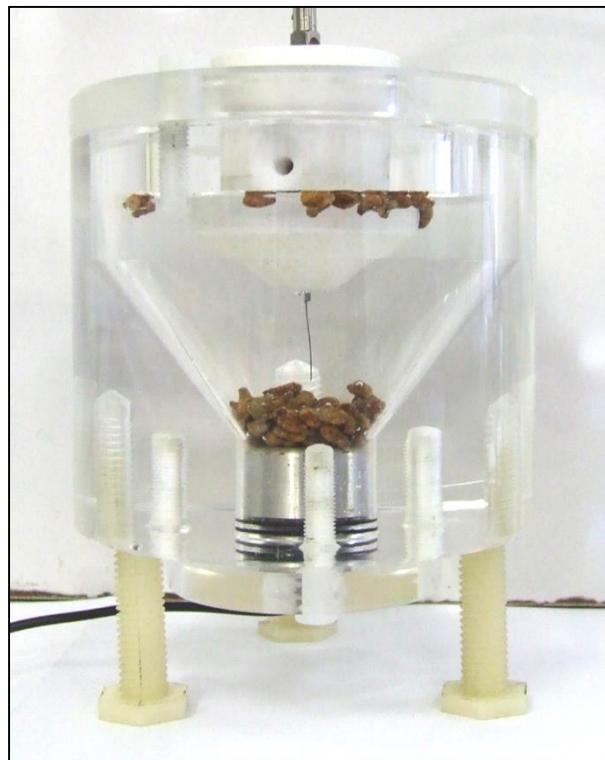
Streamers ou arcs dans l'eau:

→ ondes de chocs, cavitation

→ éclatement cellules végétales

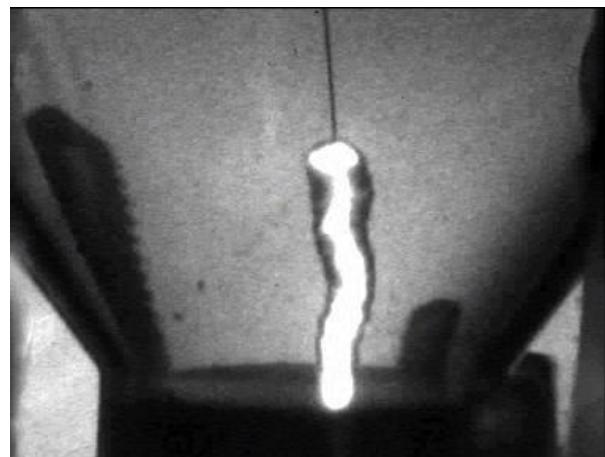
→ **extraction de sous- produits**

(pépins de raisin → polyphénols)

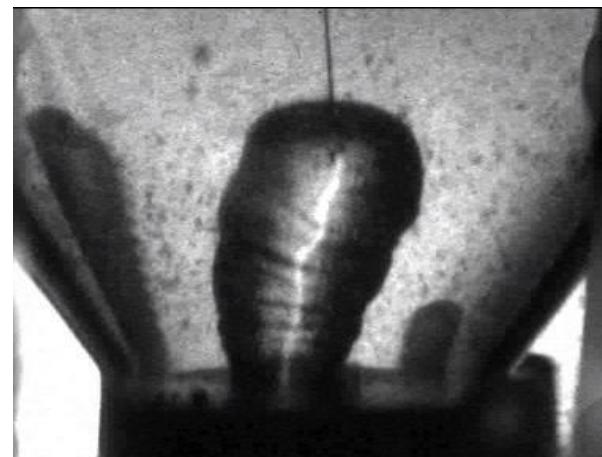


Avant traitement

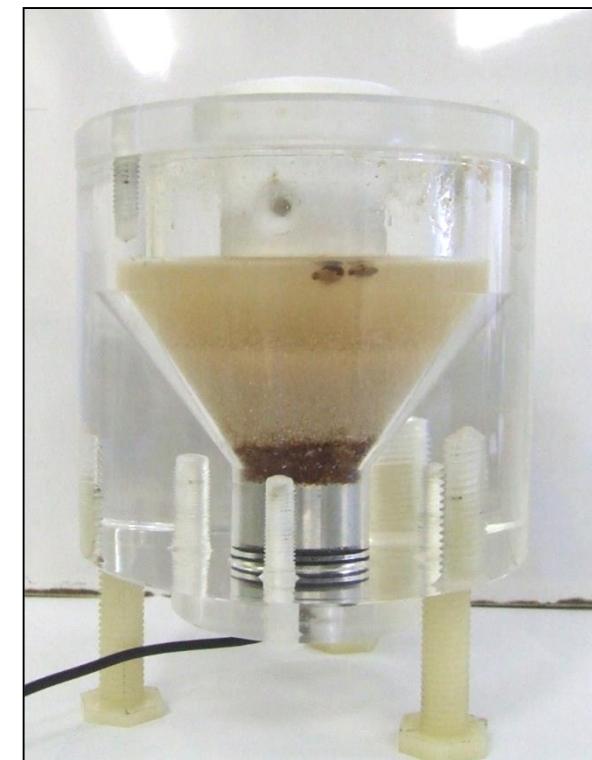
(45 kV, 600A, 3 à 10J)



Arc pulsé

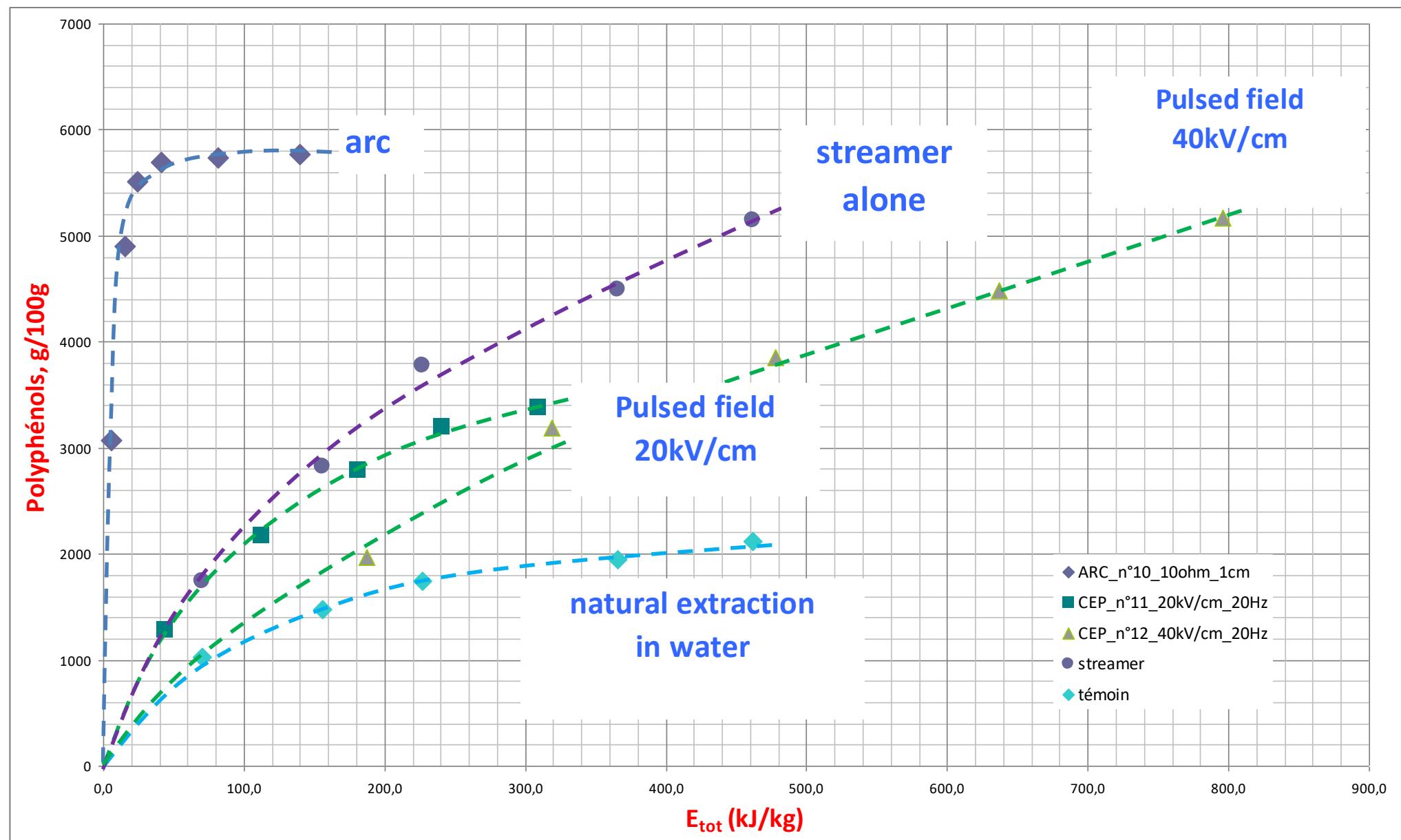


Cavitation



Après traitement

III - streamers dans l'eau: 2 – fragmentation de matières végétales (TIMR – Compiègne)

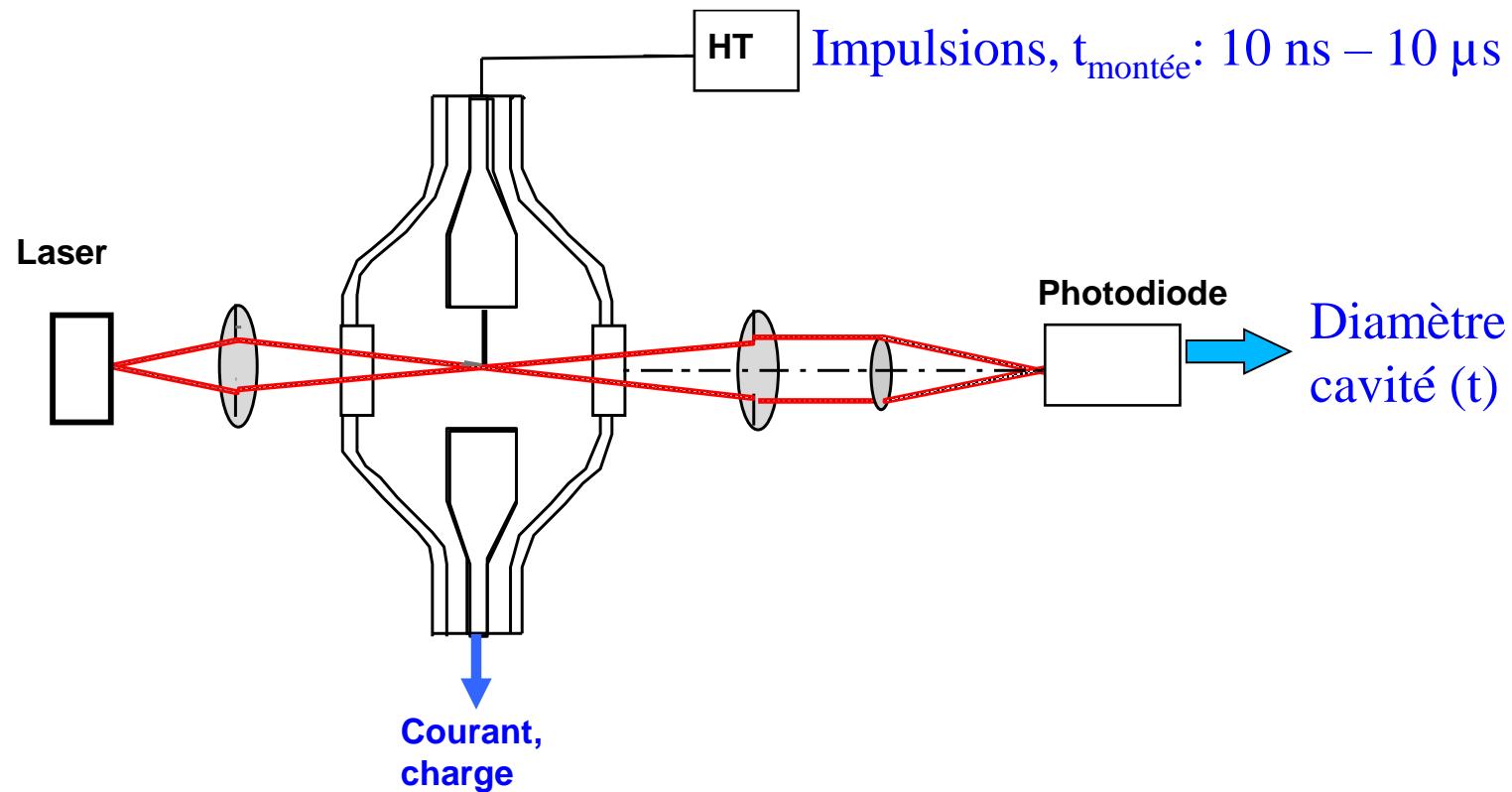


→ Très bonne efficacité énergétique (arc, effet mécanique)

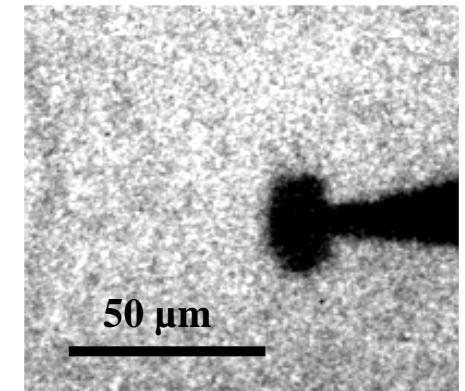
- pas de pertes Joules autour de l'arc

- I - Phénoménologie phénomènes prédisruptifs
 - caractères génériques: « modes » de propagation
 - cas de l'eau
 - Nature du liquide et additifs
- II - Nature gazeuse des canaux, influence de la pression
 - Caractérisation expérimentale, corrélation pression-vitesse
 - Représentation schématique, hypothèses, questions ...
- III - Propriétés électriques « macroscopiques » des canaux
 - Courant, paramètres
 - Cas de l'eau
- IV – Génération des streamers
 - Hydrocarbure non-polaire: cyclohexane
 - eau

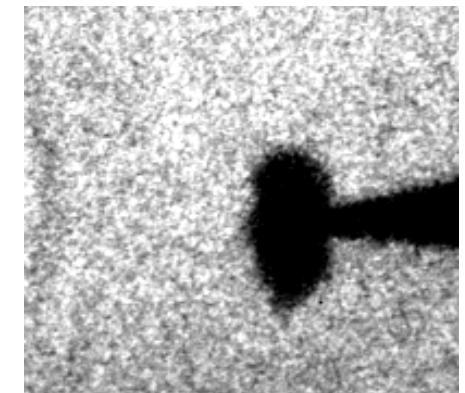
IV – Génération des streamers: cyclohexane



Négatifs
(9 kV / 0.1 Mpa)



0.5 μ s



0.8 μ s

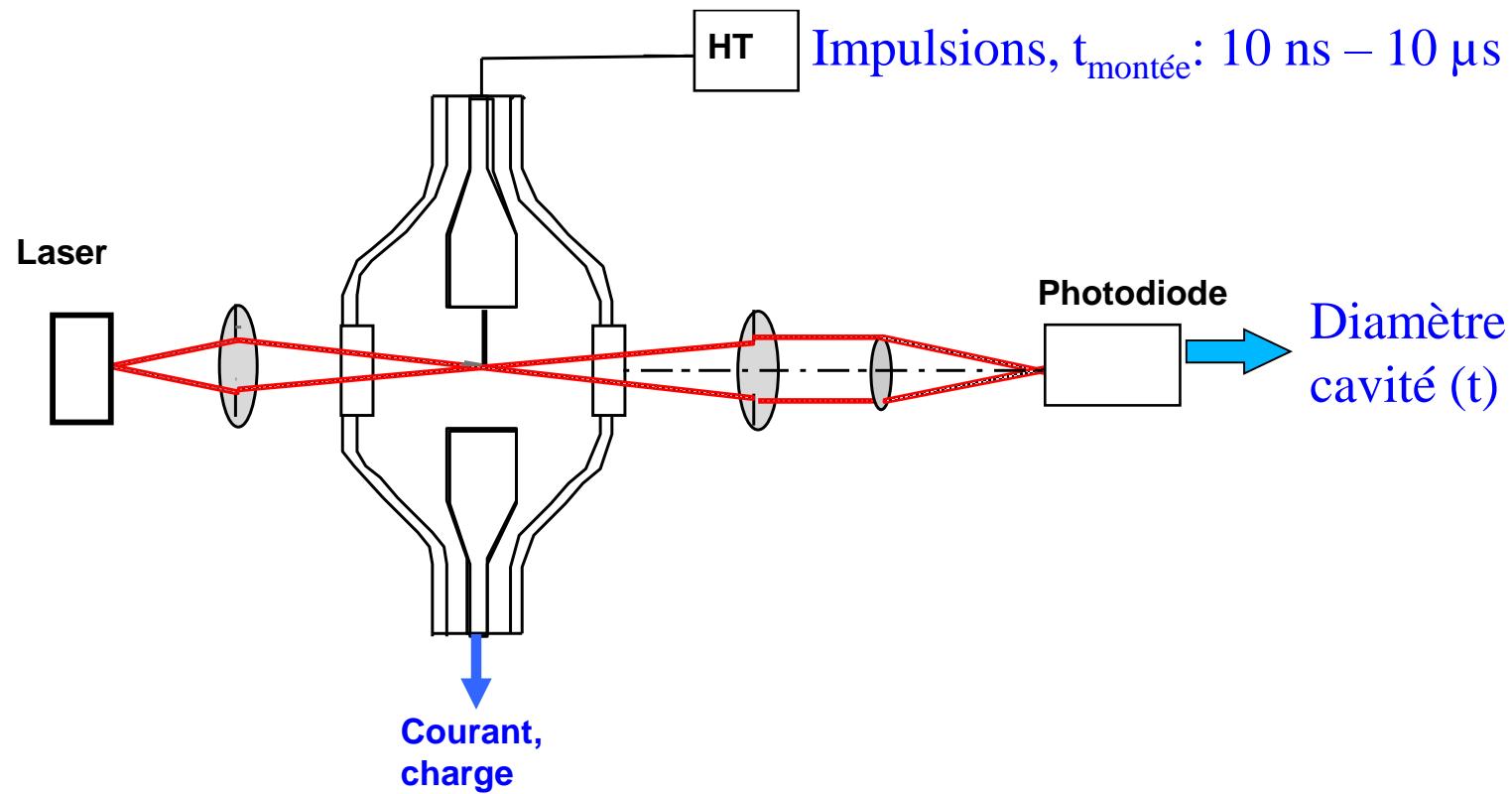


2 μ s

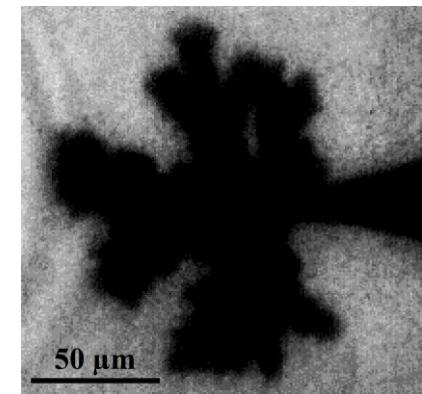
Paramètres:

- Polarité
- Pression (100 bars)
- Temps de montée

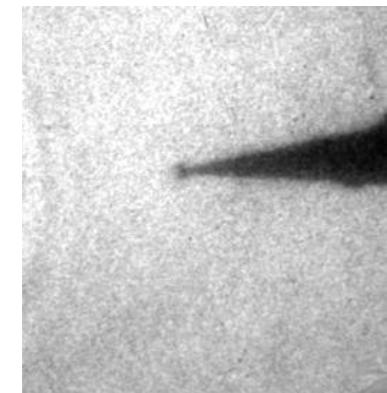
IV – Génération des streamers: cyclohexane



Positifs
(14 kV)



0.1 MPa

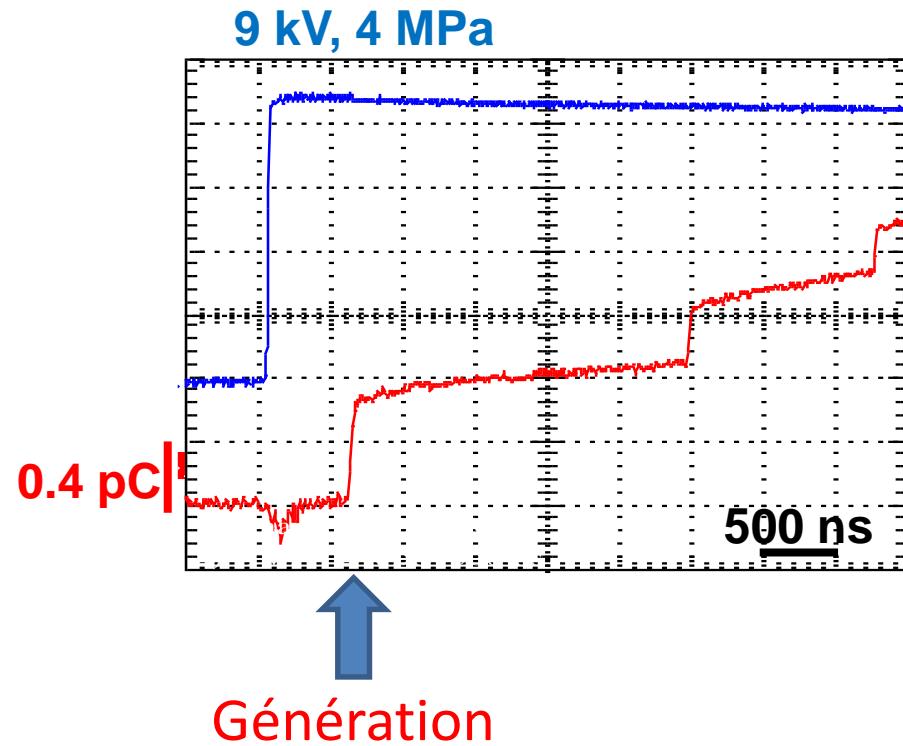


4 MPa

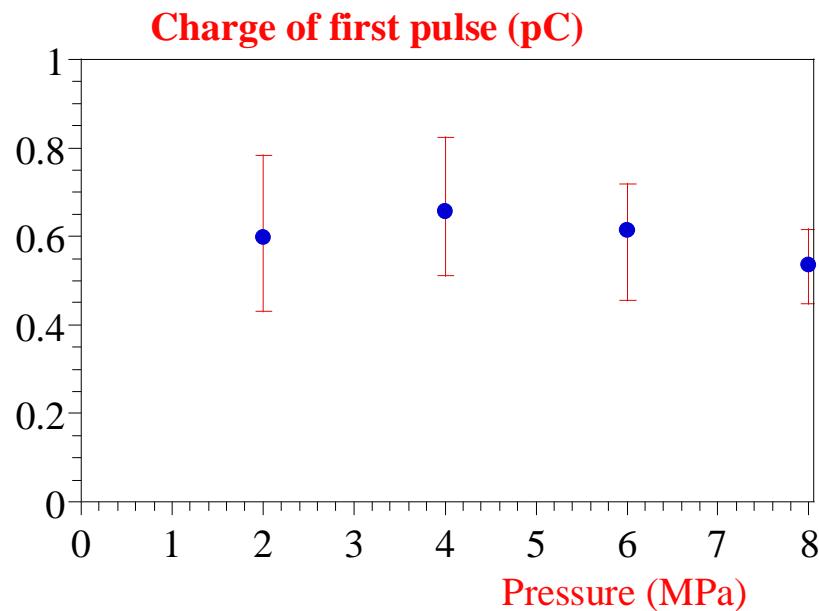
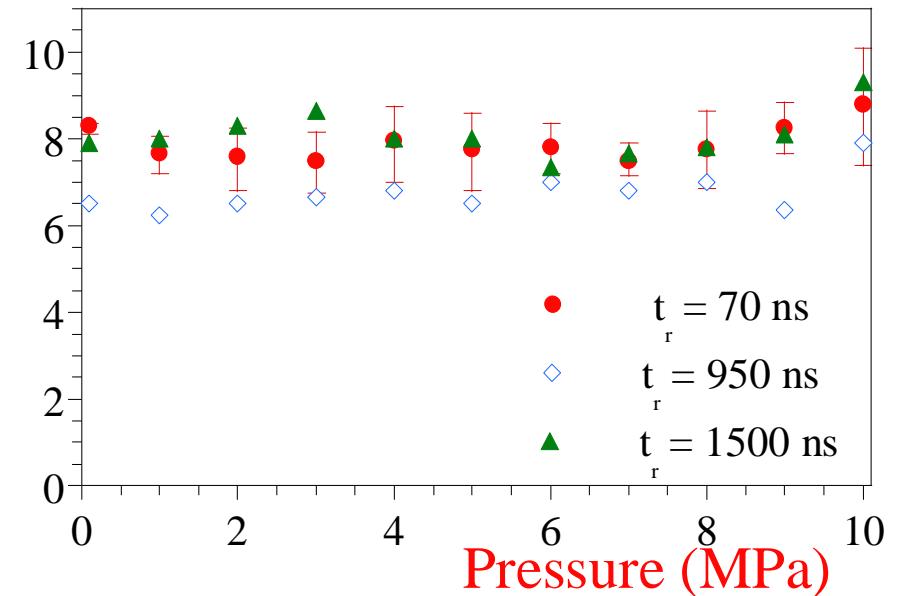
Paramètres:

- Polarité
- Pression (100 bars)
- Temps de montée

IV – Génération cyclohexane: polarité négative



50% inception voltage (kV)



Génération indépendante de la pression:

→ avalanche électronique en phase liquide (A. Denat, N. Bonifaci, F. Aitken)

IV – Génération cyclohexane: polarité négative

Scénario:

avalanche électronique en phase
liquide ($E_p \approx 6\text{MV/cm}$)

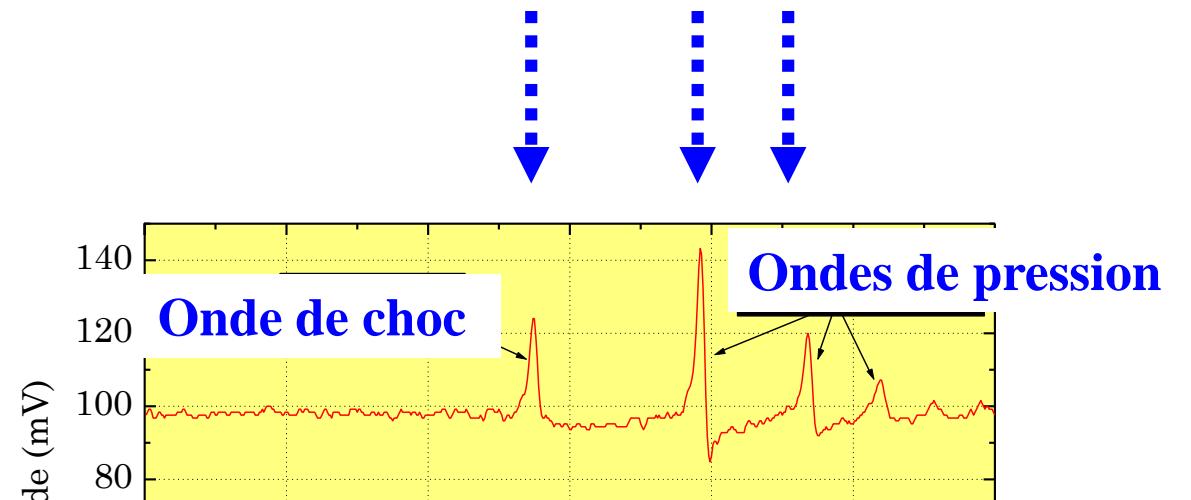
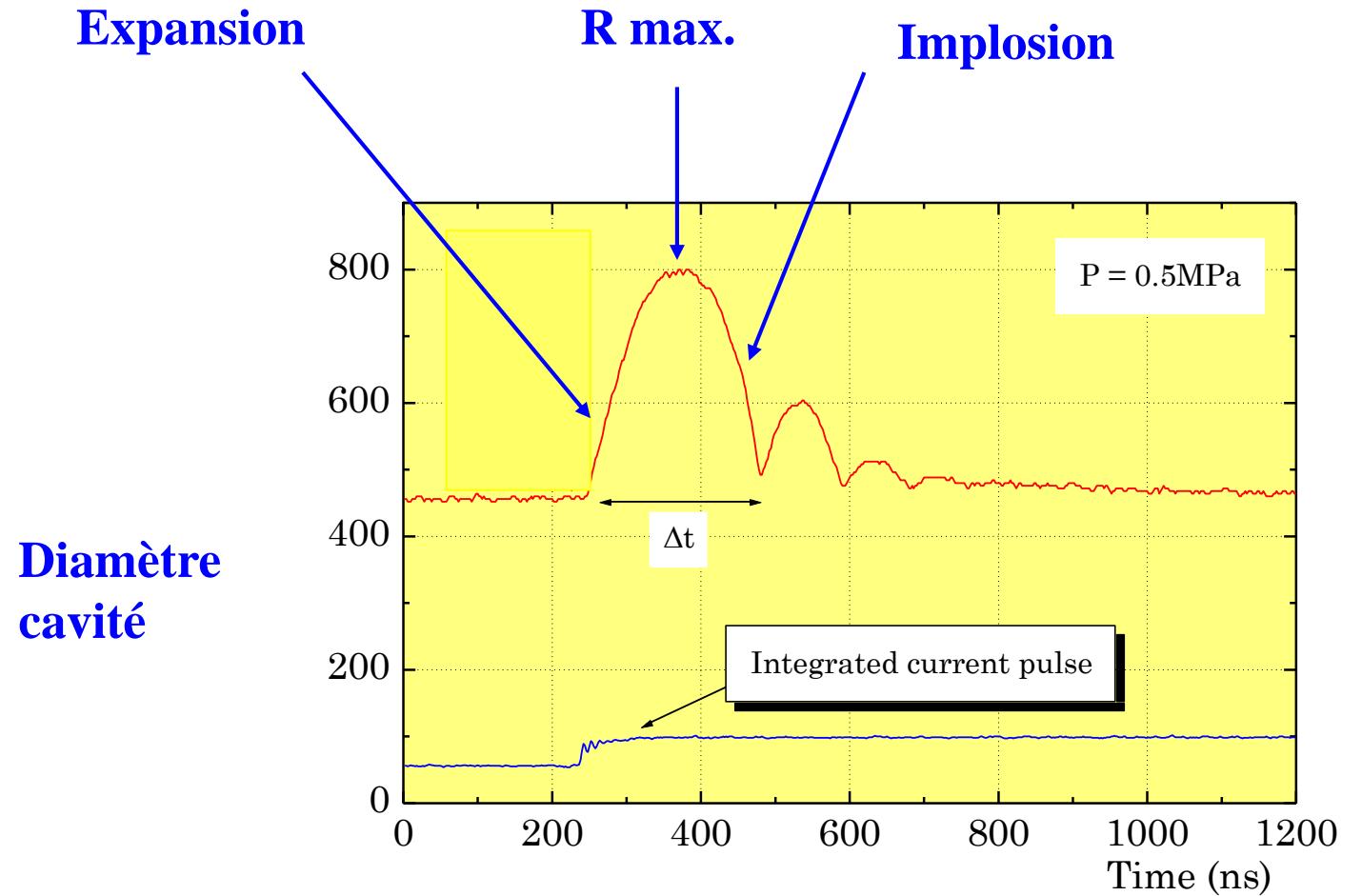


onde de choc



cavité

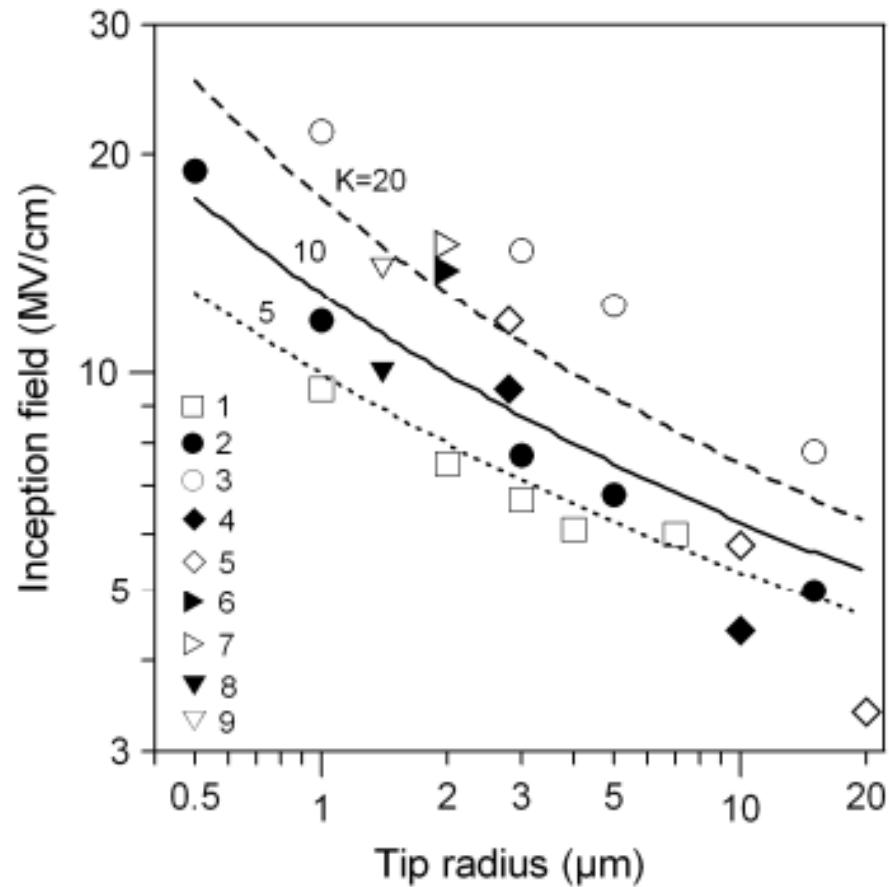
**Bulle = conséquence de l'avalanche
(et non l'inverse !)**



IV – Génération cyclohexane: polarité négative

Modélisable avec critère de streamer:

$$\ln N_{cr} = \int_0^x (\alpha -) dx = K_{str}$$



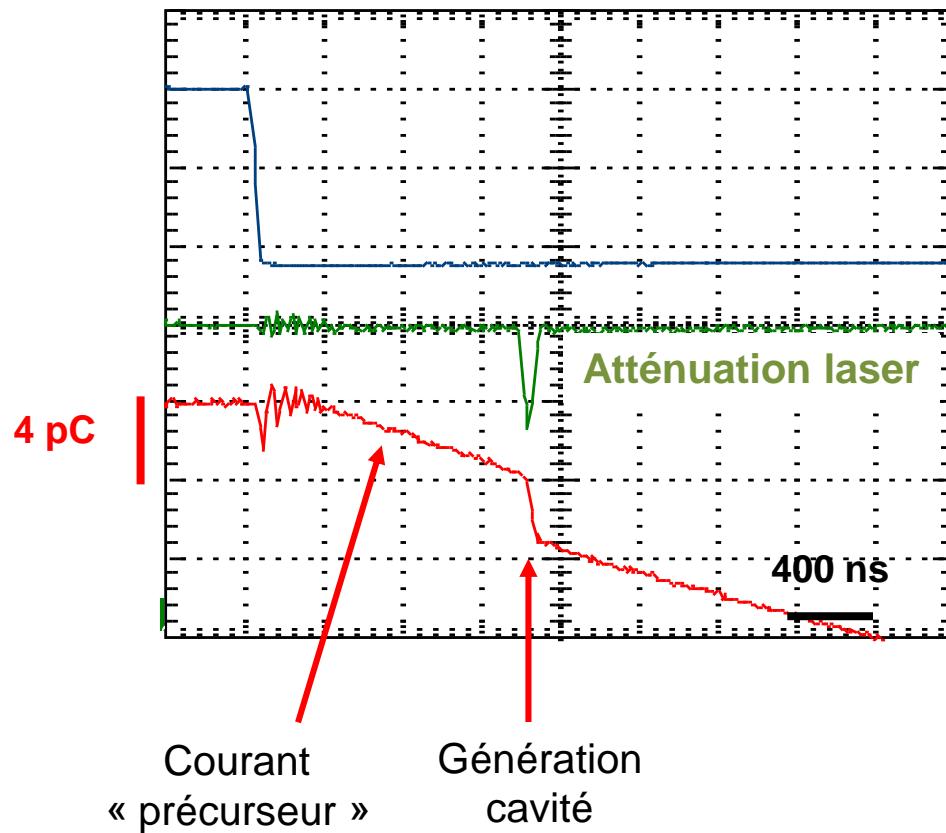
Naidis G.V., IEEE TDEI 2015

Données Haidara 91, Bonifaci 97

IV – Génération cyclohexane: polarité positive

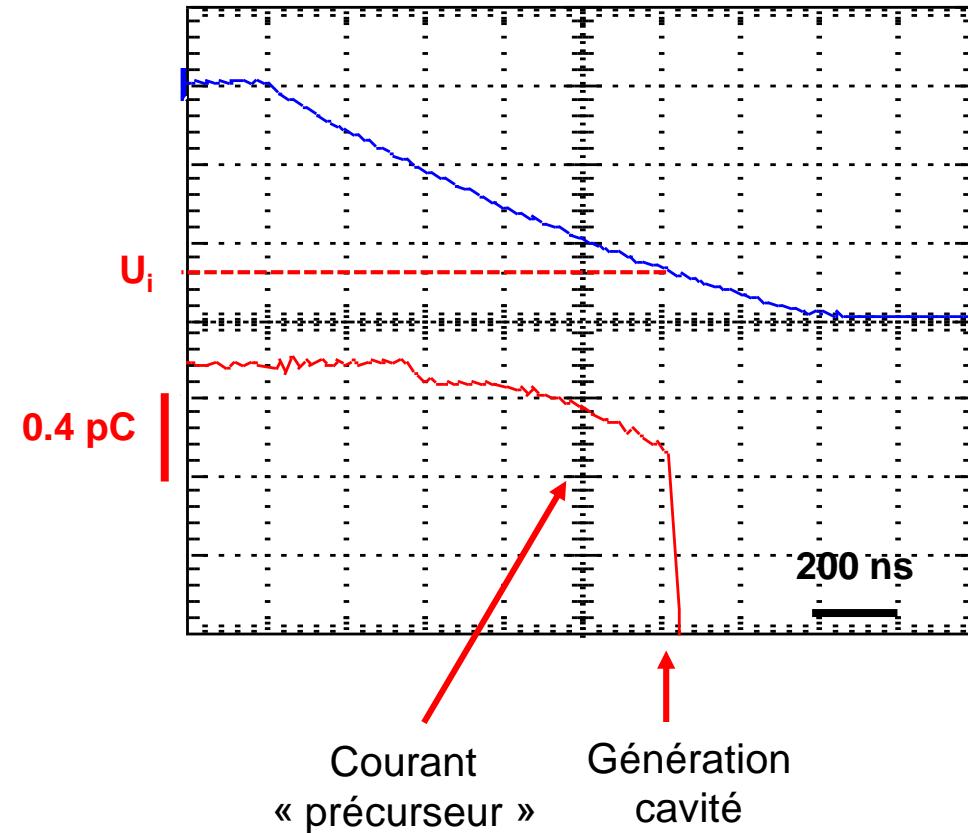
$t_{\text{montée court}} = 20 \text{ ns}$

24 kV / 8 MPa



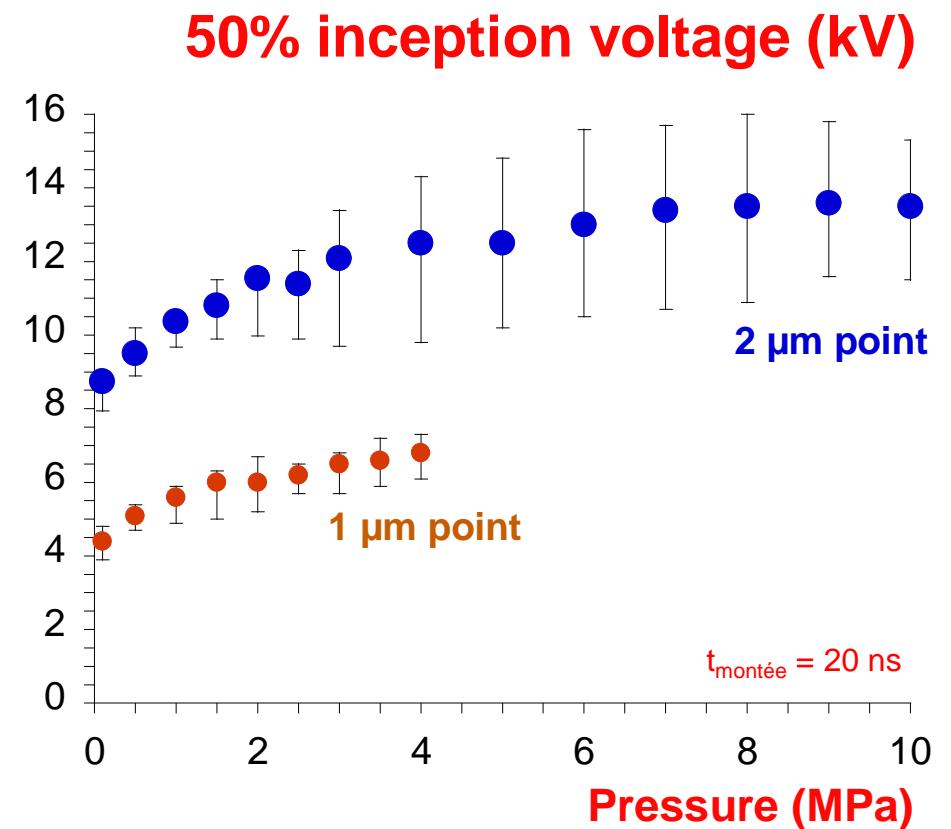
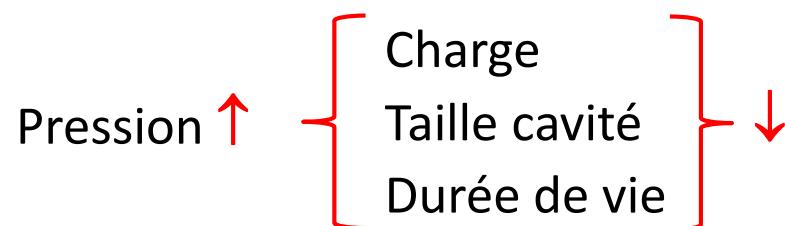
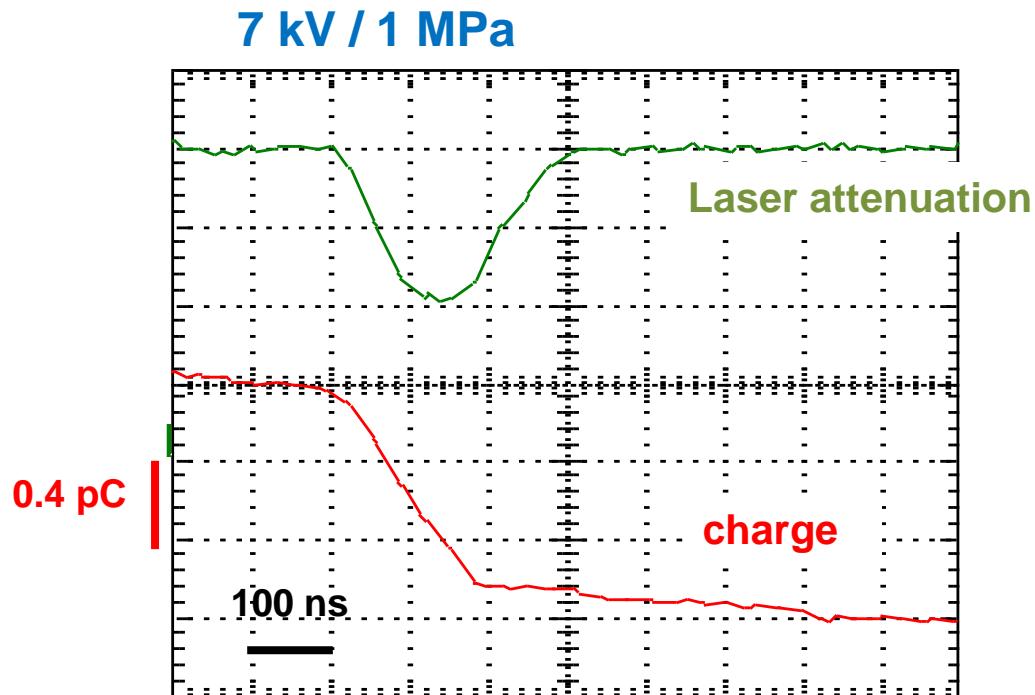
$t_{\text{montée long}} = 1.2 \mu\text{s}$

30 kV / 0.1 MPa



Il existe un courant « précurseur »
→ origine mal connue, impuretés ?

IV – Génération cyclohexane: polarité positive

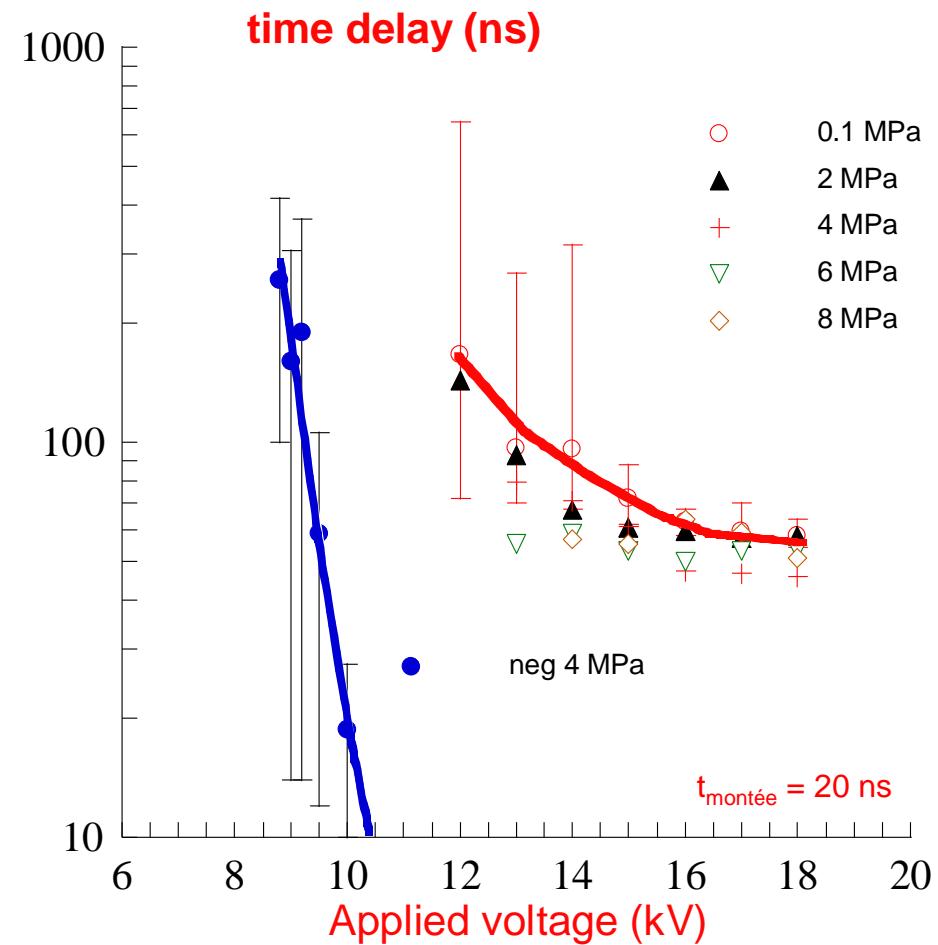


Scénario totalement différent !

- ✓ Courant et développement bulle simultanés
- ✓ Pas d'injection rapide d'énergie précédant la cavité
- ✓ la cavité disparait complètement à haute pression
- ✓ Seul phénomène indépendant de la pression: courant précurseur

IV – Génération cyclohexane: polarité positive

Temps de retard à l'apparition

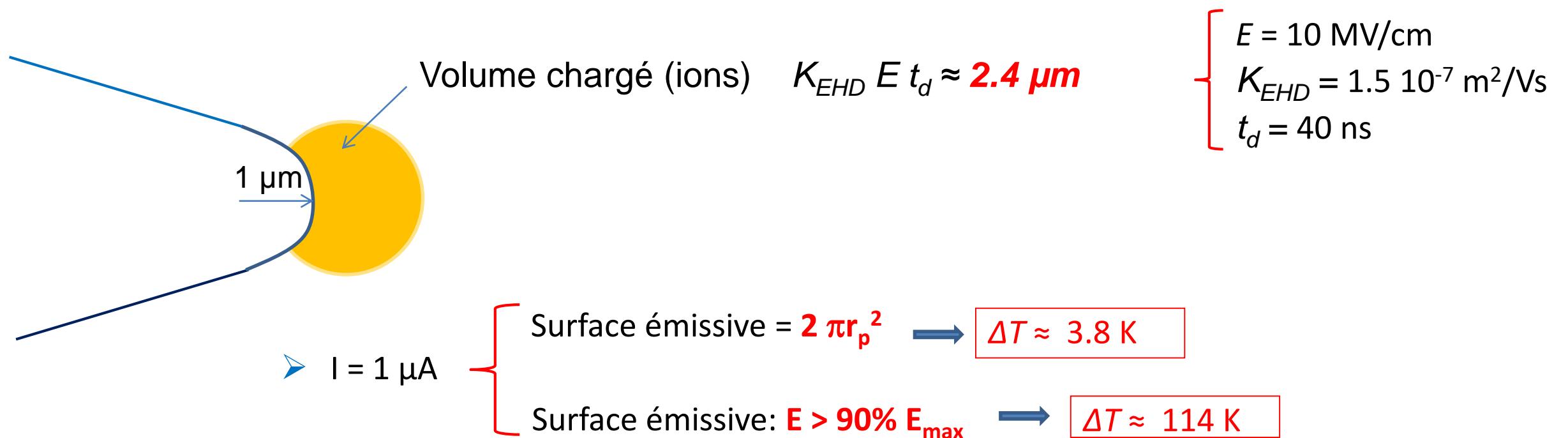


Polarité négative → uniquement « retard statistique »

Polarité positive → retard statistique + temps minimum formatif (45 ns)

IV – Génération cyclohexane: polarité positive

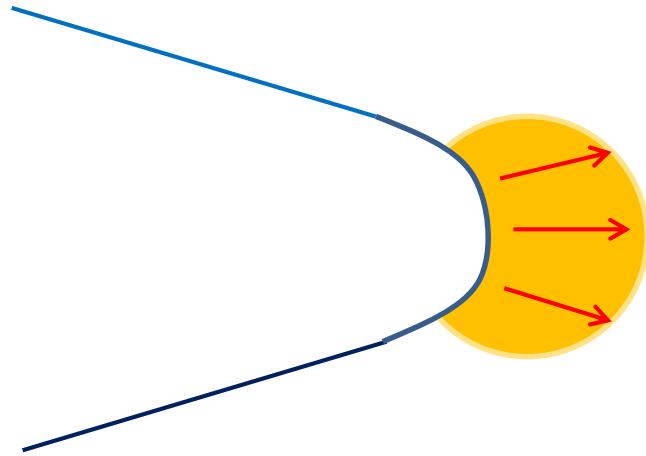
Hypothèse 1: ébullition thermique



→ ΔT insuffisant ...

IV – Génération cyclohexane: polarité positive

Hypothèse 2: cavitation EHD ?



$$E_{max} = 10 \text{ MV/cm}$$



✓ Vitesse liquide (EHD) = $K_{EHD} E = 170 \text{ m/s} !$

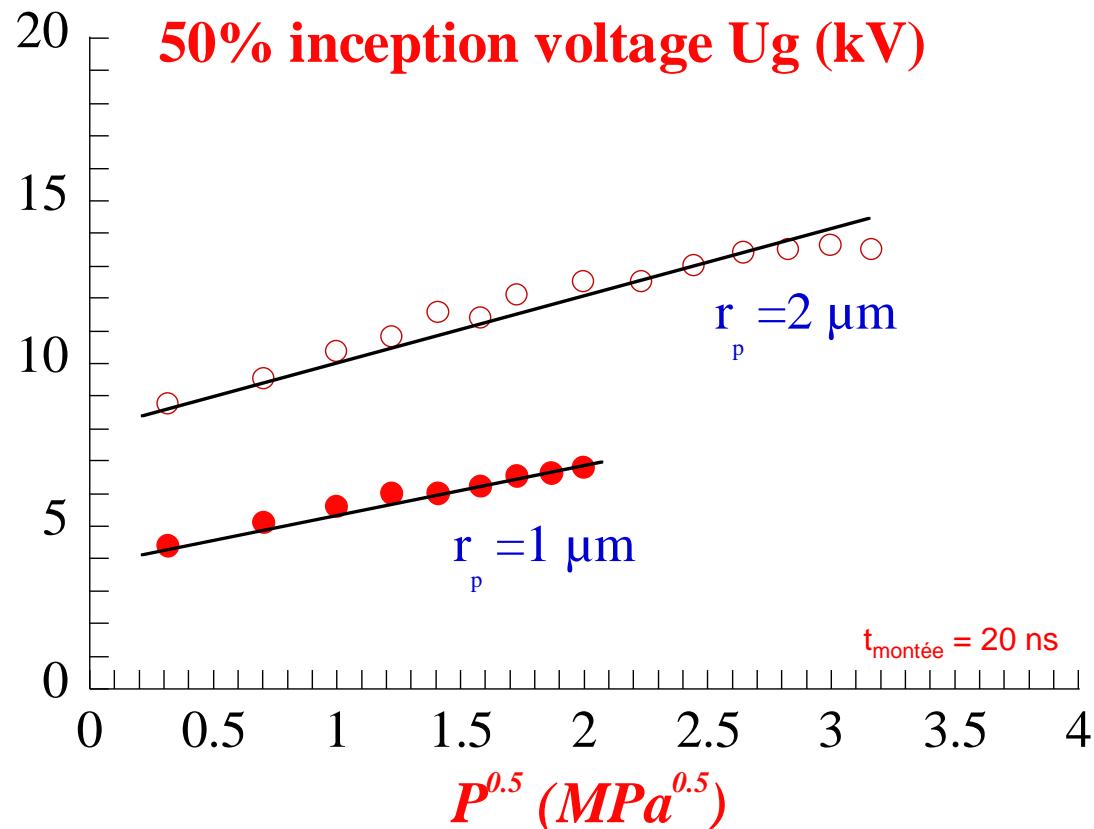


✓ Bernoulli: $\Delta P = 0.5 \rho v^2 = 110 \text{ bars} !$

$$\Delta P = \frac{\rho V^2}{2} = \frac{\rho (K_{ehd} E)^2}{2} = \alpha U_g^2$$

✓ Temps de retard à la mise en mouvement EHD:

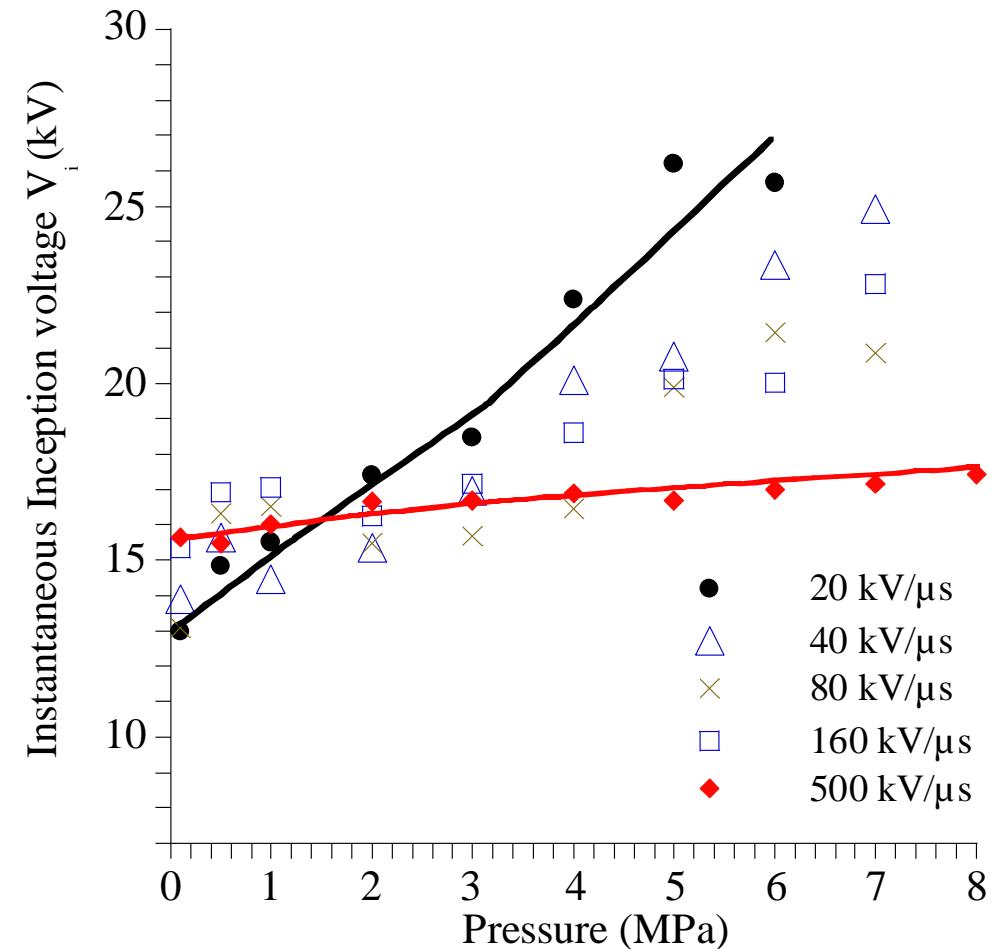
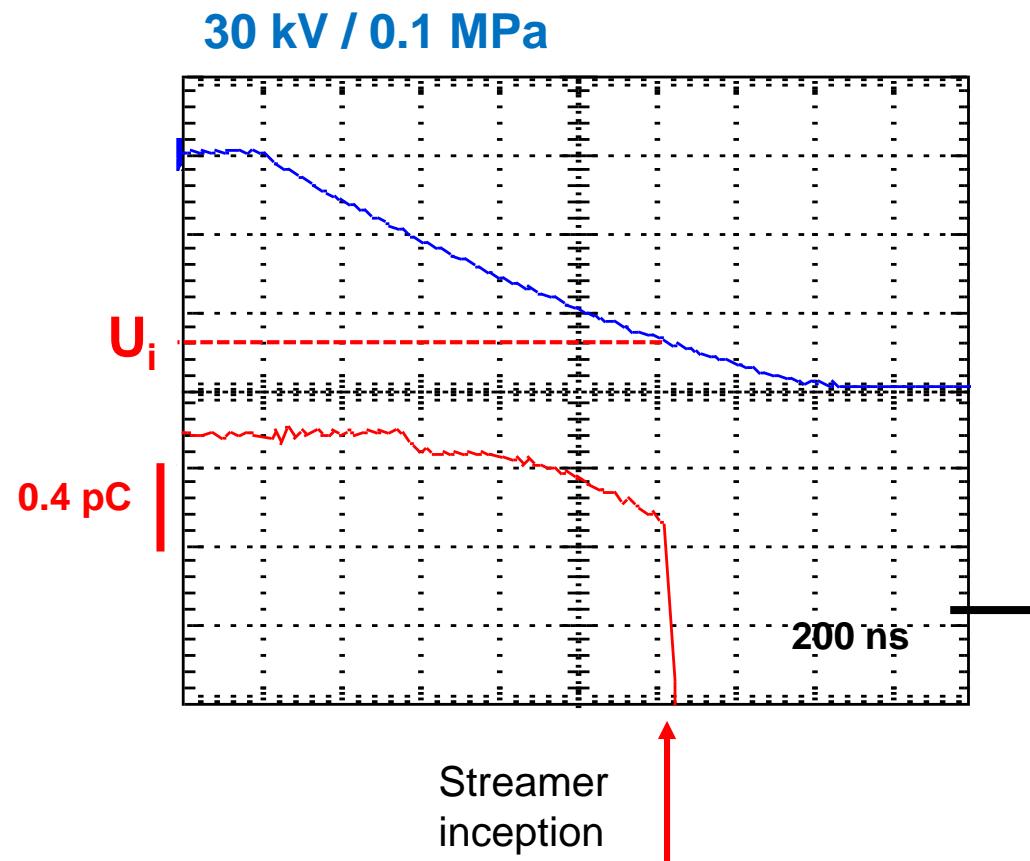
$$\approx 50 \eta / \varepsilon E^2 \quad (\eta : \text{viscosité dynamique}) \approx 7 \text{ ns}$$



Supporte l'hypothèse EHD avec faible temps de montée (10 ns)

IV – Génération cyclohexane: polarité positive

Forte influence du temps de montée ...



→ T montée court: U_i augmente peu avec la pression

→ T montée long (0,1 - 10 μ s):

→ influence de la pression \uparrow

→ T retard long

Ébullition « thermique » dominante ?

- génération haute pression favorisée par fort dV/dt
- génération basse pression favorisée par t montée long

IV – Génération hydrocarbures non polaires

→ **Polarité négative**: *mécanisme indépendant de la pression*

électron germe → avalanche électronique (< 1 ns) → onde de choc & cavité

- Pas de « temps formatif » (< 1 ns): électron fourni par émission de champ
- Temps de retard purement statistique

→ **Polarité positive**: *mécanisme dépendant de la pression*

mouvement EHD + échauffement → cavitation ?

- EHD domine avec $t_{\text{montée}} < 100 \text{ ns}$ ($dV/dt > 200 \text{ kV}/\mu\text{s}$)
- Ébullition thermique pourrait dominer aux temps longs

IV – Génération des décharges dans l'eau

Des conditions extrêmement favorables pour la génération de cavités !

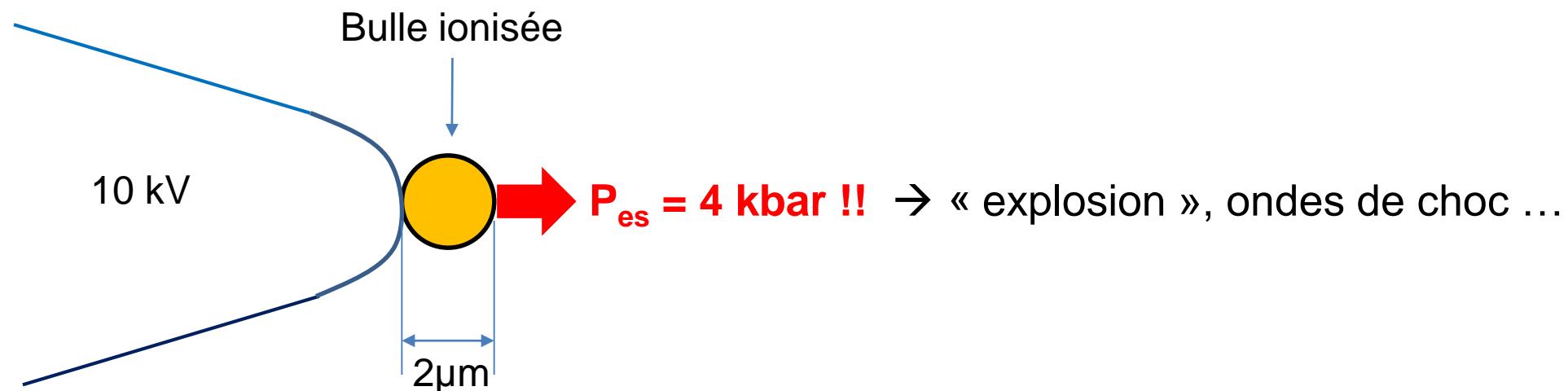
✓ $\sigma = 0,1 - 1000 \mu\text{S/cm} \rightarrow$ effet Joule considérable

$$(1000\mu\text{S/cm}, E = 1\text{MV/cm}) \rightarrow P = \sigma E^2 = 10^9 \text{ W/cm}^3$$

✓ $\varepsilon = 80 \rightarrow$ mobilité EHD élevée ($\sqrt{\frac{\varepsilon}{\rho}} = 4,2 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{Vs}$)

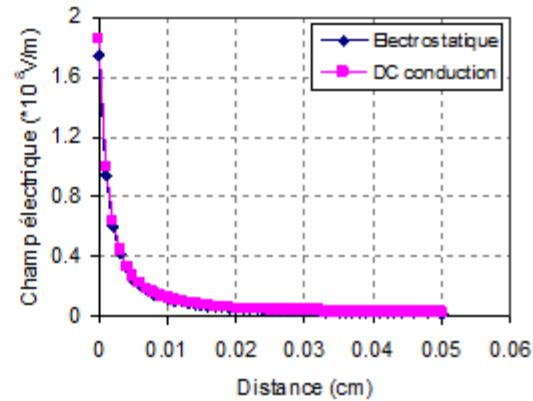
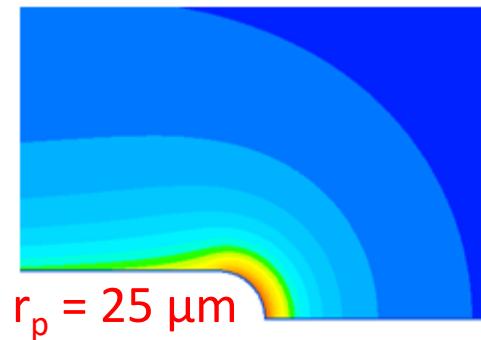
$E = 1\text{MV/cm} \rightarrow$ vitesse EHD = 42 m/s $\rightarrow \Delta P = 9 \text{ bar}$ (Bernouilli) \rightarrow cavitation

✓ $\varepsilon = 80 \rightarrow$ effets électromécaniques exacerbés (pression Electrostatique $P_{es} = \frac{\epsilon E^2}{2}$)

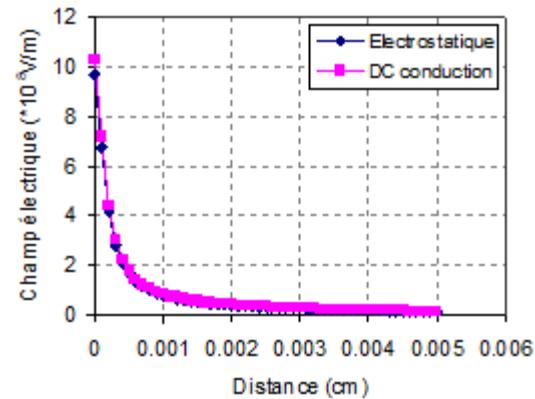
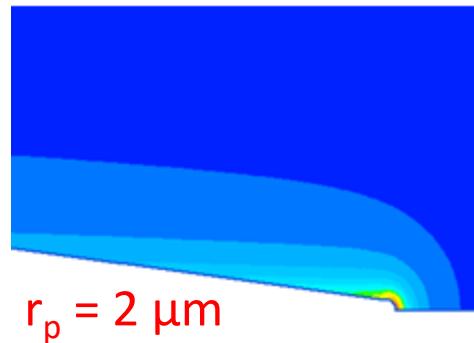


IV – Génération des décharges dans l'eau

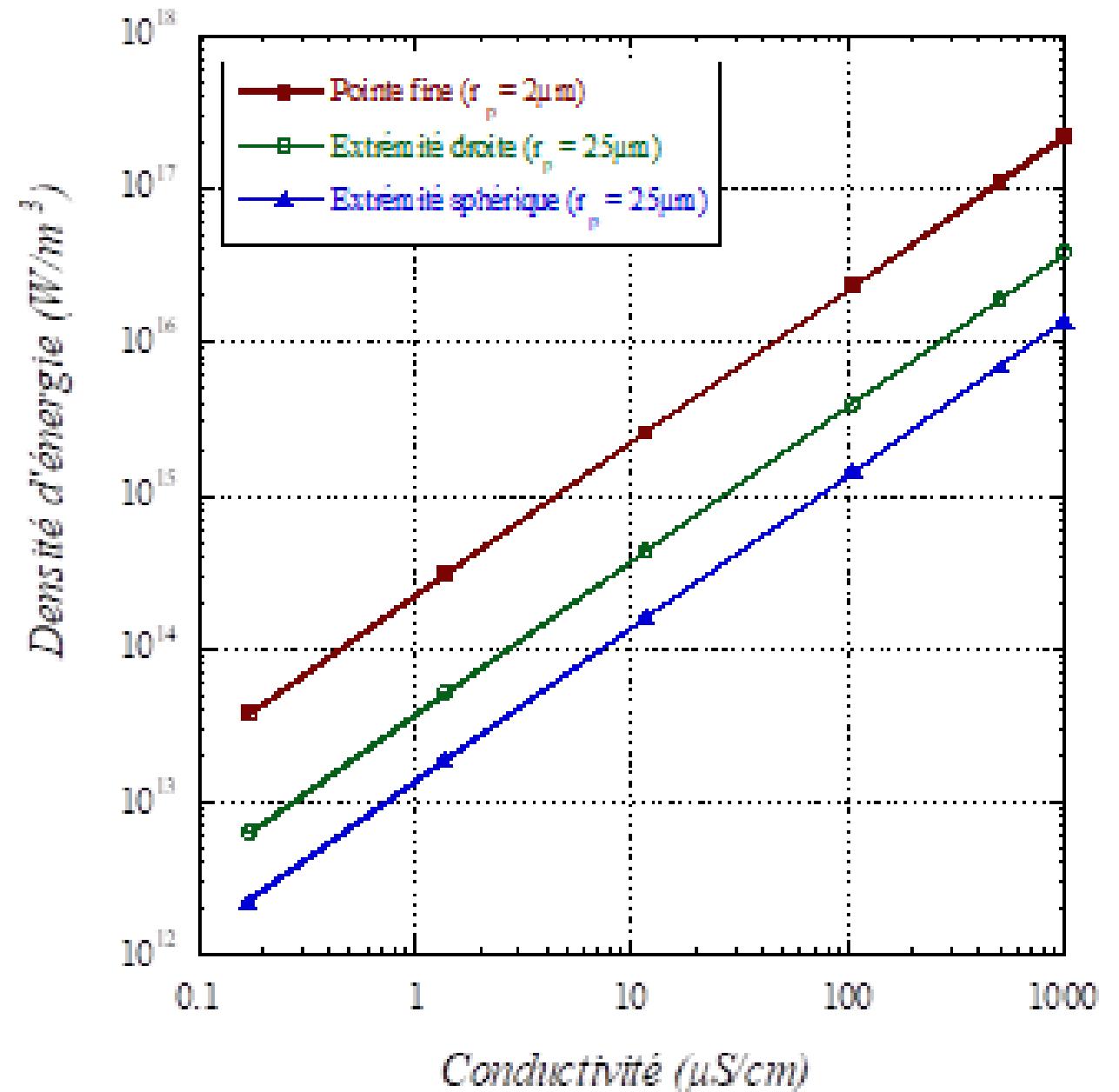
Exemple 1: Electrodes pointes, 20 kV → **E = 2 à 10 MV/cm**



(a)



(c)



→ Hypothèse « basse »: pas de prise en compte de l'élévation de conductivité (T) • 58

IV – Génération des décharges dans l'eau

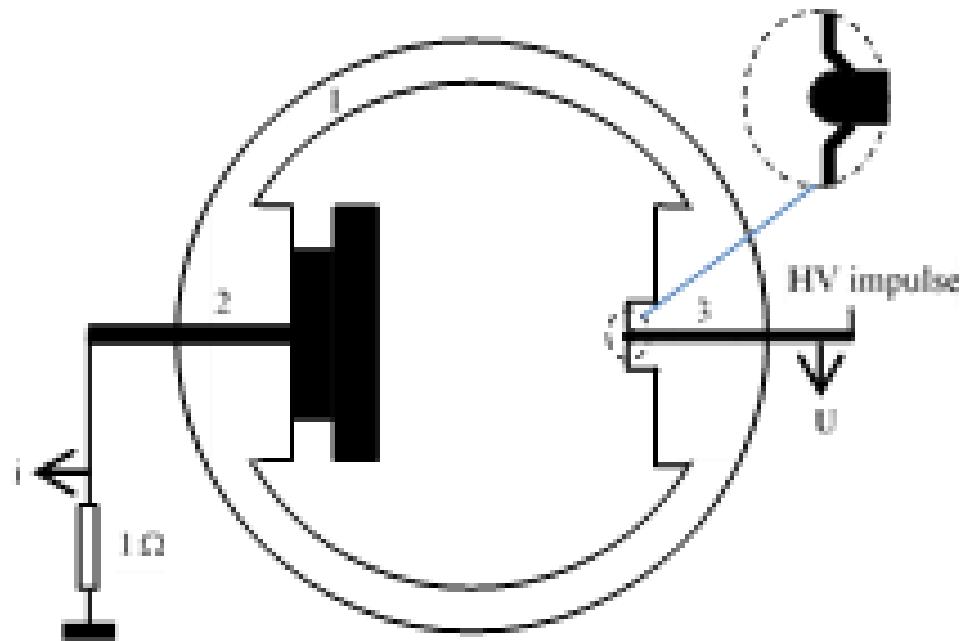
Exemple 1: Electrodes pointes, 20 kV → **E = 2 à 10 MV/cm**

σ ($\mu\text{S/cm}$)	W (Cal/cm³) dissipée au bout d'un temps de 100ns (U = 20kV)		
	Pointe fine ($r_c = 2 \mu\text{m}$) 10 MV/cm	Extrémité droite	Pointe arrondie ($r_c = 25 \mu\text{m}$) 1,8 MV/cm
0.17	0.90	0.15	0.06
1.4	7.2	1.2	0.45
12	61	10	3.8
105	555	94	34
503	2672	453	166
1000	5309	900	329

Vitesse EHD	420 m/s		76 m/s
ΔP (EHD)	900 bar		29 bar

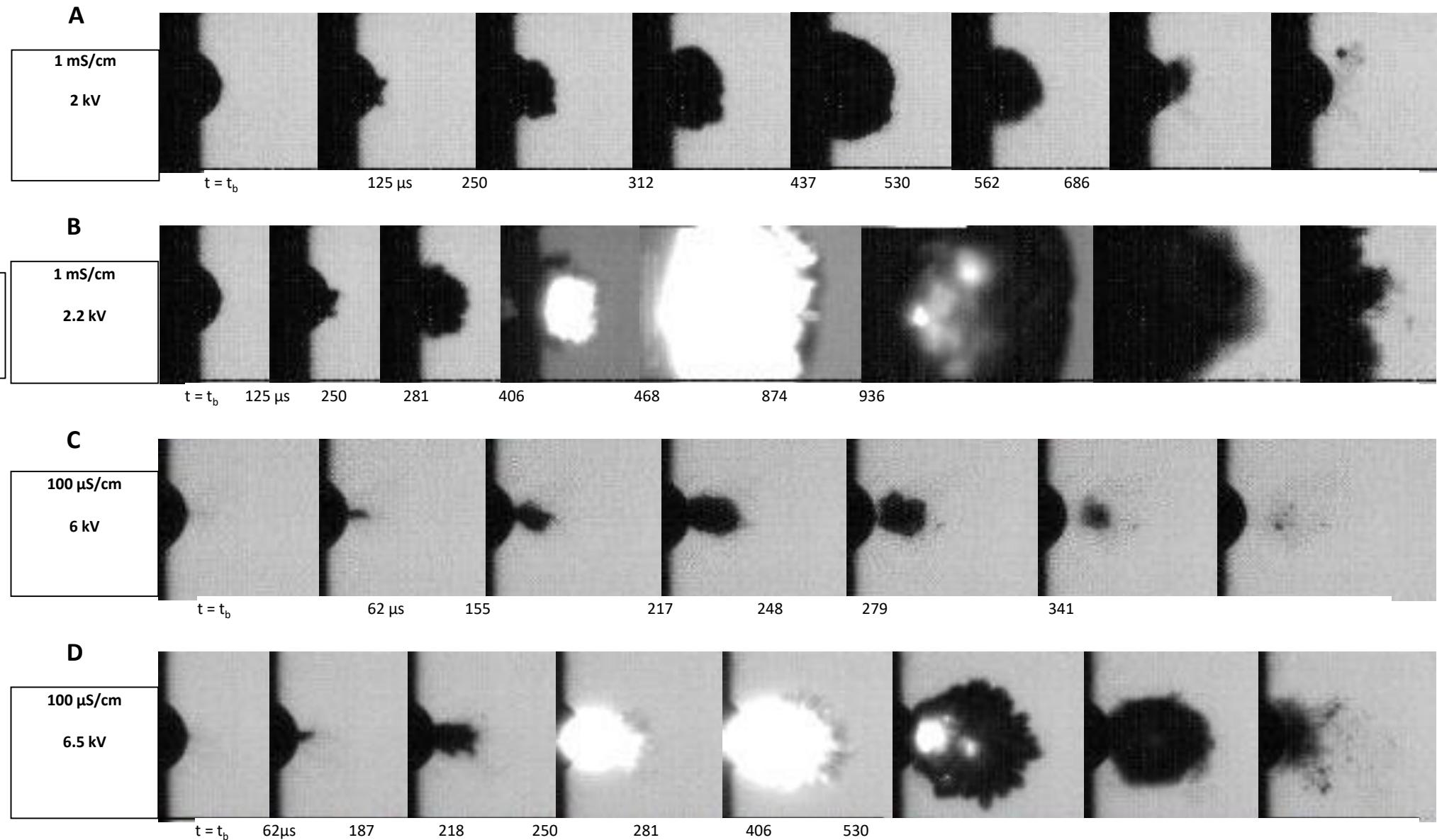
IV – Génération des décharges dans l'eau

Exemple 2: Electrode sphère 1,2mm, $E \approx 20$ à 200 kV/cm



IV – Génération des décharges dans l'eau

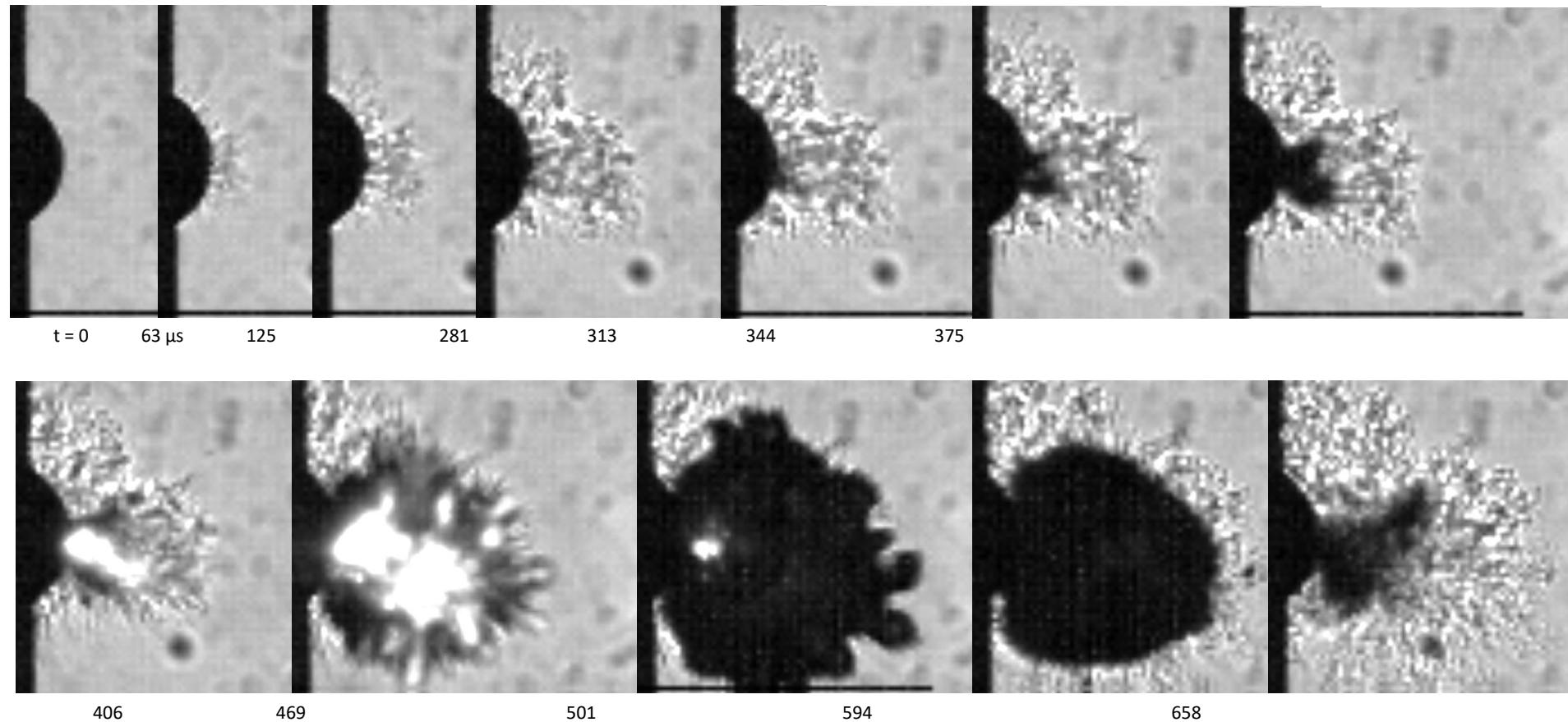
Ombroscopie, 32000 images /seconde



- Etapes
- Génération bulle vapeur
 - Ionisation bulle
 - Croissance « explosive »
 - Implosion

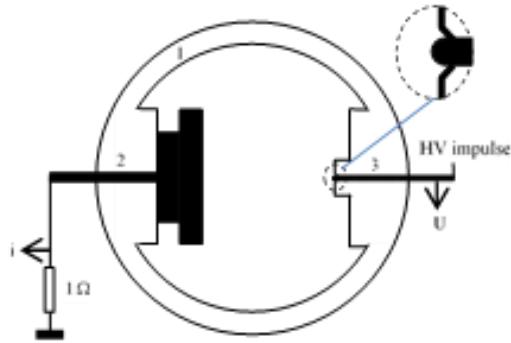
IV – Génération des décharges dans l'eau

Strioscopie, 32000 images /seconde



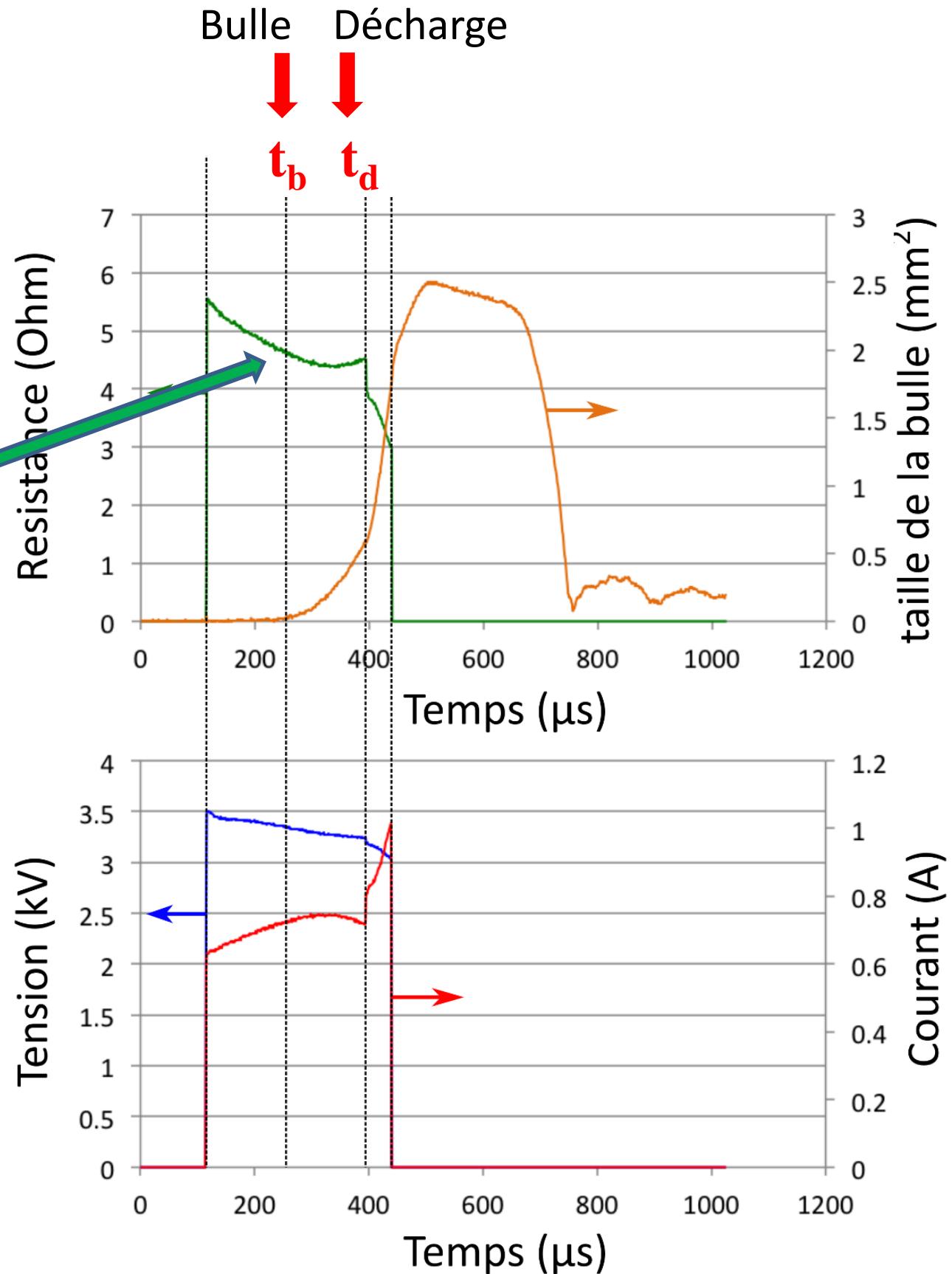
- Etapes
- Chauffage + mouvement EHD (8 m/s \rightarrow $\Delta P \approx 0,3$ bar)
 - Génération bulle vapeur
 - Ionisation bulle (décharge)
 - Croissance « explosive »
 - Implosion & rebonds

IV – Génération des décharges dans l'eau



Chute de résistance
« macroscopique » visible:

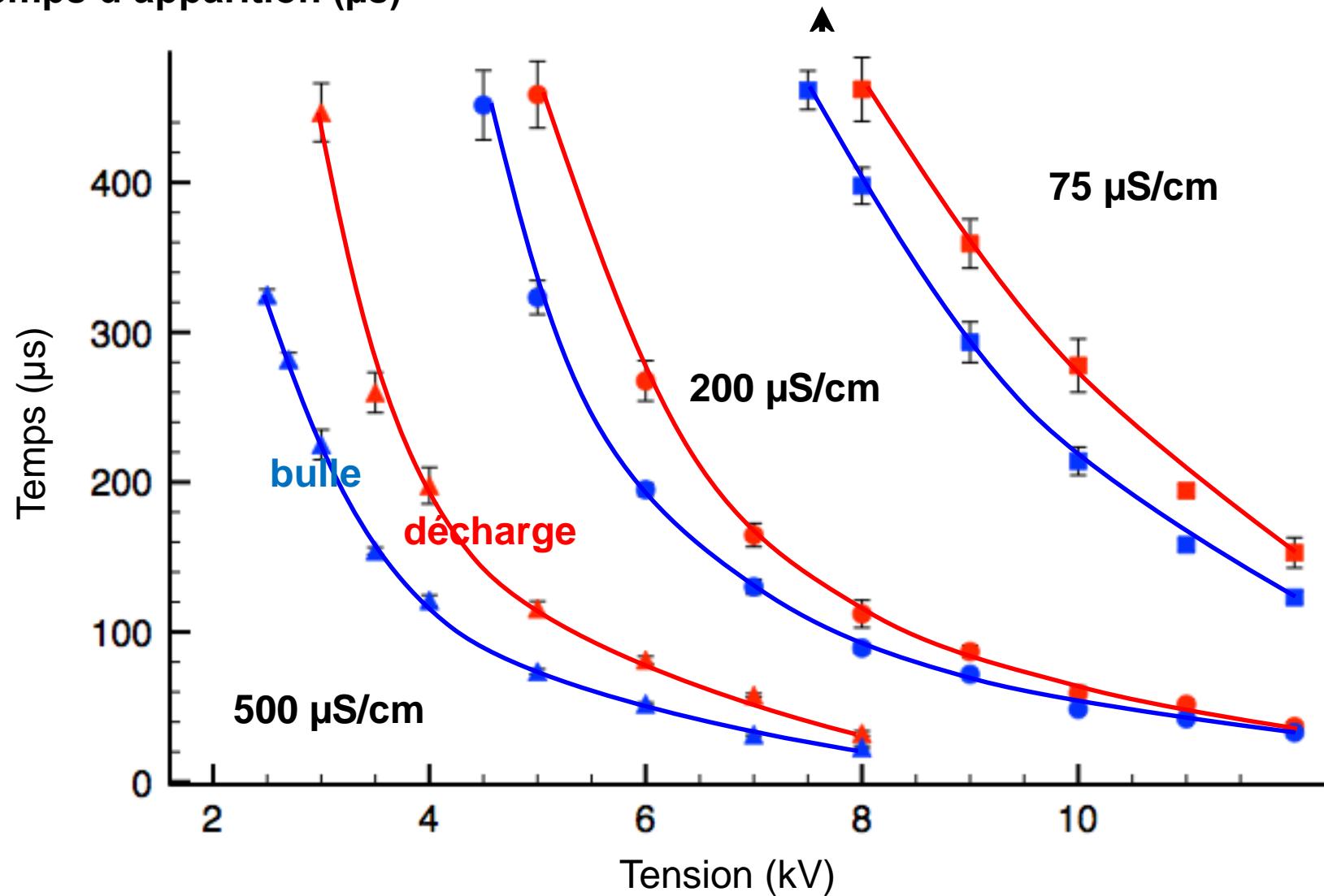
$R \downarrow$ quand $T \uparrow$



IV – Génération des décharges dans l'eau

Exemple 2: Electrode sphère 1,2mm, $E \approx 20$ à 200 kV/cm

Temps d'apparition (μ s)

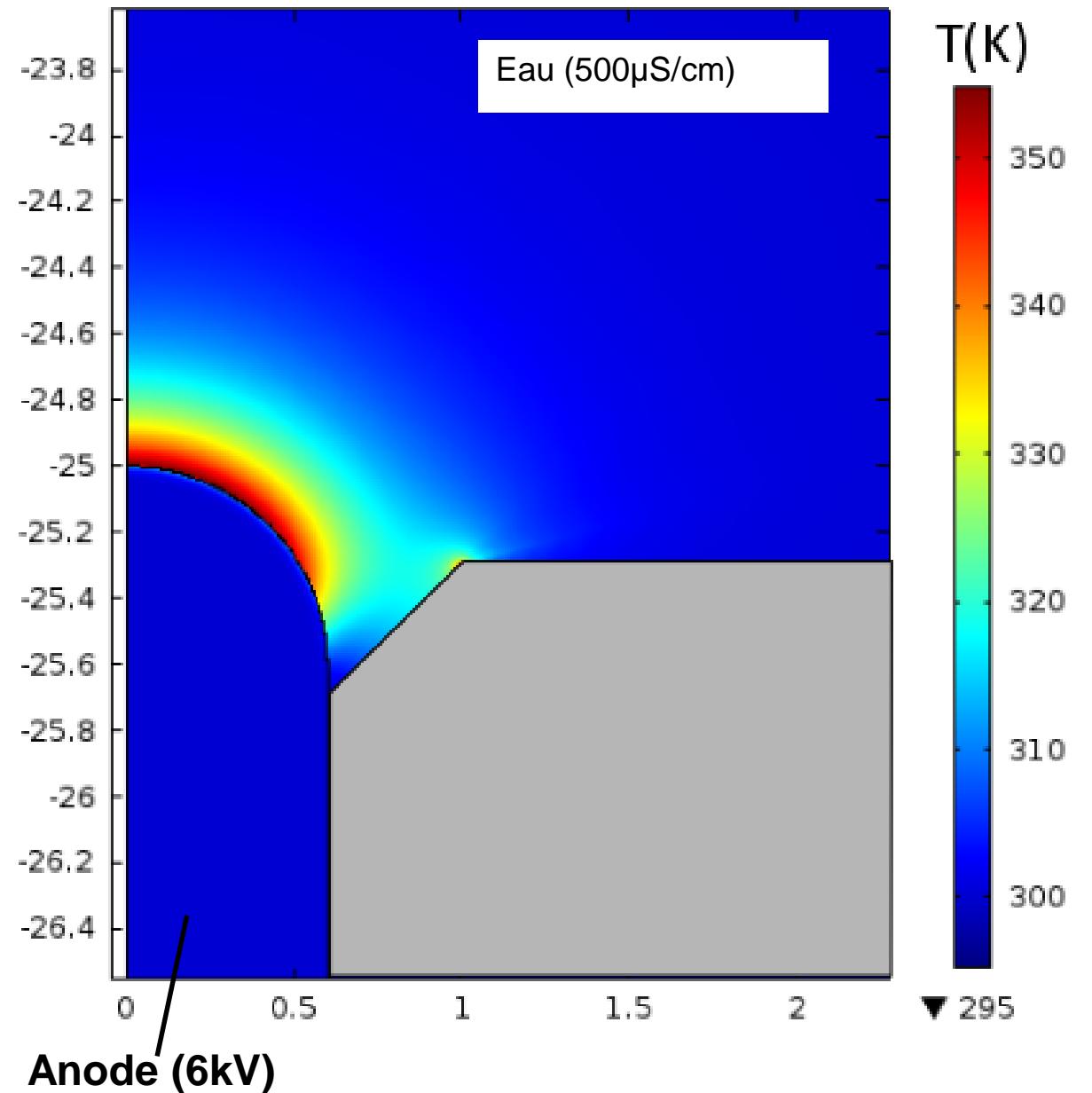


IV – Génération des décharges dans l'eau

Exemple 2: Electrode sphère 1,2mm, $E \approx 20$ à 200 kV/cm

Modélisation couplée thermique / électrique:

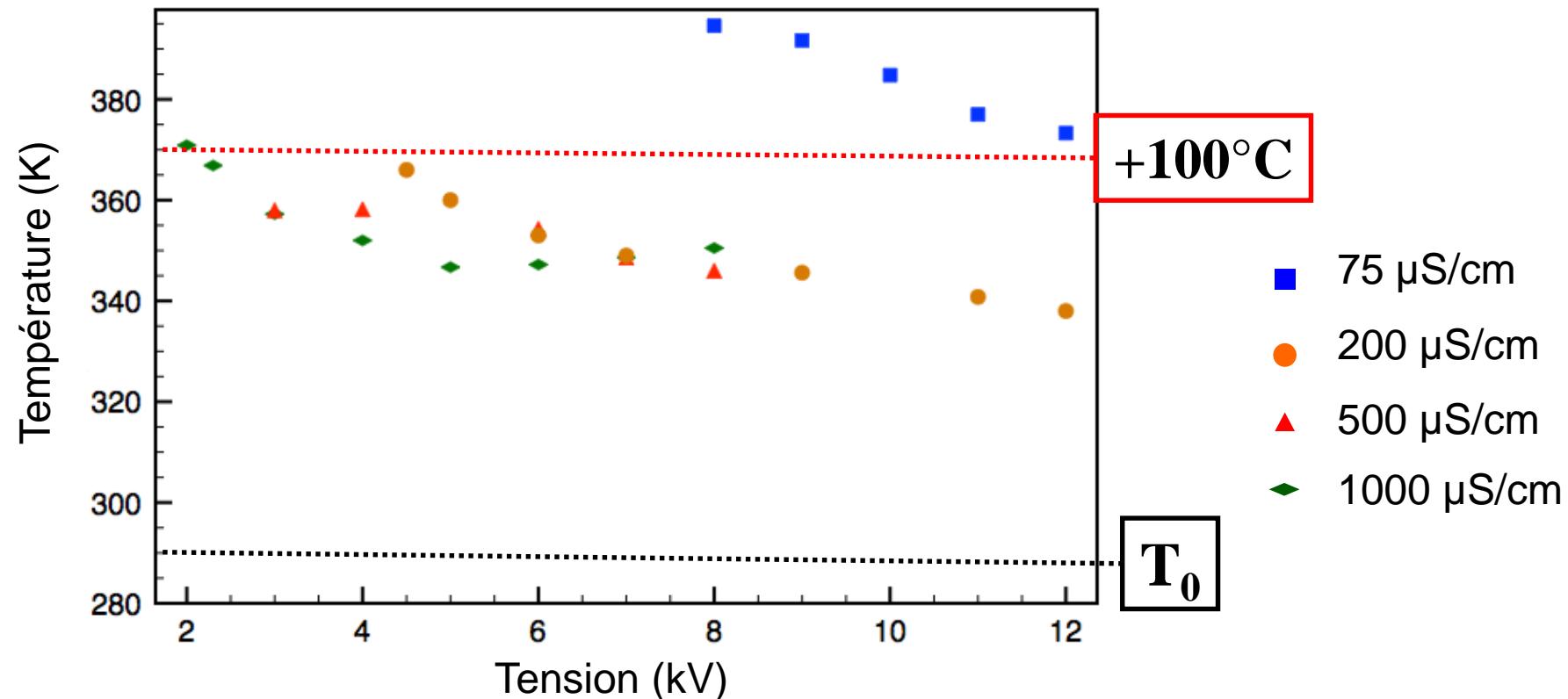
- Conductivité $\sigma_{loc} = f(T_{loc})$
- Augmentation de la température par effet Joule
(puissance = $\sigma_{loc} E^2_{loc}$)
- Echanges thermiques: conduction uniquement



IV – Génération des décharges dans l'eau

Exemple 2: Electrode sphère 1,2mm, $E \approx 20$ à 200 kV/cm

Température maximale simulée au moment t_b d'apparition de la bulle



Limites du calcul:

- Pas de prise compte EHD (convection) $\rightarrow \Delta P \approx 0,3$ bar
- Effets locaux importants (défauts de surface)

IV – Génération des décharges dans l'eau

Exemple 2: Electrode sphère 1,2mm, $E \approx 20$ à 200 kV/cm



6 kV, $100 \mu\text{S/cm}$

Strioscopie (temps exposition: $1 \mu\text{s}$)

→ effets locaux importants

Conclusions ...

✓ mécanismes de décharge dans les liquides

- large variété de phénomènes
- changement de phase = étape indispensable
- difficulté: conditions extremes (P, T, E), physique ?
- pas de modèles

✓ applications (G2E lab)

- isolation électrique
- depollution
- Traitement de matières végétales

Remerciements ...

- ✓ collègues G2E lab (R. Tobazéon, A. Denat, N. Bonifaci...)
- ✓ partenaires (EDF, Schneider Electric, Alstom, AREVA, IREQ, ...)
- ✓ étudiants (P. Gournay, G. Massala, T.V. Top, P.E. Frayssines, T.D. Chau....)