

05 - 08 juillet 2021
Nancy



Les plasmas froids pour le traitement des eaux : application aux résidus médicamenteux

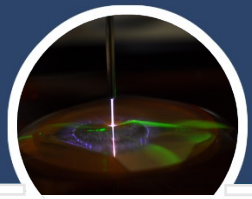
Olivier Aubry

GREMI, UMR7344 CNRS Université d'Orléans



*Groupe de Recherches sur l'Energétique des Milieux Ionisés
14 rue d'Issoudun 45067 Orléans Cedex 2 France*





Plan de la présentation

Introduction : les polluants dans l'eau (nature des polluants, sources d'émissions, les traitements)

Les Procédés d'Oxydation Avancés (POA)

Les procédés Plasmas Non Thermiques dans et au contact avec l'eau

Quelques exemples de traitement et de conditions opératoires : applications aux molécules pharmaceutiques

Conclusion : que retenir au final ?



Pollution des milieux aquatiques naturels



Il y a la **pollution visible** et l'**invisible** pour laquelle on ne voit que les effets (environnement dégradé...)



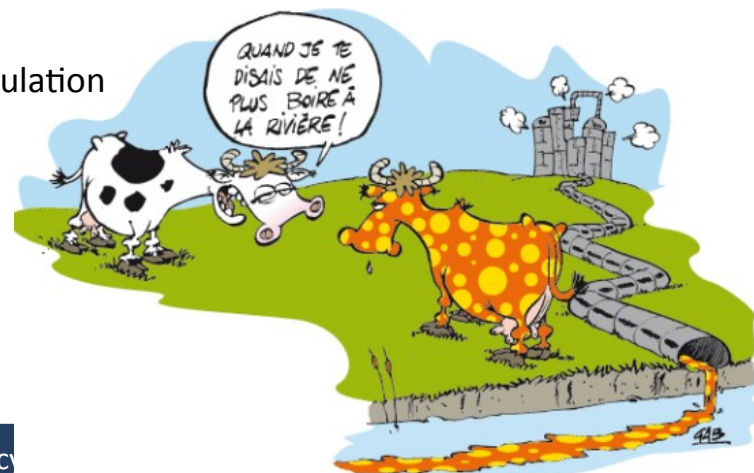
polluants, de nombreuses sources d'émission

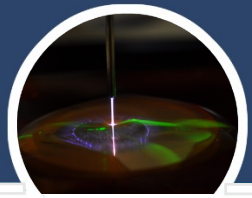
Stations d'épuration conventionnelles pas ou peu efficaces pour de nombreux polluants

Présence de micropolluants : HAP, halogénés, hormones... dans les milieux aquatiques naturels et eaux potables

- Augmentation de leurs concentrations dans la nature par bio-accumulation
- Effets de ces polluants sur l'environnement et la santé

**Pas de normes actuellement sur de nombreuses substances mais
Directive Cadre Européenne en évolution**



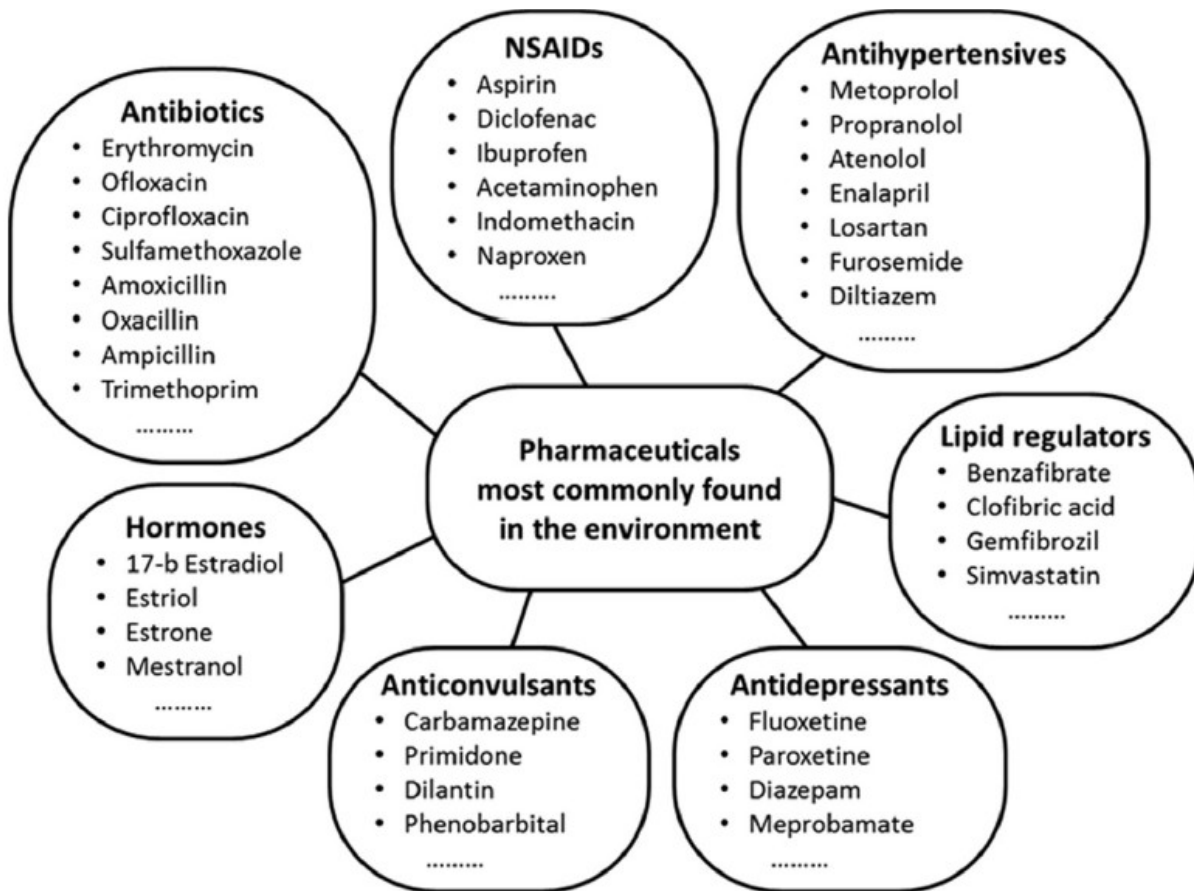


Pourquoi les médicaments ?



Un exemple de polluants : les médicaments

De nombreuses molécules...

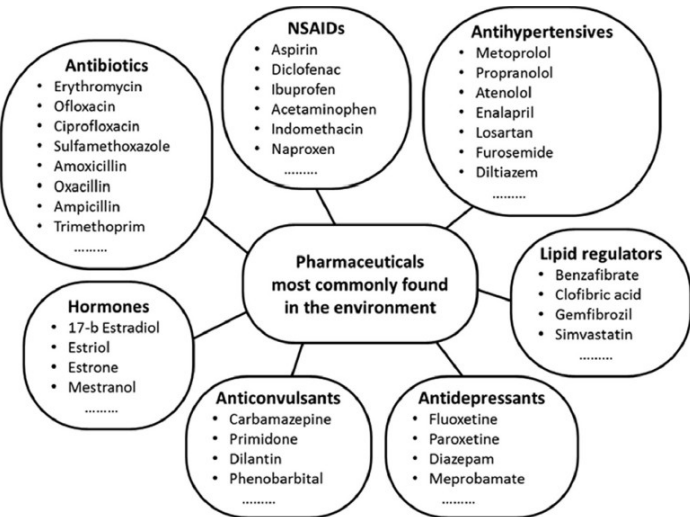


Magureau *et al.* Water Res. 45 (2011) 3407



Un exemple de polluants : les médicaments

De nombreuses molécules...

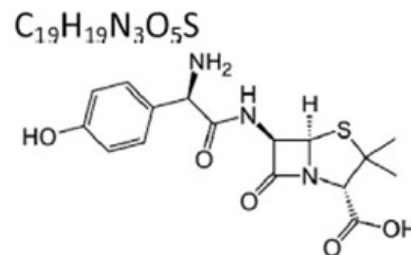


Magureau *et al.* Water Res. 45 (2011) 3407

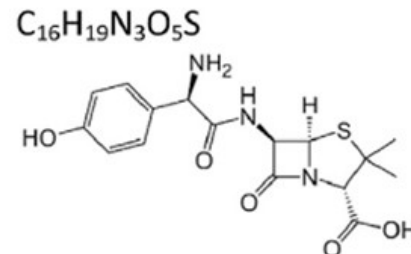
... complexes et aromatiques (C, H, O, N, F, S)...

Sans parler des excipients !

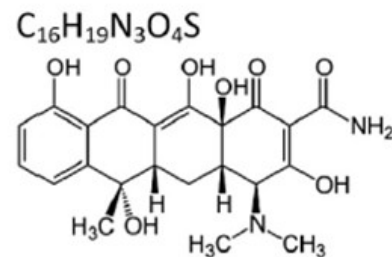
Amoxicillin



Ampicillin



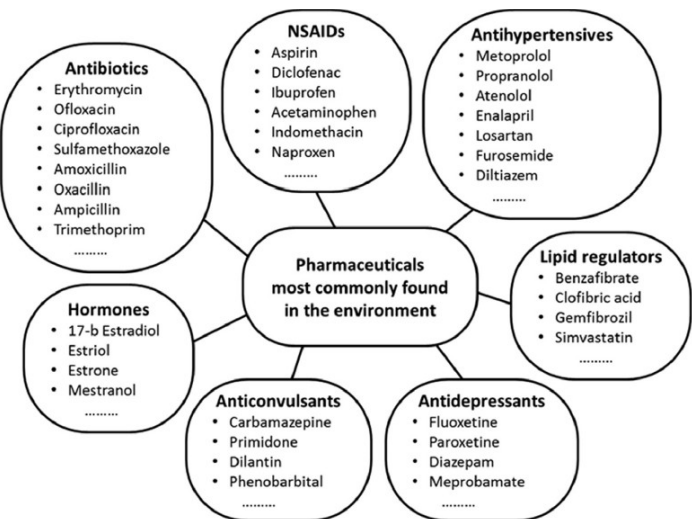
Tetracycline





Un exemple de polluants : les médicaments

De nombreuses molécules...



Magureau *et al.* Water Res. 45 (2011) 3407

De nombreuses sources

Sites industriels pharmaceutiques

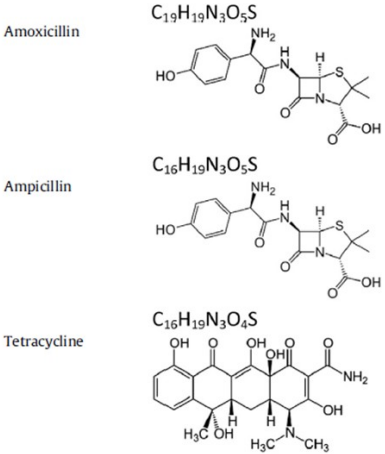
Hôpitaux...



...et les consommateurs de médicaments !



... complexes et aromatiques (C, H, O, N, F, S)...

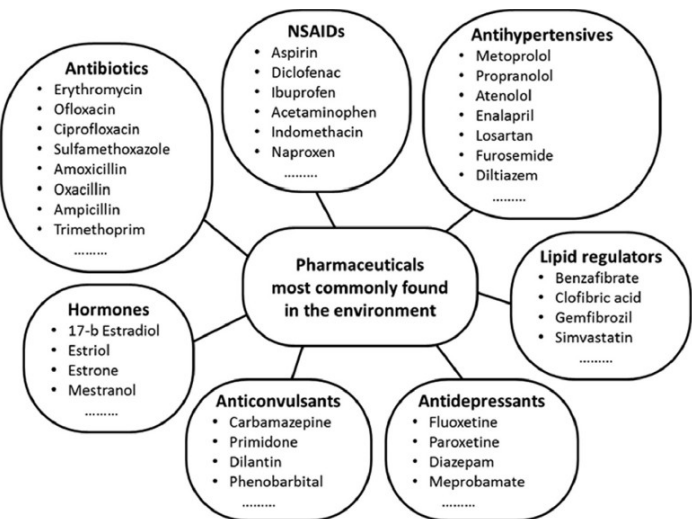


Avec de nombreux effets : Perturbateurs endocriniens, résistance aux antibiotiques... et métabolisables (autres polluants générés)



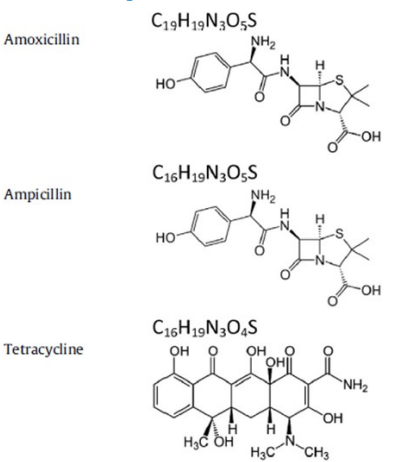
Un exemple de polluants : les médicaments

De nombreuses molécules...



Magureau *et al.* Water Res. 45 (2011) 3407

... complexes et aromatiques (C, H, O, N, F, S)...



Avec de nombreux effets : Perturbateurs endocriniens, résistance aux antibiotiques... et métabolisables (autres polluants générés)

De nombreuses sources

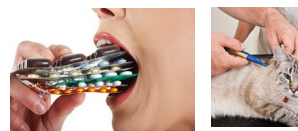
Sites industriels pharmaceutiques



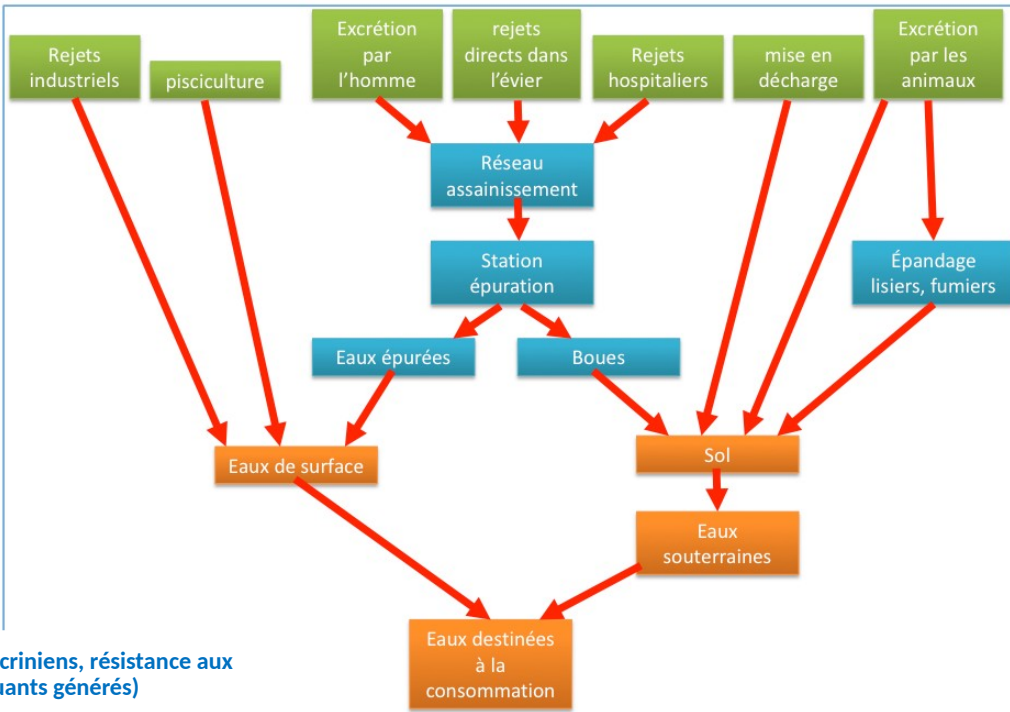
Hôpitaux...



...et les consommateurs de médicaments !



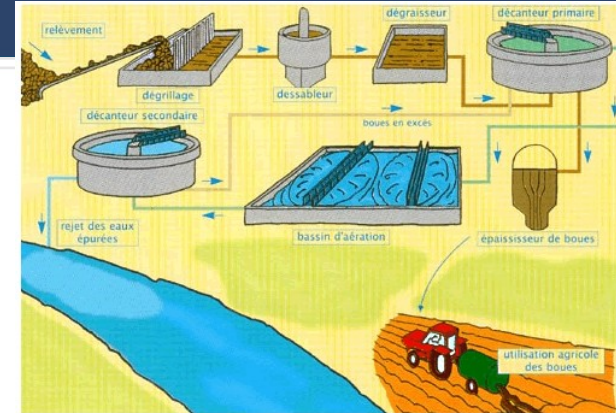
Voies de dispersion dans l'environnement





De nombreux polluants pas toujours bien traités par station d'épuration (STEP)

Famille	Substances
COVs	di-, tri- chlorométhane, tri-, tetra- chloroéthylène
Pesticides	glyphosate, AMPA, diuron, isoproturon, atrazine, simazine
Pesticides	Chlorpyrifos
Chlorophénols	Mono-, di- chlorophénols
Biocide	Triclosan
PBDEs	tri-, tetra-, penta-, hexa-, deca- bromodiphényléther
Phtalates	DEHP
Alkylphénols	4-tert-butylphénol, nonylphénols, octylphénols, NP1EO, NP2EO
Alkylphénols	Alkylphénol carboxylates
Additifs	Bisphenol A
Additifs	C10-13 Chloroalcanes, tributylphosphates, benzothiazoles
Additifs	Trichlorobenzène
HAP "légers"	Naphtalène
HAP "lourds"	Fluoranthène, Benzo(b)fluoranthène, Benzo(k)fluoranthène
Métaux	Li, B, V, Co, As, Rb, Sb
Métaux	Ni, Zn, Se, Cd, Ba, U, Mo
Métaux	Al, Cr, Fe, Cu, Ag, Sn, Hg, Ti, Pb
Analgésiques	diclofenac
Analgésiques	ibuprofène, paracétamol, ketoprofène, naproxène, aspirine
Antibiotiques	sulfaméthoxazole, roxithromicine
Antidépresseurs	carbamazépine, diazepam, nordiazepam, doxepine
Antidépresseurs	Amitriptyline, fluoxétine
Antidépresseurs	imipramine, bromazepam
Hypolipémiants	Gemfibrozil
Bronchodilatateurs	clenbuterol
Bronchodilatateurs	salbutamol, terbutaline
Bétabloquants	oxprenolol, propranolol, sotalol
Bétabloquants	metoprolol, timolol, aténolol
Bétabloquants	nadolol, acébutolol, bisoprolol, betaxolol
Hormones	estrone, estriol, estradiol (Ea2, Eb2)



Traitement des micropolluants par dégradation biologique

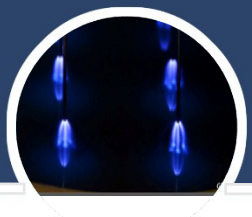
Traitement des micropolluants par adsorption

Oxydation des micropolluants par voie physico-chimique
Procédés d'Oxydation Avancée

Rétention des micropolluants par filtration membranaire

	Rendement élimination > 70%
	Rendement élimination 30% - 70%
	Rendement élimination < 30%

gras : substances prioritaires de la DCE
 italique : substances < 100 ng/l dans les eaux usées
 brutes

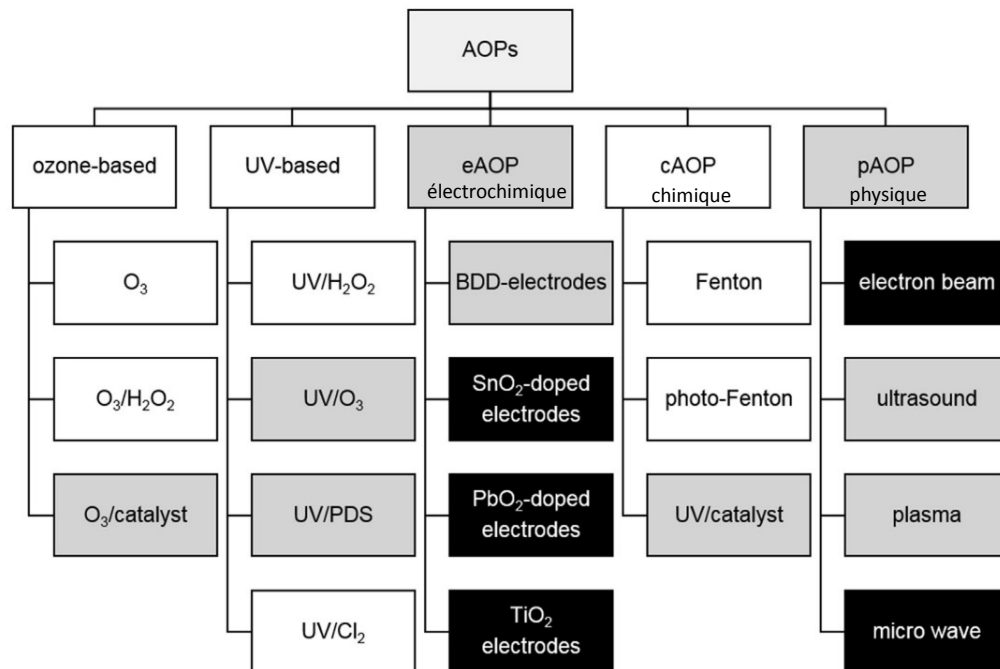


Les Procédés d'Oxydation Avancée (AOPs)

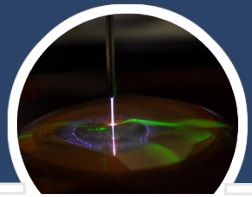
Production d'un oxydant puissant à partir d'un réactif oxydant primaire (O₂, H₂O..)

→ Oxydants générés : •OH, O₃, H₂O₂, ...

Couple redox	Réactions	Potentiel, (V/ENH), 25°C
Cl ₂ /Cl	Cl ₂ (g) + 2e → 2Cl ⁻	1,36
Br ₂ /Br	Br ₂ (l) + 2e → 2Br ⁻	1,06
I ₂ /I	I ₂ + 2e → 2I ⁻	0,53
OH [•] /H ₂ O	OH [•] + H ⁺ + e → H ₂ O	2,81
O ₃ /O ₂	O ₃ + 2H ⁺ + 2e → O ₂ + H ₂ O	2,07
H ₂ O ₂ /H ₂ O	H ₂ O ₂ + 2H ⁺ + 2e → 2H ₂ O	1,77
MnO ₄ ⁻ /Mn ²⁺	MnO ₄ ⁻ + 8H ⁺ + 5e → Mn ²⁺ + 4H ₂ O	1,51
HClO/Cl-	HClO + H ⁺ + 2e → Cl ⁻ + H ₂ O	1,49
ClO ₂ /ClO ₂ ⁻	ClO ₂ + e → ClO ₂ ⁻	0,95
S ₂ O ₈ ²⁻ /SO ₄ ²⁻	S ₂ O ₈ ²⁻ + 2e → 2SO ₄ ²⁻	2,05



Miklos *et al.* Water Research 139 (2018) 118



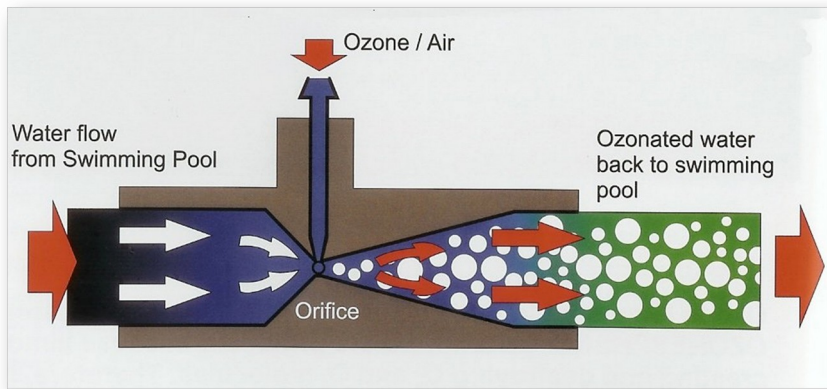
Les POA et les plasmas froids

Plasmas froids efficaces pour produire les espèces oxydantes (dans O₂, air...)

Deux types de procédés plasmas

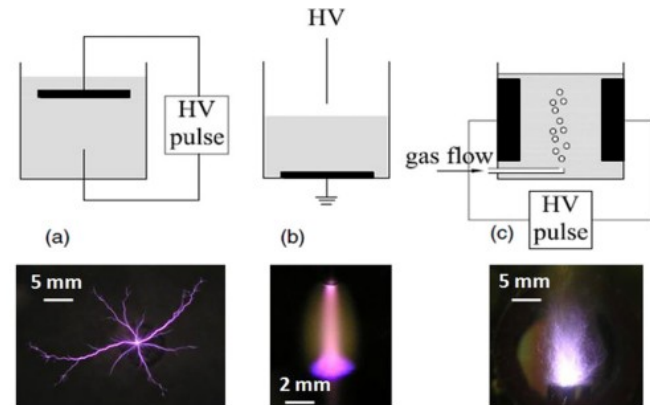
« remote » ou post-décharge

OZONATION

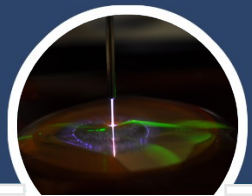


Hors-sujet aujourd'hui !

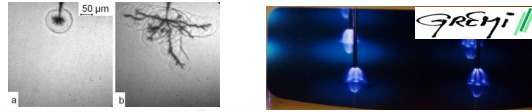
décharges *in-situ*
(au contact ou dans les liquides)




Bruggeman and Leys., J. Phys. D: Appl. Phys.42 (2009) 053001



Caractéristiques des décharges



	 Direct liquid discharge [17, 21]	Filamentary DBD (single filament) [62]
--	--	--

Medium/gas	Water	Air
Plasma generation time	1–10 s μ s	1–10 ns
Electron density (m^{-3})	10^{24} – 10^{26}	10^{19} – 10^{21}
Pressure (bar)	10^4 (peak)	1
Gas temperature (K)	1000–7000	300–400
Ionization degree	1– 10^{-3}	10^{-5} – 10^{-6}
Energy/power	1 J per pulse	<10 μ J per pulse
Power density	$\leq 10^{15}$ W m^{-3}	< 10^{12} W m^{-3}
Current	~1 A	<100 mA
Electron temperature (eV)	1 (close to LTE)	2–3
Electric field (kV cm^{-1})	~ 10^3	10–100
Ion density at interface (m^{-3})	10^{24}	10^{20} – 10^{21}
UV ($m^{-2}s^{-1}$)	Broadband UV emission	5×10^{23}
Radical density (e.g. *OH and O*) m^{-3} s	~ 10^{24}	10^{20} – 10^{21}
Reactive species flux ($m^{-2} s^{-1}$)	Extremely large gradients	5×10^{22} – 5×10^{23}
Flow effects	Shockwaves	Convective

Propriétés des PNT au contact des liquides

Gaz à température ambiante : pas de pertes énergétiques pour le chauffage du gaz **Température des électrons élevées** : **Réactivité par impact électronique** sur les espèces neutres → génération de radicaux réactifs

Décharges électriques à pression atmosphérique

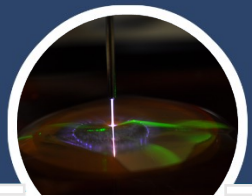
→ « facilité » mise en œuvre

Bruggeman *et al.*, Plasma Source Sci. Technol. 25 (2016) 053002

Quelques avantages/inconvénients de quelques POA



procédés	avantages	inconvénients
Photocatalyse	<ul style="list-style-type: none"> • Simplicité de fonctionnement • Peut fonctionner à la lumière du visible • Active sur un large spectre de molécules 	<ul style="list-style-type: none"> • Turbidité de la solution limite l'efficacité • Dépendance du pH • Dissolution du catalyseur (pH acide) • Type de molécule (ionique) • Meilleure efficacité si concentrations élevées
Fenton utilisation ions Fe ²⁺	<ul style="list-style-type: none"> • Larges volumes • Simplicité d'utilisation • Catalyse en phase homogène ou hétérogène 	<ul style="list-style-type: none"> • Dépendance du pH (entre 3 et 5), limitations pour composés basiques • Ajout de Fer et H₂O₂ nécessaire • Inhibition si trop Fe²⁺ et H₂O₂ • Étape de récupération du Fer nécessaire
Ozonation Oxydation par O ₃	<ul style="list-style-type: none"> • Procédé bien connu (appliqué depuis 1897 !) 	<ul style="list-style-type: none"> • Solubilité de l'ozone (1 g/L) et f(T) • Sensible au pH (>7 décomposition rapide de O₃) • Applicable aux eaux acides
Décharges plasma au contact des liquides	<ul style="list-style-type: none"> • Nombreuses voies de production des radicaux • Formation H₂O₂, O₃, UV, OH, O... • Nombreuses configurations possibles 	<ul style="list-style-type: none"> • Nombreuses configurations possibles • Transfert des espèces de la phase gazeuse à la phase liquide • Efficacité et énergie injectée dépend des paramètres physico-chimiques du liquide (conductivité, pH,...)



Comparaison des POA, traitement de l'ibuprofène

Zeng *et al.*, Chem. Eng. J. 267 (2015) 282

AOPs	Experimental conditions	^a DY ₅₀ (g/kW h)
UV + H ₂ O ₂	SV ^b 350 ml, IC ^c 20 mg/l, IP ^d 200 W, 1 g/l H ₂ O ₂	0.525
UV + Fenton	SV 1000 ml, IC 180 mg/l, IP 1 kW, 0.04 mM H ₂ O ₂ , 1.2 mM Fe(II)	0.27
Photoelectro-Fenton	SV 100 ml, IC 41 mg/l, IP 6 W, 0.5 mM Fe(II)	4
UV + TiO ₂	SV 250 ml, IC 18.5 mg/l, IP 450 W, TiO ₂ 1 g/l	0.03
O ₃ oxidation	SV 1500 ml, IC 200 mg/l, IP 1 kW, TiO ₂ 1 g/l	0.12
Chlorine dioxide oxidation	SV 500 ml, IC 0.5 μM, Ozone dose 2 mg/l	-
Heated persulfate oxidation	SV 500 ml, IC 1 μg/l, ClO ₂ dose 0.95 mg/l	-
Sonochemistry	SV 10 ml, IC 4.2 mg/l, 1 mM sodium persulfate	-
	SV 300 ml, IC 21 mg/l, IP 80 W	0.59
	SV 125 ml, IC 10 μM, IP 50 W	0.103
Non-thermal Plasma	SV 500 ml, IC 20 mg/l, IP 3 W	10

^a DY₅₀ is the degradation yield at the conversion of 50%.

^b SV is solution volume.

^c IC is initial concentration.

^d IP is input power.

$$DY, RE (g_{pollutant}/kWh) = \left(\frac{[pollutant]_0 - [pollutant]_t}{\Delta t \cdot P} \times V \right)$$

Procédé plasma peut être efficace d'un point de vue coût énergétique pour 50% de conversion

mais de nombreux autres paramètres à prendre en compte pour juger de l'efficacité

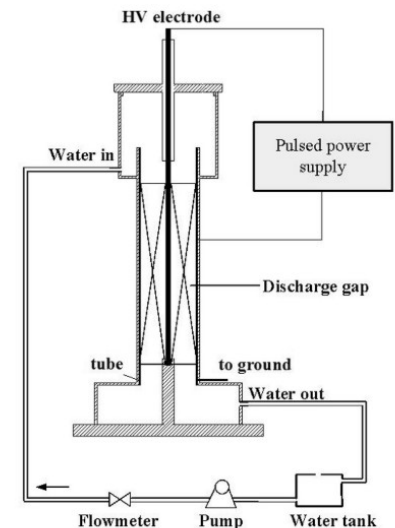
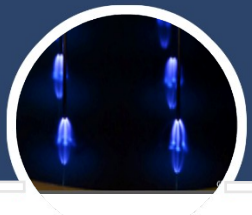


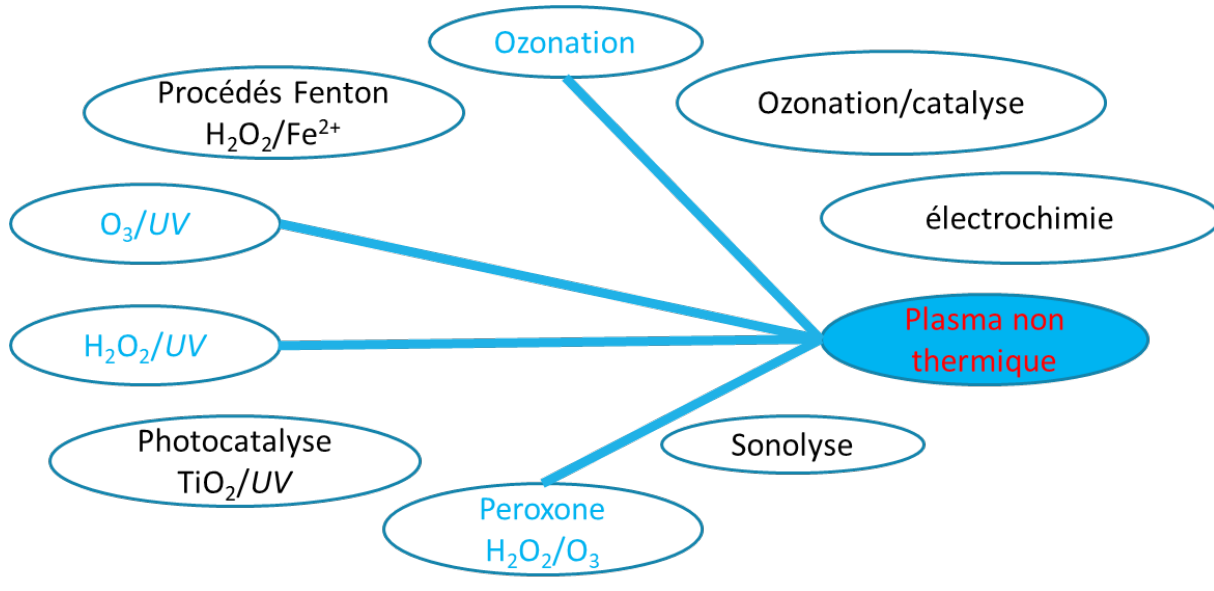
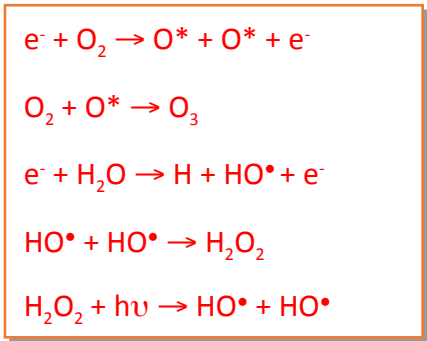
Fig. 1. Experimental set-up.



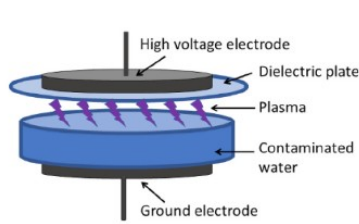
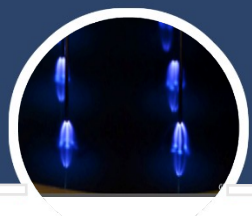
Les plasmas non thermiques comme POA

PNT : regroupe plusieurs POA

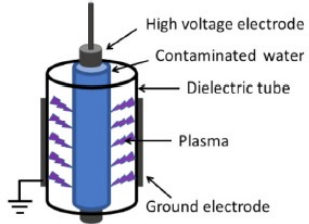
Production d'oxydants à faibles ou longues durée de vie HO^\bullet , O , O_3 , O_2^- , H_2O_2 ...



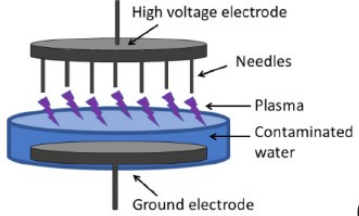
Quelques exemples de réacteurs avec décharges *in-situ*



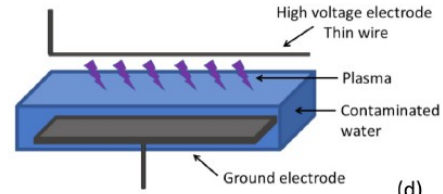
(a)



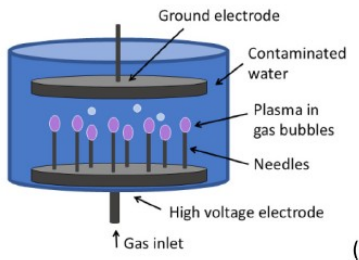
(b)



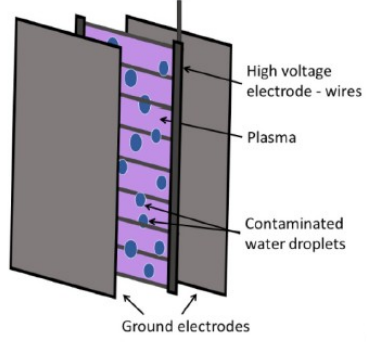
(c)



(d)

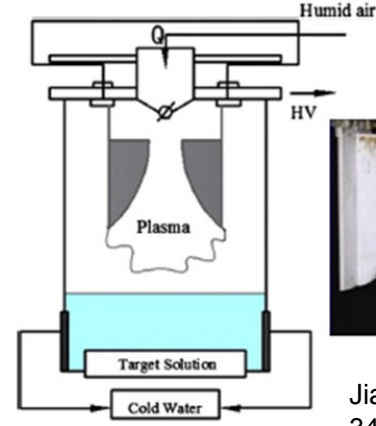


(e)

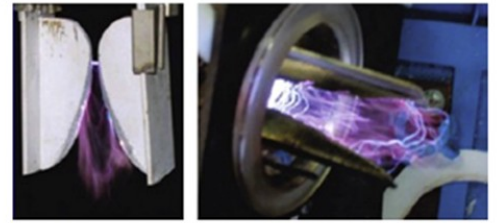


(f)

Magureau *et al.*, J. Hazard Mat. 417 (2021) 125401



GLIDARC

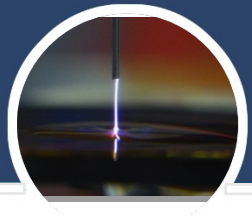


Jiang *et al.*, Chem. Eng. J. 236 (2014) 348

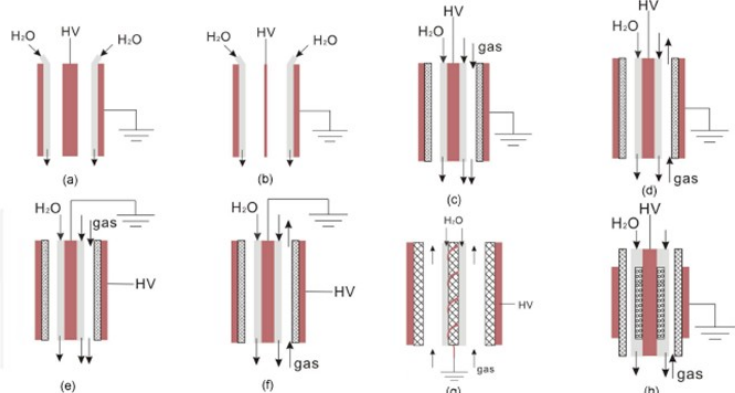
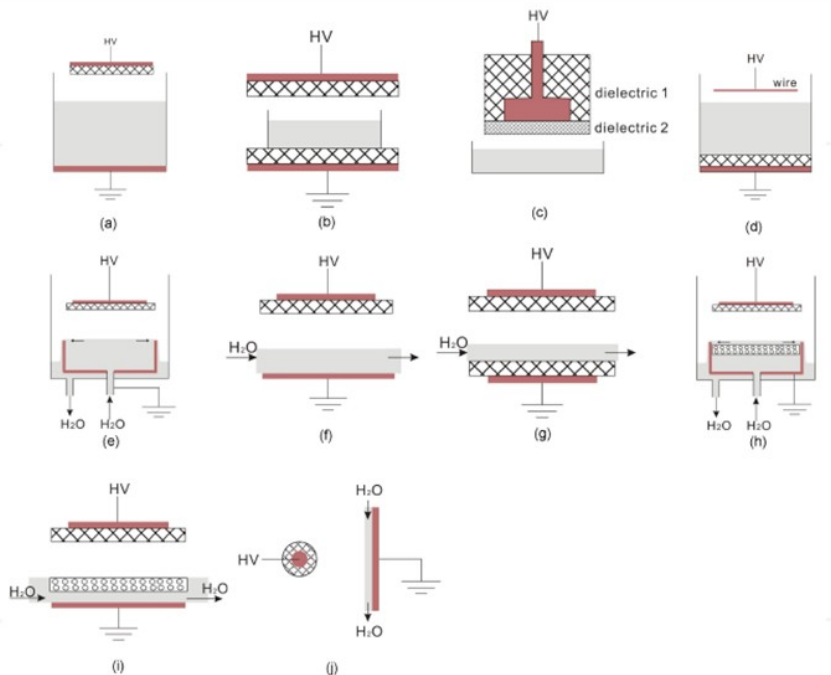
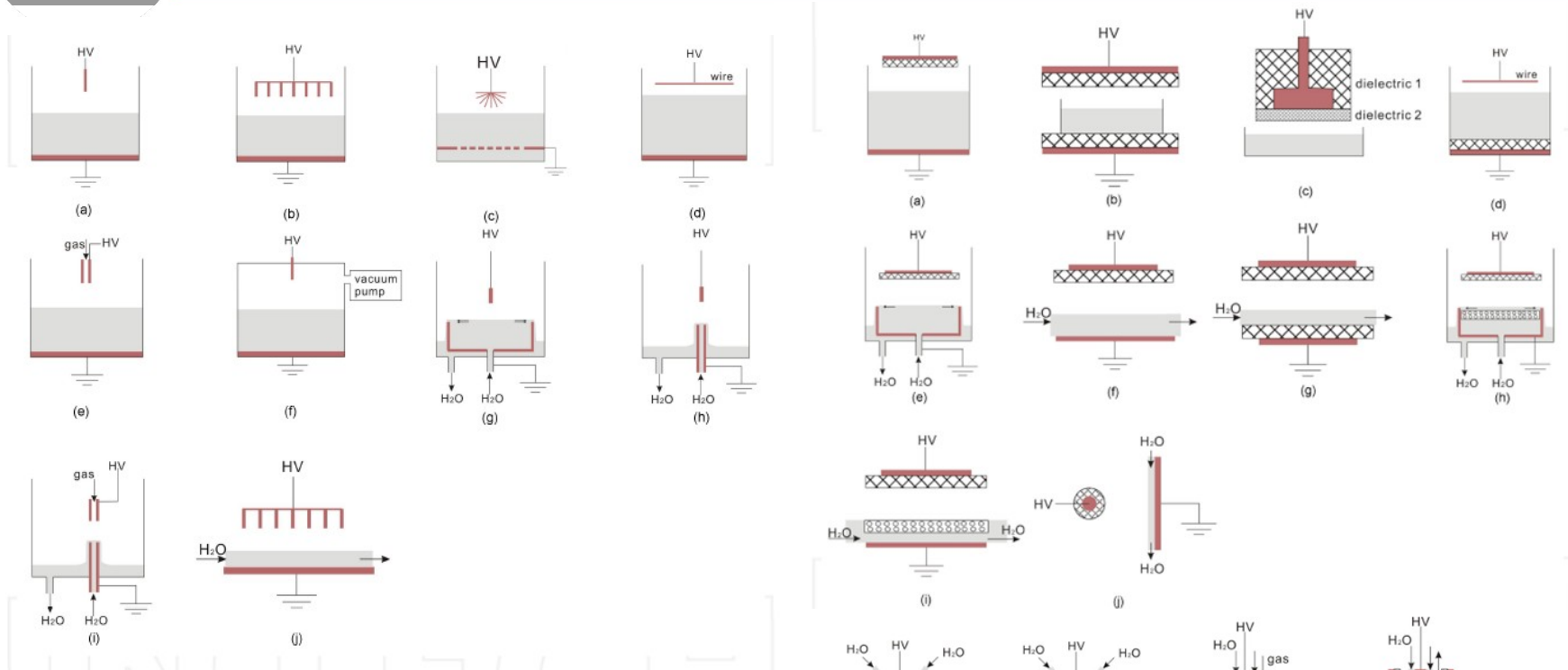
Traitements en statique, en écoulement, sprays, ...
DBD, coronas, glidarc

Configuration du réacteur

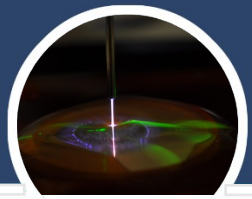
- puissance consommée
- espèces oxydantes produites
- diffusion des espèces
- réactions avec les polluants
- efficacité
- ...



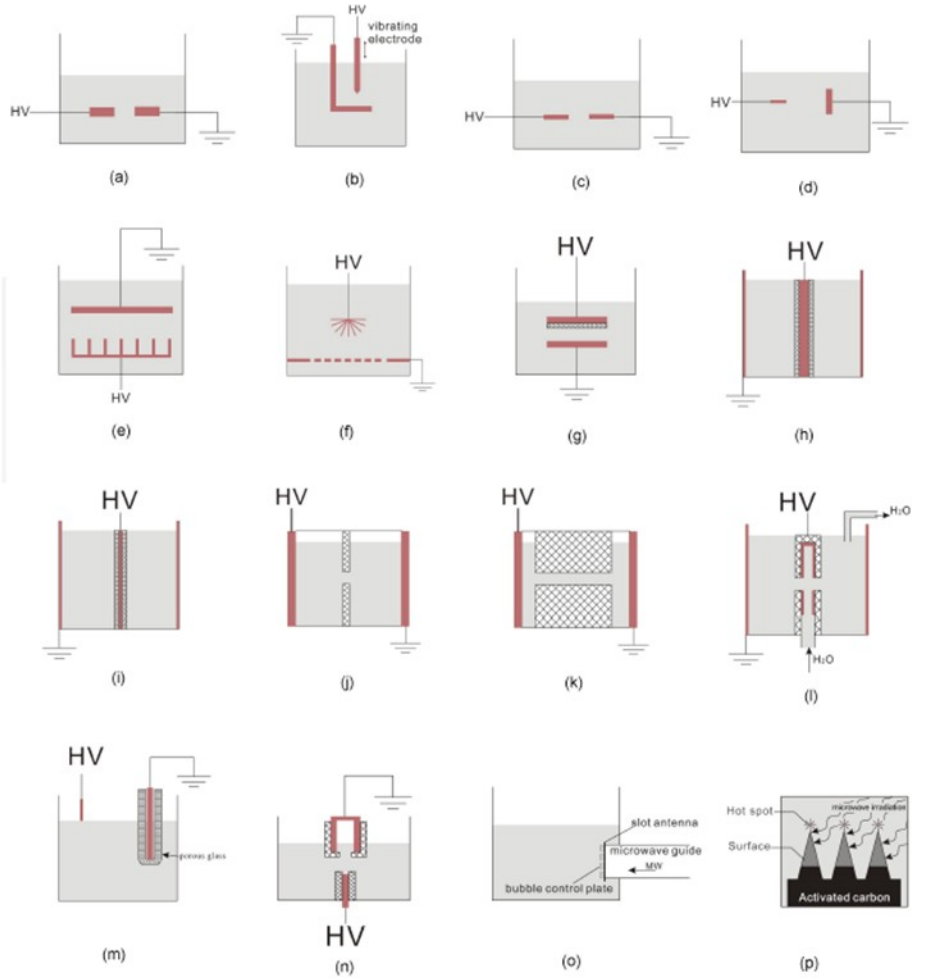
Décharges dans/contact avec l'eau : une infinité de configurations !!



Vanraes *et al.*, (2016) doi.org/10.5772/61830



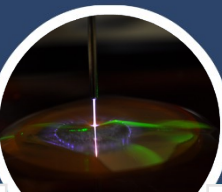
Décharges dans l'eau




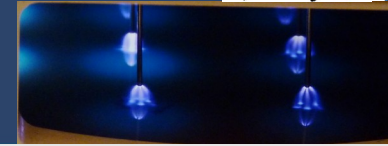
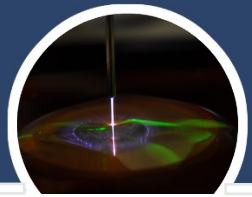
Vanraes *et al.*, (2016) doi.org/10.5772/61830

Comparaison des procédés plasmas **COMPLEXE !**

Puissances électriques consommées (pas toujours fournies) de quelques mW (DBD type GREMI) à centaines de W (DBD, glidarc) , type réacteur plasma, molécule à traiter, concentration, volume à traiter, ...



Pollutants	Plasma	Type of gas	Initial concentration	Removal efficiency	Time
Ibuprofen	Wetted-wall corona discharge	-	60 mg/L	91.7 %	80 min
Ampicillin	DBD	Air	6.99 g/L	100 %	3 min
Sulfadiazine	Water falling film DBD	Air	10 mg/L	100 %	30 min
Sulfadiazine	Wetted-wall corona discharge	Air	10 mg/L	100 %	30 min
Paracetamol, β -oestradiol, Salicylic acid, Indomethacin & Ibuprofen	Pulsed corona discharge	Air	100 mg/L 10 mg/L 100 mg/L 100 mg/L 100 mg/L	100 %	
Enalapril	Pulsed dielectric barrier discharge	O ₂	50 mg/L	99.4 %	120 min
Amoxicillin, oxacillin and ampicillin	DBD	O ₂	100 mg/L	100 %	10 min, 30 mi 30 min
Pentoxifylline	DBD	O ₂	100 mg/L	100 %	60 min
Clofibric acid	DBD	Air	1 × 10 ⁻³ M	100 %	30 min
ICM-iopromide	DBD	Air	17 mg/L	99 %	10 min
Carbamazepine	DBD	Air	20 mg/L	90.7 %	60 min
Sulfamethazine, sulfathiazole, and sulfamethoxazole	Aeration assisted NTP	Ambient air	9 mg/L	-	-
Carbamazepine, clofibric acid and iopromide	DBD-rotating drum reactor	Air	0.1 Mm	94 % 100 % 98 %	60 min 30 min 60 min
Carbamazepine, clofibric acid and iopromide	Corona discharge	Air	0.1 mM	98 % 100 % 99 %	30 min
Diclofenac and ibuprofen	DBD	Air	50 mg/L	100 % 100 %	30 min 20 min
Methylparaben	Pulsed corona discharge	O ₂	50 mg/L	100 %	10 – 15 min
Diclofenac	Pulsed corona discharge	O ₂	5 mg/L	100 %	15 min
Aconitum alkaloid	DBD	Air	COD : 3920 mg/L	87.77 %	60 min
Paracetamol 	DBD	Air + Ar	25 mg/L	> 99 %	60 min
Paracetamol	DBD	O ₂ + Ar	20 mg/L	> 99 %	60 min



Paramètres ?

Régime de la décharge (coronas, streamers), **géométrie du réacteur**, puissance électrique consommée, énergie consommée–densité d'énergie (J/L), **signal électrique** (AC, DC, pulsé), **nature et concentration du polluant**, **écoulement du liquide ou non, sprays ...**

Quels indicateurs pour juger de l'efficacité du procédé (pas toujours tous indiqués) ?

- % conversion

$$\text{conversion (\%)} = \left(1 - \frac{[\text{polluant}]_t}{[\text{polluant}]_0} \right) \times 100$$

- Rendement énergétique ($\text{g}_{\text{polluant traité}}/\text{kWh}$)

- % Minéralisation (carbone organique (COT) présent avant/après traitement)

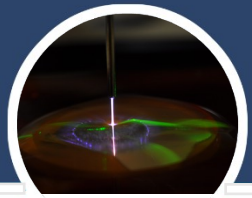
$$DY, RE (\text{g}_{\text{polluant}}/\text{kWh}) = \left(\frac{[\text{polluant}]_0 - [\text{polluant}]_t}{\Delta t \cdot P} \times V \right)$$

- Produits générés (nature et concentration)

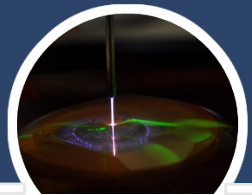
- (eco)toxicité des eaux traitées (comparaison avant/après traitement)

$$\text{Min é ralisation (\%)} = \left(1 - \frac{[\text{cot}]_t}{[\text{cot}]_0} \right) \times 100$$

- ...



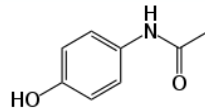
Effets de quelques conditions opératoires



Effet du gaz injecté

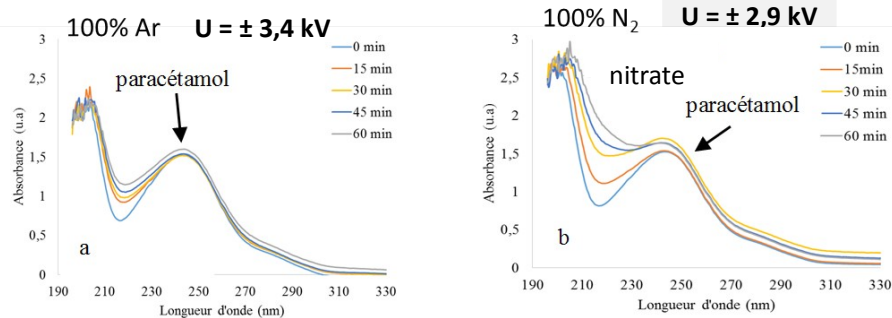


paracétamol

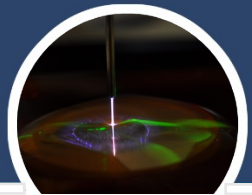


Baloul et al. (2017) Eur. Phys. J. Appl. Phys. 79: 30802

Dans une atmosphère sans oxygène, pas de dégradation



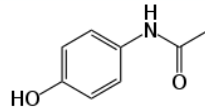
Régime streamer, Uappliquée dépend du gaz injecté



Effet du gaz injecté

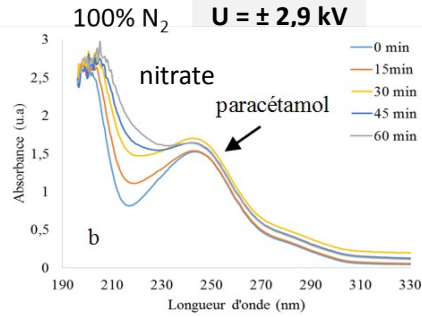
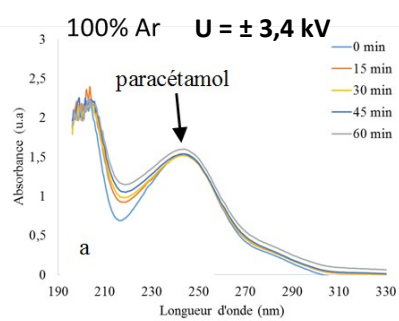


paracétamol



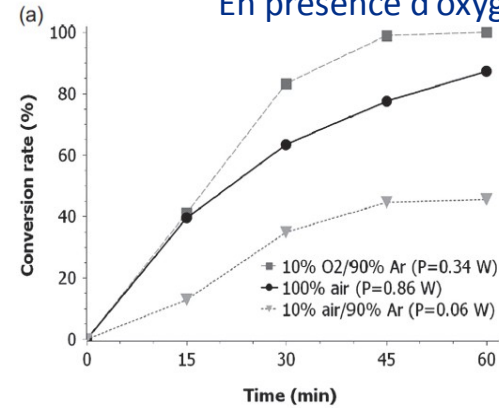
Baloul et al. (2017) Eur. Phys. J. Appl. Phys. 79: 30802

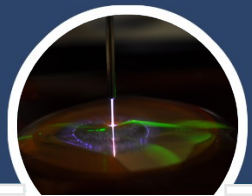
Dans une atmosphère sans oxygène, pas de dégradation



Régime streamer, U appliquée dépend du gaz injecté

En présence d'oxygène

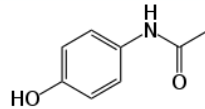




Effet du gaz injecté

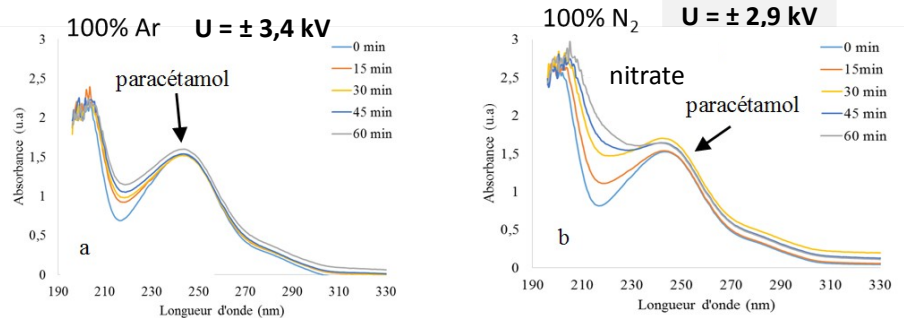


paracétamol



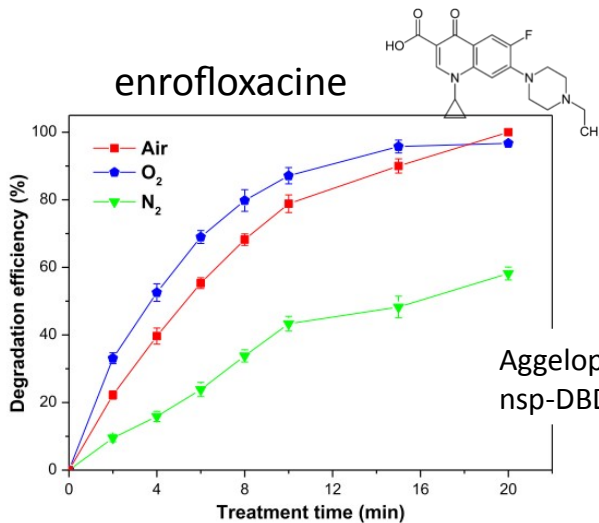
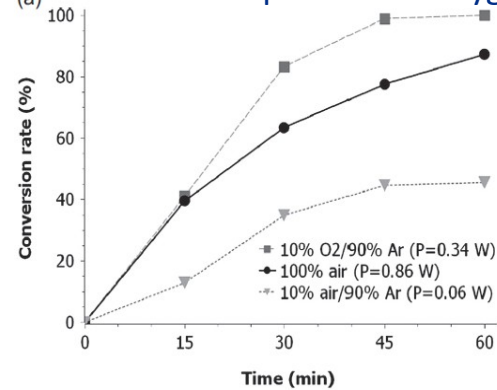
Baloul et al. (2017) Eur. Phys. J. Appl. Phys. 79: 30802

Dans une atmosphère sans oxygène, pas de dégradation

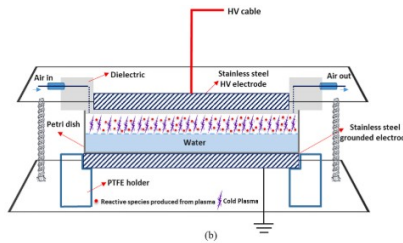


Régime streamer, U appliquée dépend du gaz injecté

En présence d'oxygène



Aggelopoulos *et al.* Chem Eng J 398 (2020) 125622
nsp-DBD



Nature du gaz plasmagène
 → Rôle sur la production des espèces actives oxydantes (ROS) et sur la vitesse de dégradation du polluant

Concentration initiale en polluant

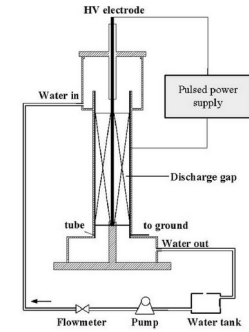
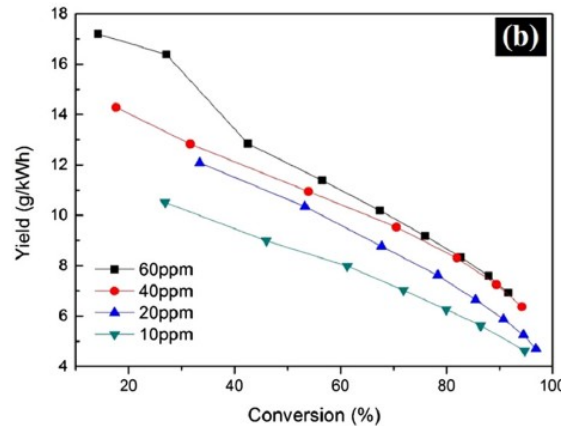
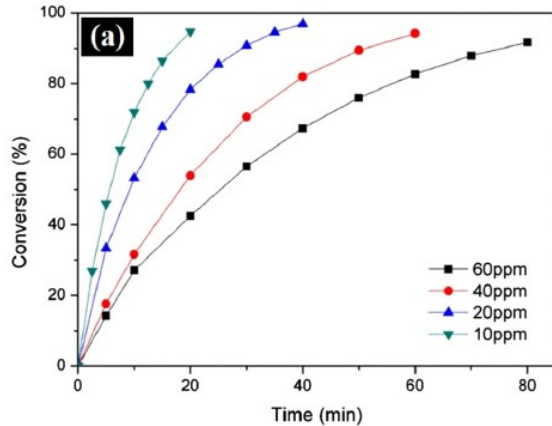
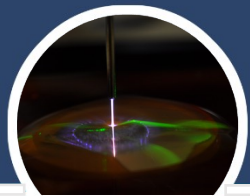


Fig. 1. Experimental set-up.

Zeng *et al.*, Chem. Eng. J. 267 (2015) 282

Fig. 3. (a) Ibuprofen conversion as a function of treatment time; (b) ibuprofen degradation yield as a function of conversion for initial concentrations of 10, 20, 40 and 60 mg/l. ($T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$, $Q = 64\text{ L/h}$, $V_p = 32\text{ kV}$, $f = 100\text{ Hz}$).

Dégradation du polluant → produits

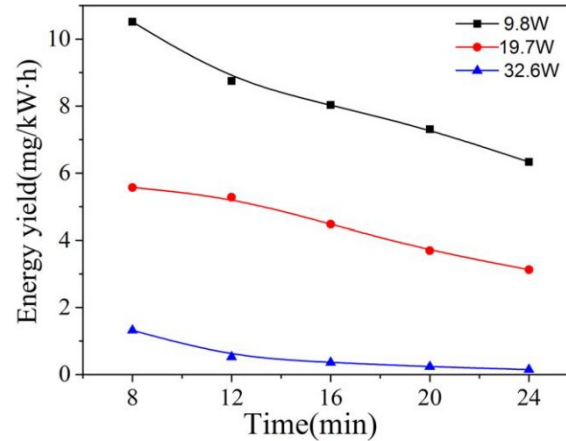
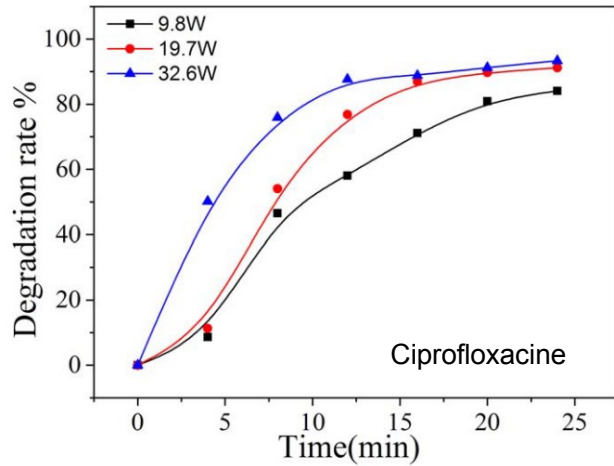
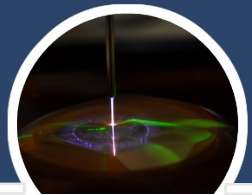
Augmentation [polluant] → [produits] augmentent

Réactions de compétition entre espèces réactives et produits augmentent

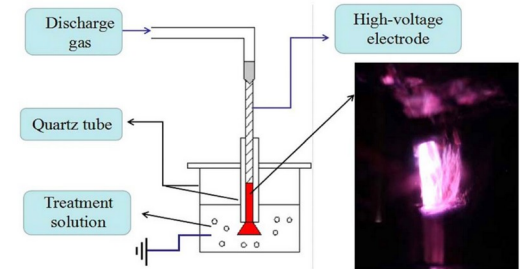
→ dégradation plus lente

→ Solution : augmenter la concentration ROS pour maintenir l'efficacité de la dégradation

Effet de la concentration sur le rendement énergétique → compromis % conversion et RE



Hu et al. Plasm Sci. Technol. 21 (2019) 015501

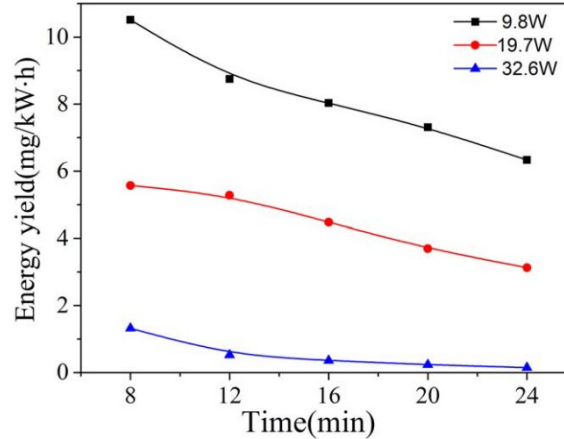
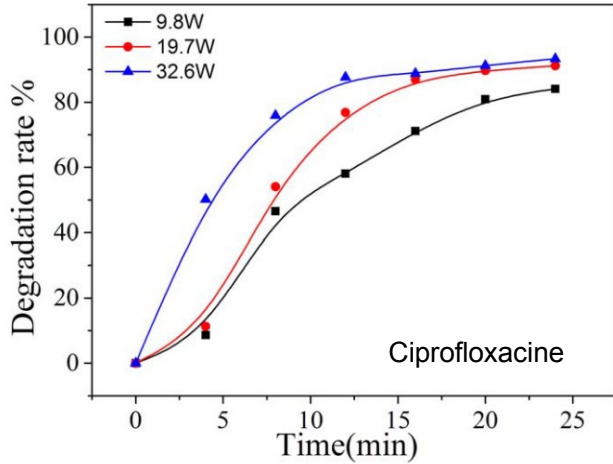
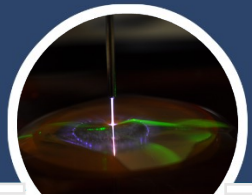


Effet de la puissance injectée sur la production des ROS et sur la dégradation du polluant (fréquence, Tension...).

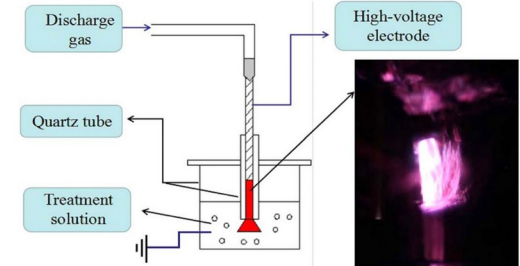
Augmentation puissance peut aussi limiter la dégradation : suivant gaz plasmagène (formation NOx par exemple)

Conversion vs. rendement énergétique

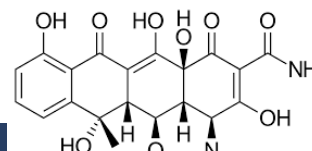
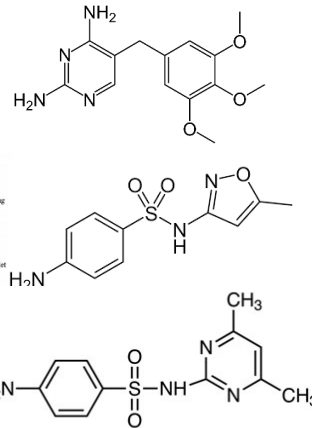
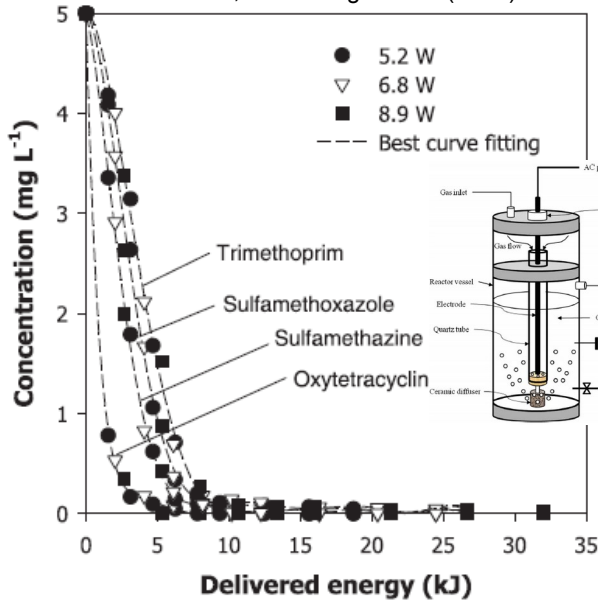
Efficacité dépend également de la molécule à traiter



Hu et al. Plasm Sci. Technol. 21 (2019) 015501



Kim et al., Chem. Eng. J. 219 (2013) 19

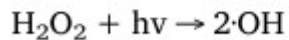
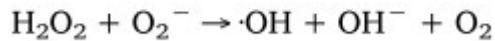
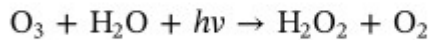
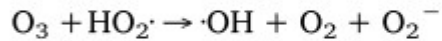
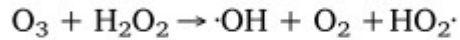
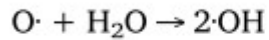
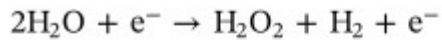
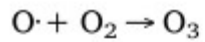
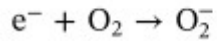
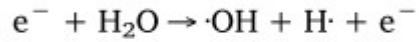
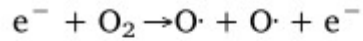
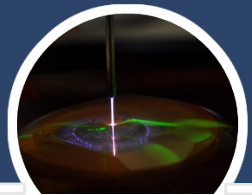


Effet de la puissance injectée sur la production des ROS et sur la dégradation du polluant (fréquence, Tension...).

Augmentation puissance peut aussi limiter la dégradation : suivant gaz plasmagène (formation NOx par exemple)

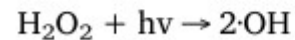
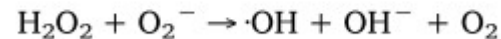
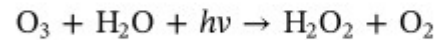
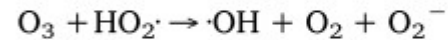
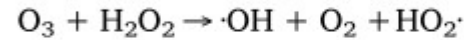
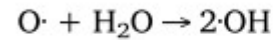
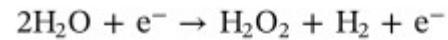
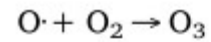
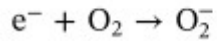
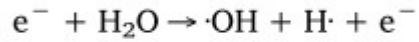
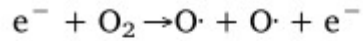
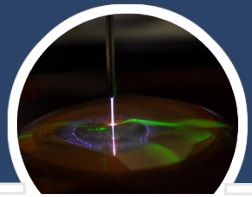
Conversion vs. rendement énergétique

Efficacité dépend également de la molécule à traiter



Production d'espèces réactives à longues et courtes durées de vie → effets différents sur la dégradation

Identification du rôle des ROS



Production d'espèces réactives à longues et courtes durées de vie → effets différents sur la dégradation

Identification du rôle des ROS

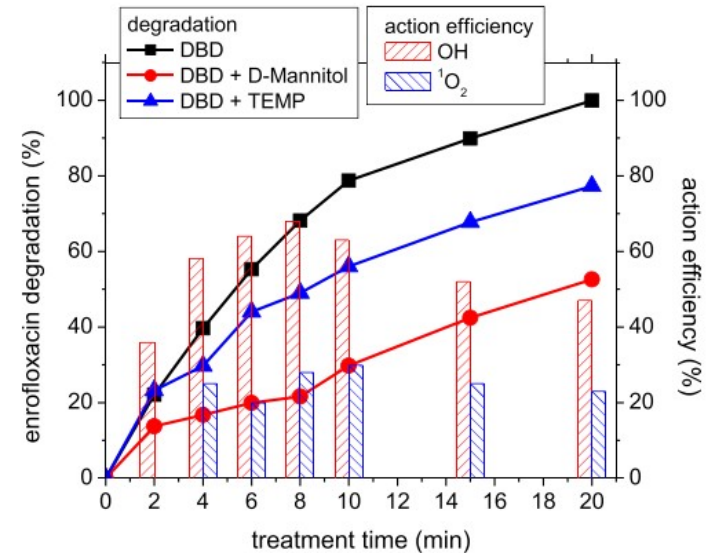
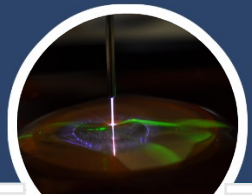
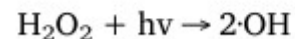
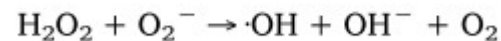
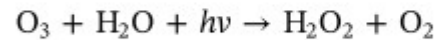
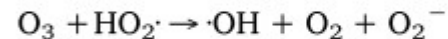
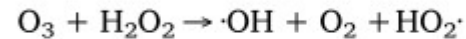
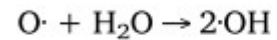
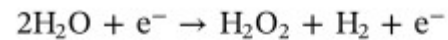
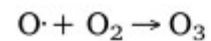
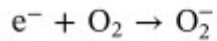
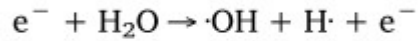
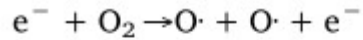


Fig. 3. Enrofloxacin degradation as a function of treatment time in the absence and in the presence of D-mannitol ($\cdot OH$ scavenger) and of 2,2,6,6-tetramethylpiperidine (1O_2 scavenger) and the corresponding action efficiencies Adapted from (Aggelopoulos et al., 2020).

•OH rôle important dans les procédés
Confirmé par d'autres études



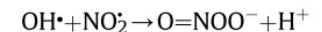
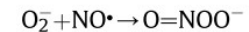
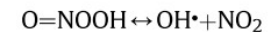
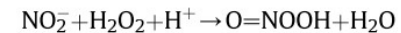
Production d'espèces réactives à longues et courtes durées de vie → effets différents sur la dégradation



Rôle H₂O₂

Dans plasma N₂, amélioration dégradation avec ajout de H₂O₂.

Réactions de H₂O₂ avec des espèces azotées peuvent conduire à la formation de ·OH ou oxyder directement le polluant.



Concentration optimale H₂O₂.

H₂O₂ précurseur et *scavenger* de ·OH avec : ·OH + H₂O₂ → H₂O + HO₂·

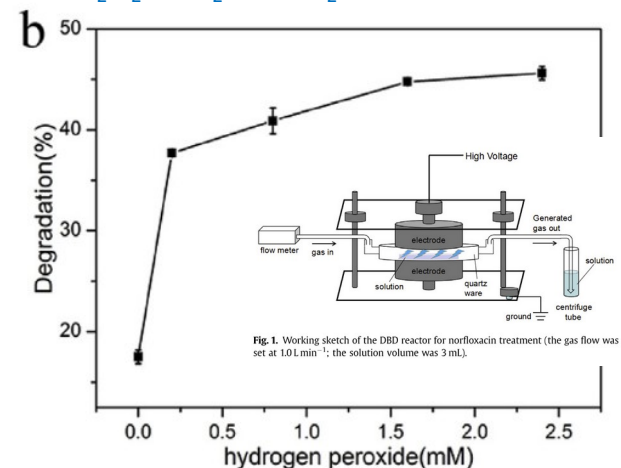
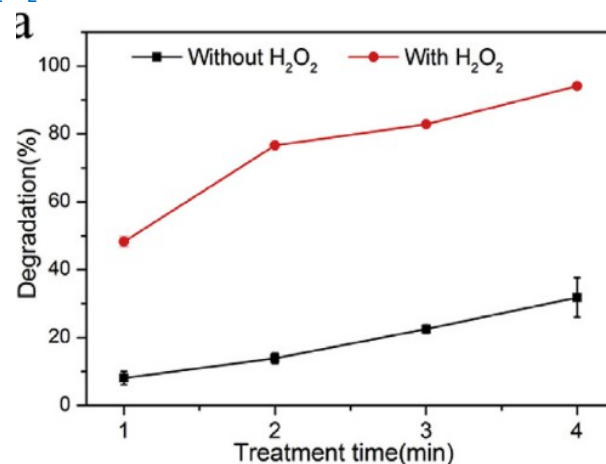
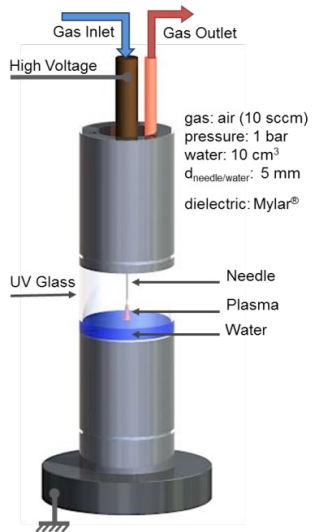
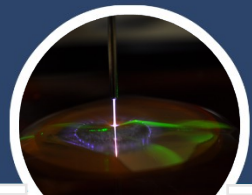


Fig. 4. Effect of adding hydrogen peroxide on the degradation rate of norfloxacin treated by DBD in nitrogen: (a) different treatment time with 20 μM H₂O₂. (b) Different amount of addition of hydrogen peroxide with 2 min treatment time. (H₂O₂: 1.0 mM; input current: 1.5 A).

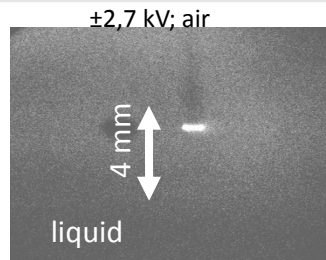
Zhang et al. (2018) Chemosphere 210, 433-439

Conditions opératoires → effets sur les ROS



GREMI

Fast imaging
Exposure time 200 μ s



Corona regime

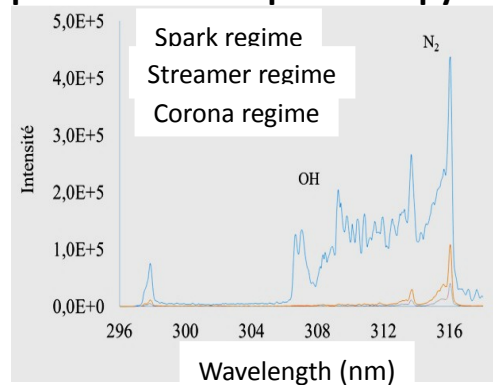
±4 kV; air

Streamer regime

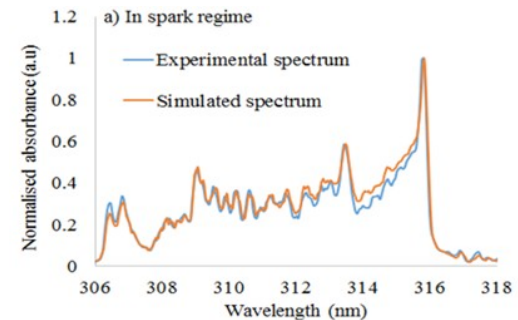
±5 kV; air

Spark regime

Optical Emission Spectroscopy



Specair® simulation

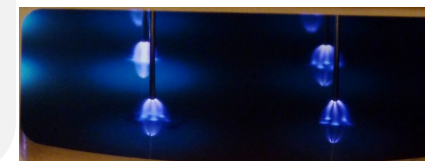


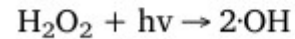
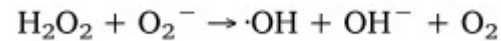
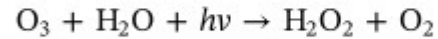
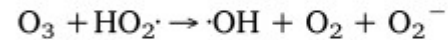
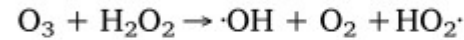
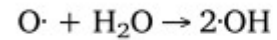
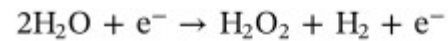
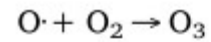
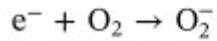
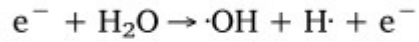
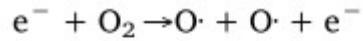
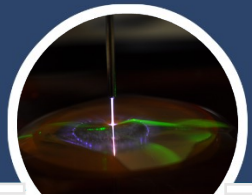
Simulation spectra:

$T_{rot} = 1800$ K (spark) and $T_{rot} = 450$ K (streamer)

L'efficacité de dégradation liée à la production de \bullet OH et espèces oxydantes (O, O_3 ...) dépend des paramètres expérimentaux.

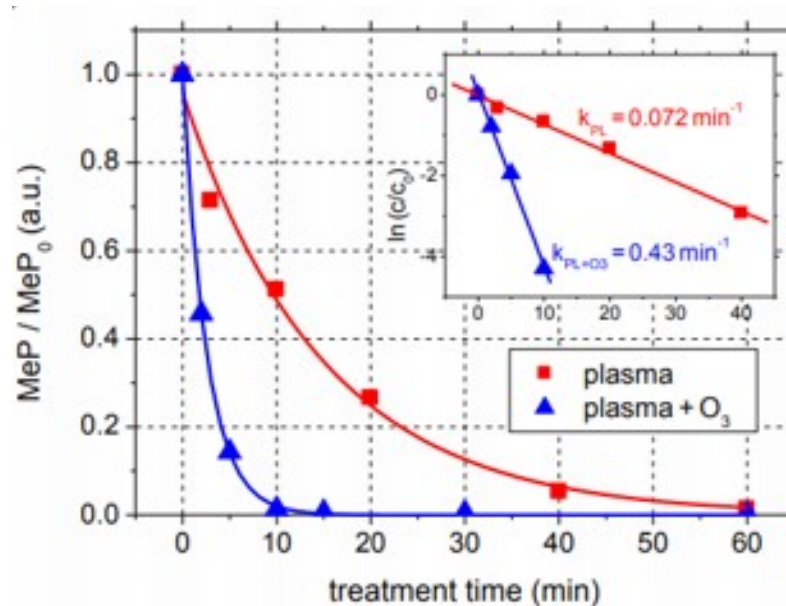
Meilleure production \bullet OH dans le régime Spark **MAIS dysfonctionnement** du réacteur multi-pointes pour le traitement → vapeur d'eau présente, mauvais contrôle de l'allumage de toutes les électrodes, dégradation des électrodes



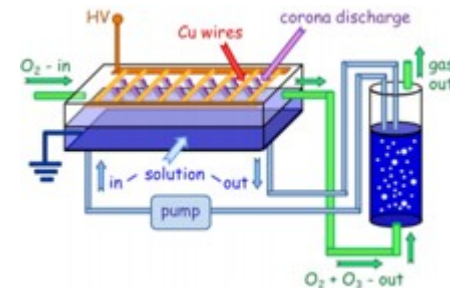


Production d'espèces réactives à longues et courtes durées de vie → effets différents sur la dégradation

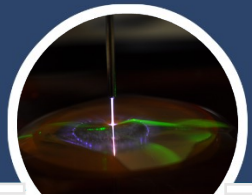
Plasma + ozonation



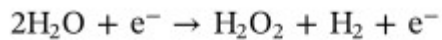
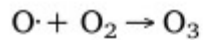
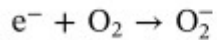
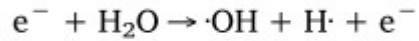
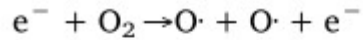
MeP - Methylparaben - preservative (PPCP)



M. Magureau et al., Chemosphere 165 (2016) 507

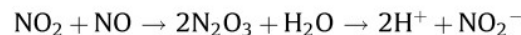
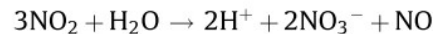
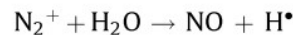
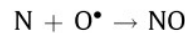
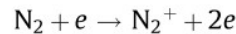
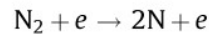
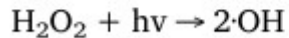
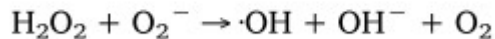
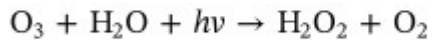
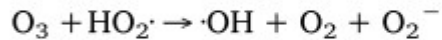
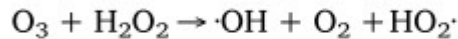
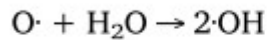


Production d'espèces réactives à longues et courtes durées de vie → effets différents sur la dégradation



En présence de N_2 et milieu oxydant. Réactions de compétition formation $\cdot OH$ et consommation

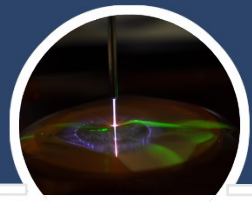
Formation de nitrates → acidification du milieu (avec formation d'acides)



Reaction	Typical rate at 298 K ($m^3 s^{-1}$)
$OH + OH \rightarrow H_2O + O$	1.9×10^{-18}
$OH + O \rightarrow O_2 + H$	3.3×10^{-17}
$OH + H \rightarrow H_2O$	2×10^{-16}
$OH + N \rightarrow O + NH$	4.7×10^{-17}
$OH + NH \rightarrow H_2 + NO$	8×10^{-17}
$OH + HO_2 \rightarrow H_2O + O_2$	1.1×10^{-16}
$OH + HNO \rightarrow H_2O + NO$	1.5×10^{-17}
$OH + H_2 \rightarrow H_2O + H$	6.7×10^{-21}
$OH + O_3 \rightarrow HO_2 + O_2$	6.7×10^{-20}
$OH + O_2 \rightarrow HO_2 + O$	$\approx 10^{-50}$
$OH + H_2O_2 \rightarrow HO_2 + H_2O$	1.7×10^{-19}
$OH + OH + M \rightarrow H_2O_2 + M$	2.6×10^{-17}
$OH + NO + M \rightarrow HNO_2 + M$	3.3×10^{-17}
$OH + NO_2 + M \rightarrow HNO_3 + M$	7.5×10^{-17}

Bruggeman and Schram, Plasma Sources Sci. Technol 19 (2010) 045025

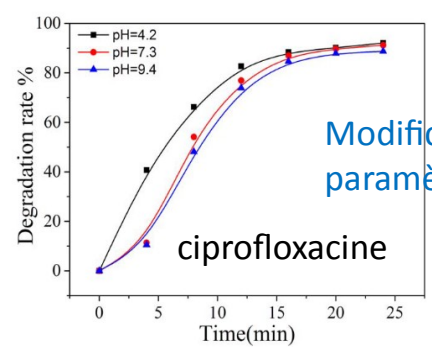
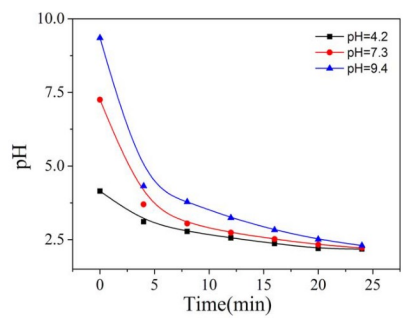
Les procédés doivent produire efficacement suffisamment de ROS !



Paramètres physico-chimiques

Traitement → Acidification et augmentation de la conductivité

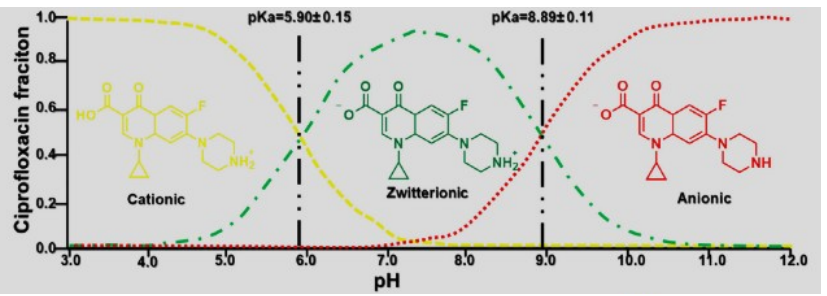
formation d'ions H_3O^+ , acides nitrique et nitreux, acides organiques (décomposition du polluant)



Modification du pH initial → modification des paramètres physico-chimiques de la solution à traiter

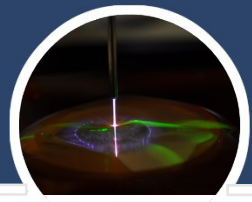
ciprofloxacin

ciprofloxacin



Mécanismes de dégradation fonction du pH

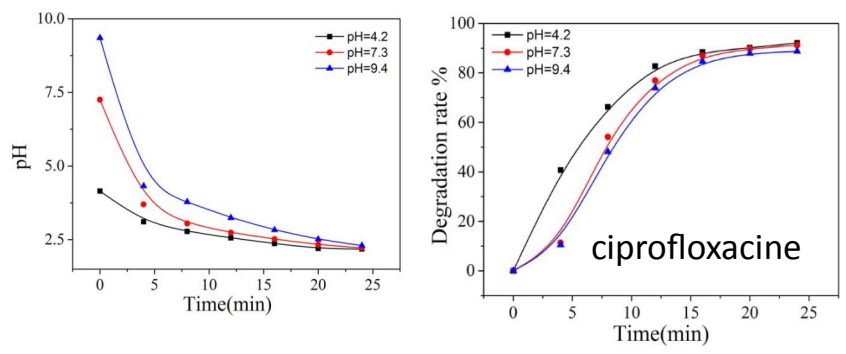
Hu *et al* Plasma Sci. Technol. 21 (2019) 015501



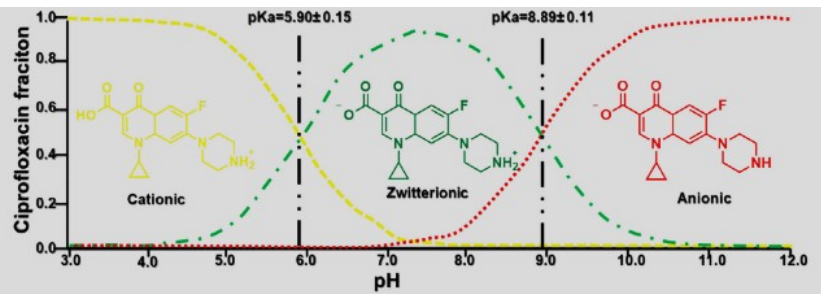
Paramètres physico-chimiques

Traitement → Acidification et augmentation de la conductivité

formation d'ions H_3O^+ , acides nitrique et nitreux, acides organiques (décomposition du polluant)

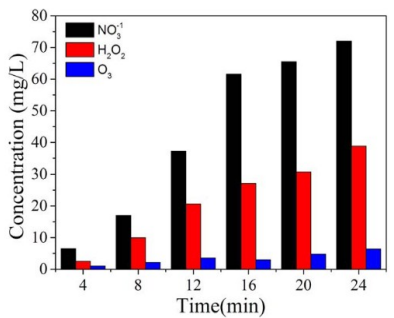


ciprofloxacin

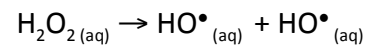
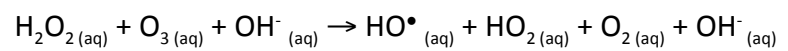


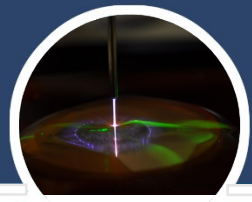
Mécanismes de dégradation fonction du pH

Hu *et al* Plasma Sci. Technol. 21 (2019) 015501



Formation H_2O_2 et O_3 : formation $\bullet OH$ après la décharge

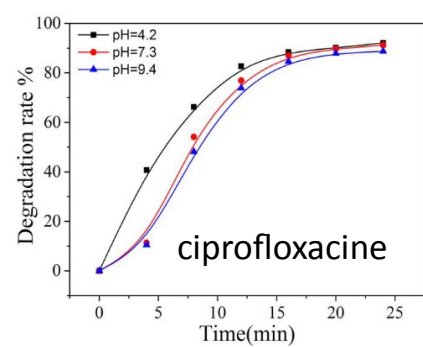
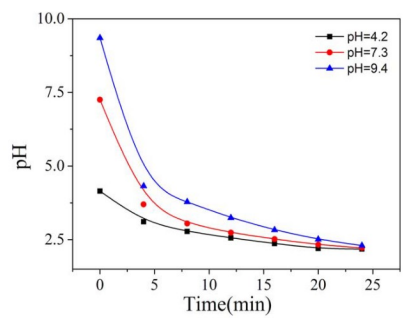




Paramètres physico-chimiques

Traitement → Acidification et augmentation de la conductivité

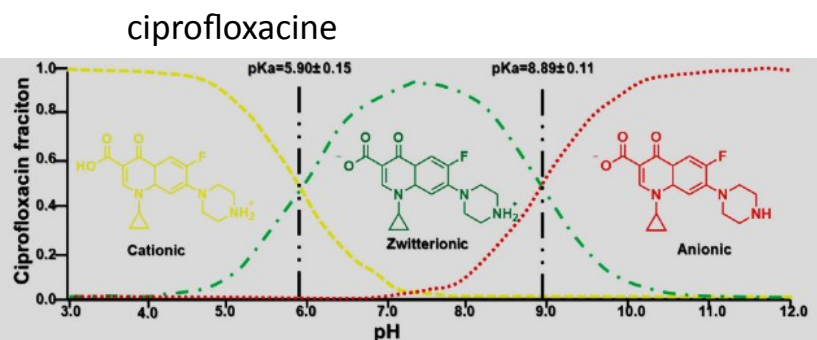
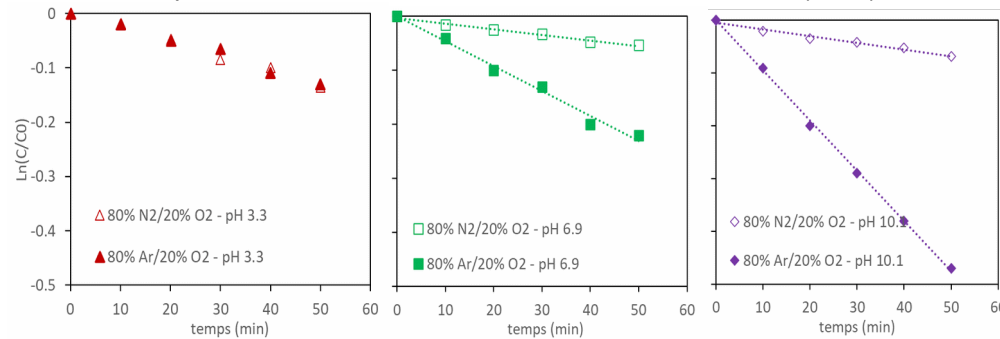
formation d'ions H_3O^+ , acides nitrique et nitreux, acides organiques (décomposition du polluant)



Augmentation du pH initial

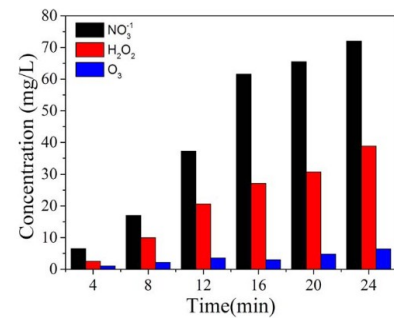
Traitement du phénol, $500 \mu\text{mol.L}^{-1}$

Adapté de Lukes *et al.*, Plasma Sources Sci. Technol. 23 (2014) 015019

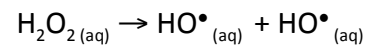
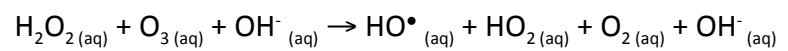


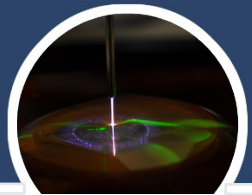
Mécanismes de dégradation fonction du pH

Hu *et al* Plasma Sci. Technol. 21 (2019) 015501



Formation H_2O_2 et O_3 : formation $\bullet OH$ après la décharge





Mécanisme de génération des RONS et ...

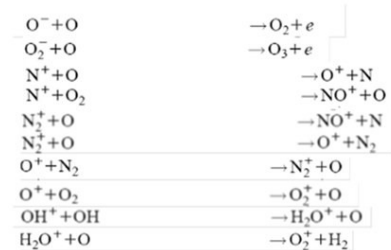
1. Electron impacts:



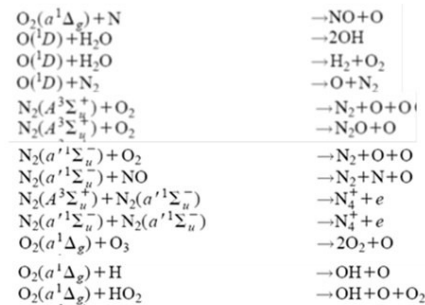
2. Ion-ion Recombinations:



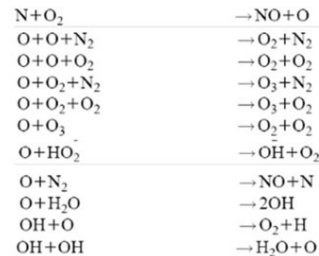
3. Detachment and ion conversions

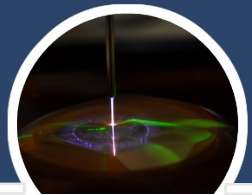


4. Reactions involving excited species:



5. Reactions involving radicals with background gas:



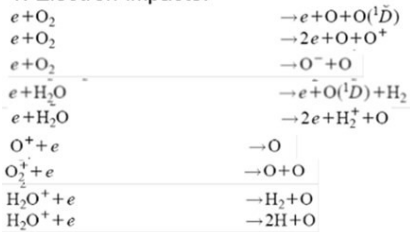


Efficacité des procédés dépend de plusieurs mécanismes

Mécanisme de génération des RONS et ...

- Diffusion dans le(s) milieu(x)
- Réactions entre les radicaux générés et les espèces présentes dans le liquide

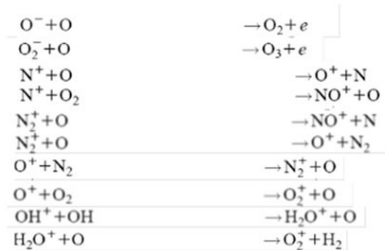
1. Electron impacts:



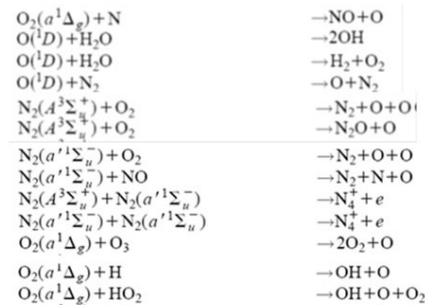
2. Ion-ion Recombinations:



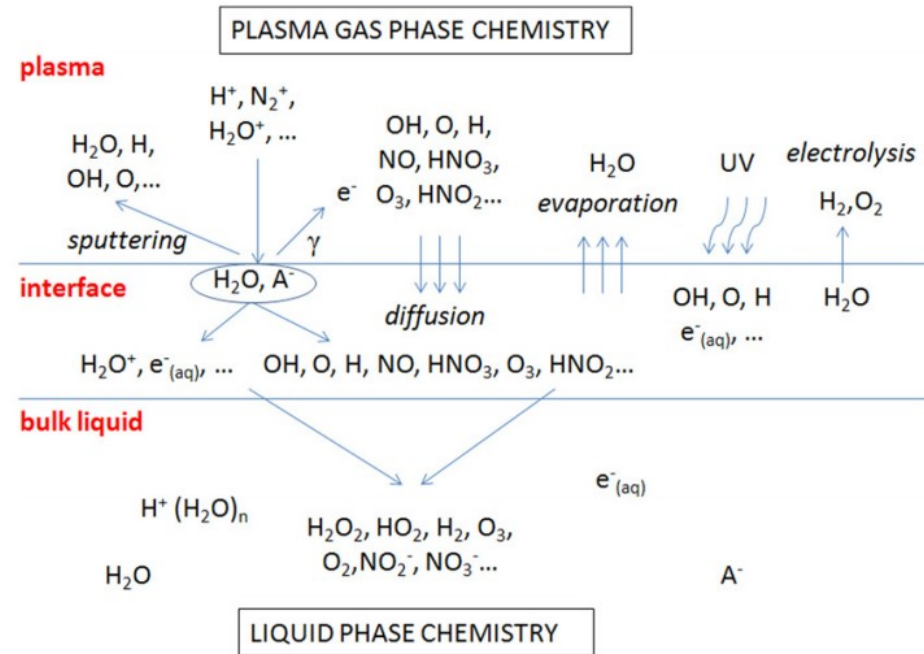
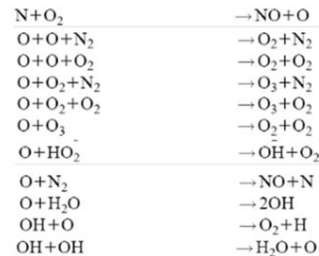
3. Detachment and ion conversions



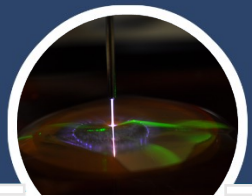
4. Reactions involving excited species:



5. Reactions involving radicals with background gas:



Bruggeman *et al.*, Plasma Source Sci. Technol. 25 (2016) 053002



Mécanisme de dégradation : phénol

Produits générés et identification des mécanismes de dégradation → chimie analytique : HPLC, HPLC-MS, HRMS...

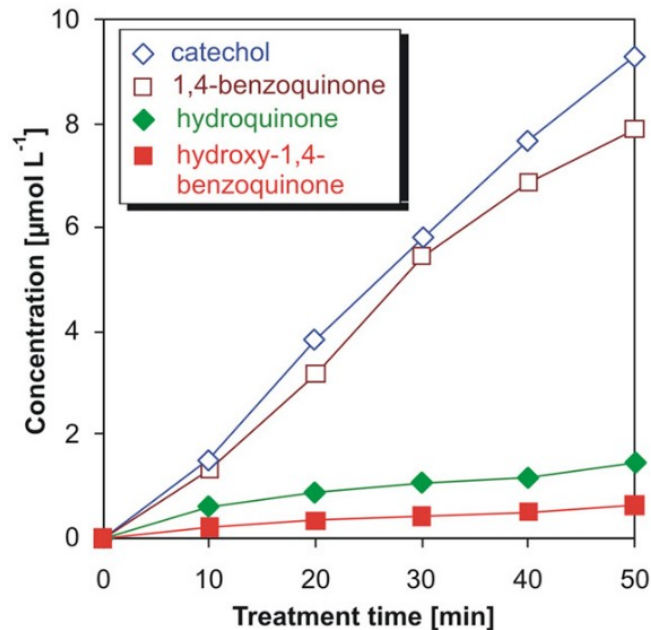
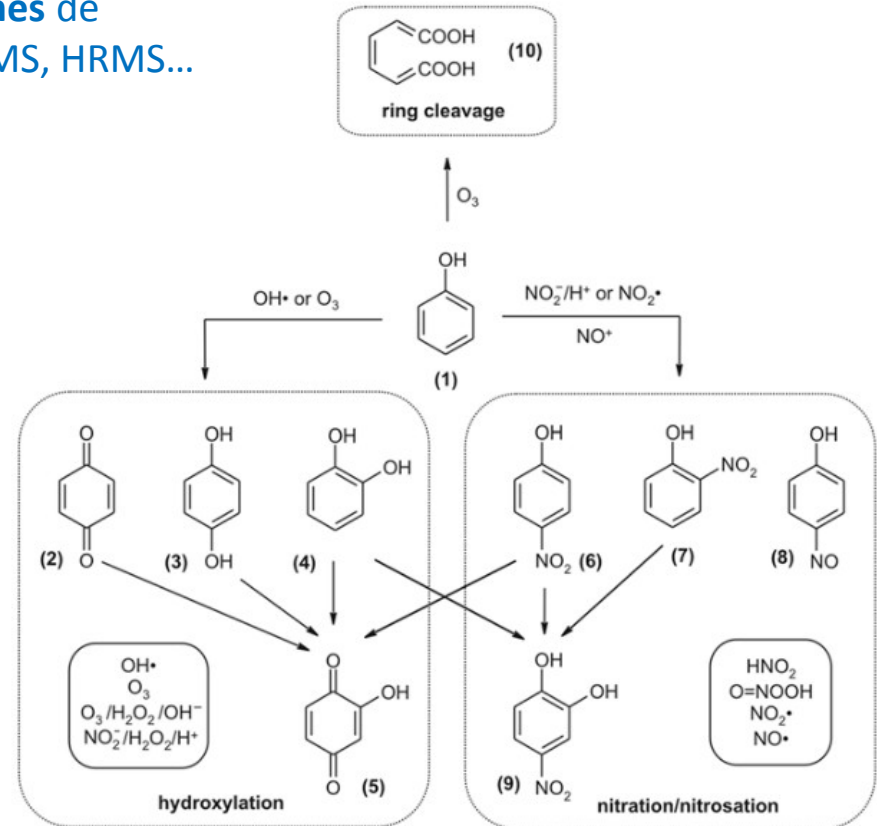
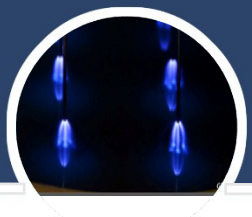


Figure 12. Formation of hydroxylated products of phenol during treatment by the air discharge plasma. The initial concentration of phenol was $500 \mu\text{mol l}^{-1}$, buffered solution pH 3.3.



Sélectivité des produits en fonction des paramètres expérimentaux



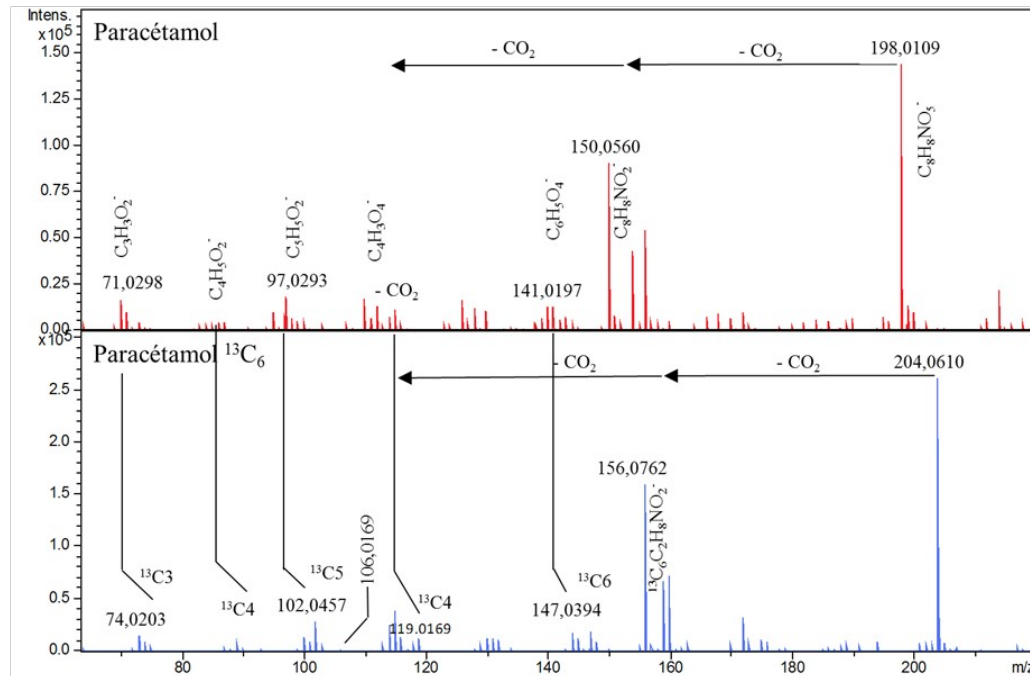
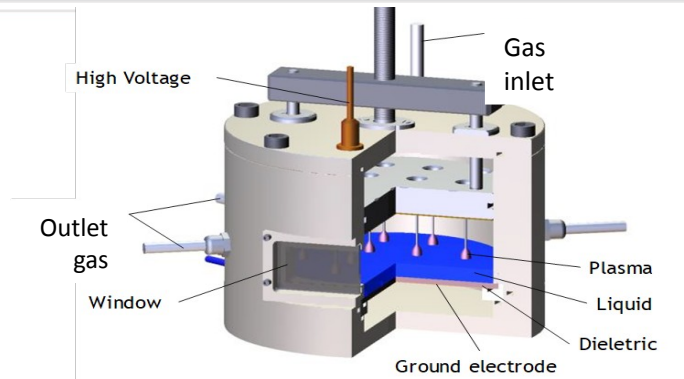
Identification des voies de dégradation : paracétamol marqué



Comparaison de deux spectres de masse en mode ESI négatif suite à traitement plasma

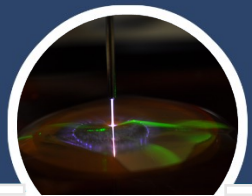
a) solution de paracétamol

b) solution de paracétamol marqué avec ^{13}C (et ^{15}N , D).

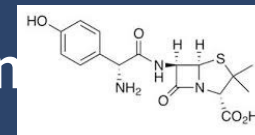


Mise en évidence rupture du cycle aromatique

Nom de l'acide	m/z	Marquage
théorique		
Acide acétique	61.01	$^{13}\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2^-$
Acide acrylique	74.02	$^{13}\text{C}_3\text{H}_3\text{O}_2^-$
acide glycolique	77.05	$^{13}\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_3^-$
Acide oxamique ($\text{C}_2\text{H}_2\text{NO}_3^-$)	88.01	-
Acide crotonique	89.04	$^{13}\text{C}_4\text{H}_5\text{O}_2^-$
Acide pyruvique	90.06	$^{13}\text{C}_3\text{H}_3\text{O}_3^-$
Acide lactique	91.02	$^{13}\text{C}_3\text{H}_5\text{O}_3^-$
Acide malonique	106.01	$^{13}\text{C}_3\text{H}_3\text{O}_4^-$
Acide maléïque	119.01	$^{13}\text{C}_4\text{H}_3\text{O}_4^-$
Acide succinique	119.03	$^{13}\text{C}_2\text{H}_5\text{C}_2\text{O}_4^-$
Acide muconique	147.04	$^{13}\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_4^-$
Acide	150.03	$^{13}\text{C}_5\text{H}_5\text{O}_5^-$
Acétone-dicarboxylique		



Comparaisons d'efficacité PNT : l'amoxicilline

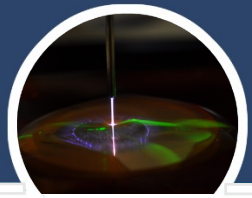


Effet de la configuration du réacteur, : nature de l'eau (pH, conductivité), concentrations en polluant, volume traité, alimentations électriques...

Discharge type	Experimental conditions	Removal / treatment time	Mineralization / treatment time	Energy yield (g/kWh)
Antibiotic class: Beta-lactam Compound: Amoxicillin				
Pulsed DBD with liquid falling film and gas recycling	Solution: $c_0 = 100$ mg/L, 200 mL, tap water, 900 $\mu\text{S}/\text{cm}$, pH 8, Gas: $\text{O}_2 - 0.6$ L/min, Input energy - pulsed: 17 kV, 110 A, 30 ns, 50 Hz, 2 W	100% / 10 min	22.5% / 120 min	105 (for R $\geq 90\%$)
Corona above liquid	Solution: $c_0 = 109.5$ mg/L, 3.65 mg/L, 70 mL Gas: humid air, 0.03 L/min Input energy - a.c., 18 kV, 50 Hz	100% / 180 min (109.5 mg/L)	5% / 180 min (109.5 mg/L) 100% / 360 min (3.65 mg/L)	-
Pulsed corona with liquid shower	Solution: $c_0 = 50$ mg/L, deionized water, pH ~ 12 (NaOH), pH ~ 6.5 Gas: air Input energy - pulsed; 22 kV, 180 A, 100 ns, 0.12 J/pulse, 50 Hz (50-500 Hz)	$\geq 90\%$ / 100 min	-	149.75 (alkaline) 100 (neutral) (for R = 50%)
Gliding arc above liquid	Solution: $c_0 = 42$ mg/L, 500 mL Gas: humid air, 800 L/h	78% / 120 min	37.5% / 120 min	0.196 ^c (for R $\approx 8\%$)
Gliding arc with liquid spray	Input energy - 4.5 kV, 50 Hz, 41.85 W	98% / 120 min	54.5% / 120 min	0.246 ^c (for R = 98%)
Array of plasma jets	Solution: $c_0 = 1$ mg/L, 40 mL Gas: air, 0.5 L/min Input energy - a.c., 8 kV (4-8 kV), 8 kHz	99.91% / 1 min 8 kV	-	-

Bonnes conversions
minéralisation et RE restent à améliorer

Magureanu *et al.*, J Hazard. Mater. 417 (2021) 125481

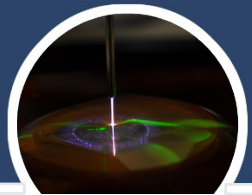


Limitations



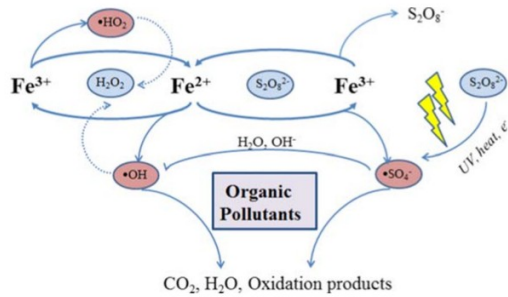
- % Conversion
- % Minéralisation
- Produits générés
- Rendement énergétique
- ...

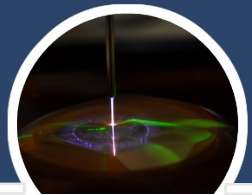




Améliorer le procédé

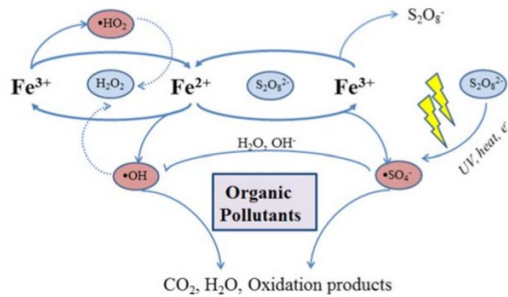
Catalyse Homogène Fenton (FeSO_4)



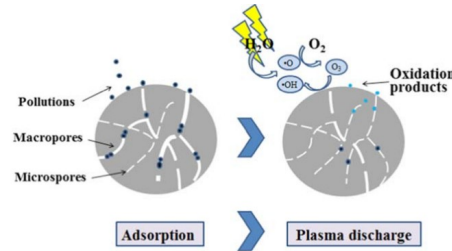
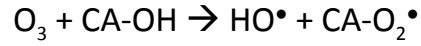


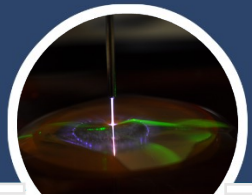
Améliorer le procédé

Catalyse Homogène Fenton (FeSO₄)



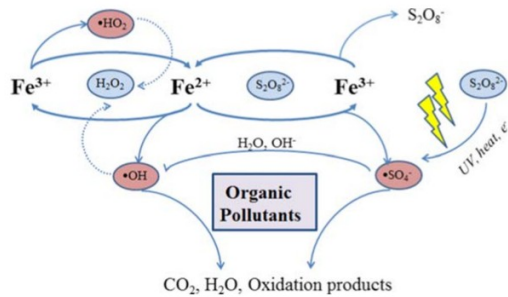
Carbones Activés/O₃



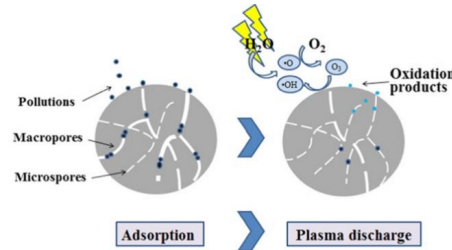
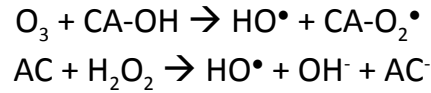


Améliorer le procédé

Catalyse Homogène Fenton (FeSO₄)



Carbones Activés/O₃



Photocatalyse TiO₂

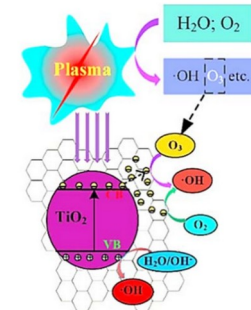
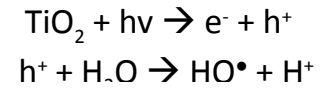
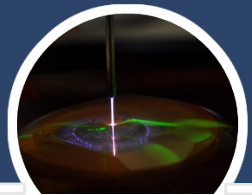
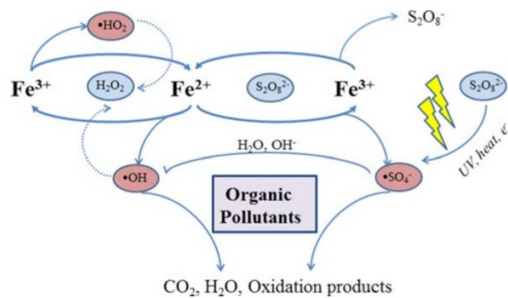


Fig. 2 The formation of strong oxides in the plasma-GO/TiO₂ system (Guo et al. 2019b)(CB: conduction band; VB: valence band)

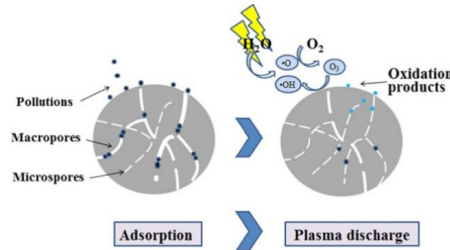
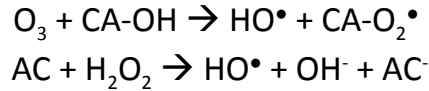


Améliorer le procédé

Catalyse Homogène Fenton (FeSO₄)



Carbones Activés/O₃



Photocatalyse TiO₂

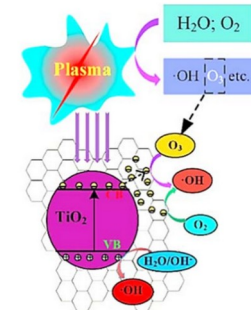
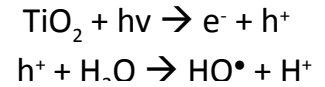
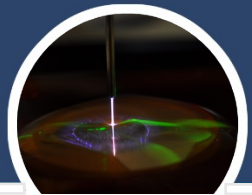


Fig. 2 The formation of strong oxides in the plasma-GO/TiO₂ system (Guo et al. 2019b)(CB: conduction band; VB: valence band)

Catalyse Hétérogène Fenton-Like,

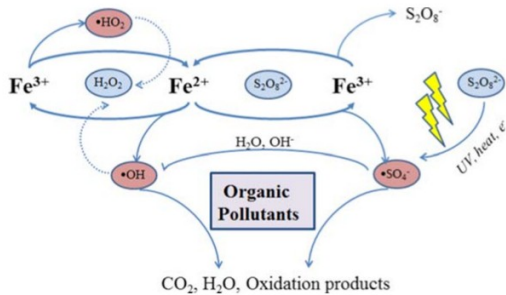


E. Neyens, J. Baeyens (2003) J. Hazard. Mat. B98, 33-50

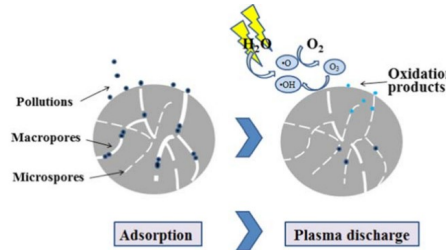
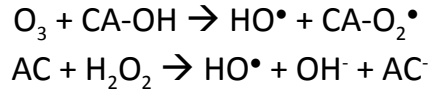


Améliorer le procédé : couplage de procédés

Catalyse Homogène Fenton (FeSO₄)



Carbones Activés/O₃



Photocatalyse TiO₂

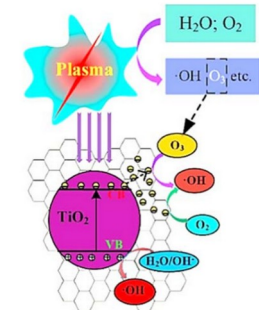
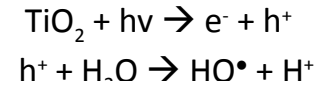


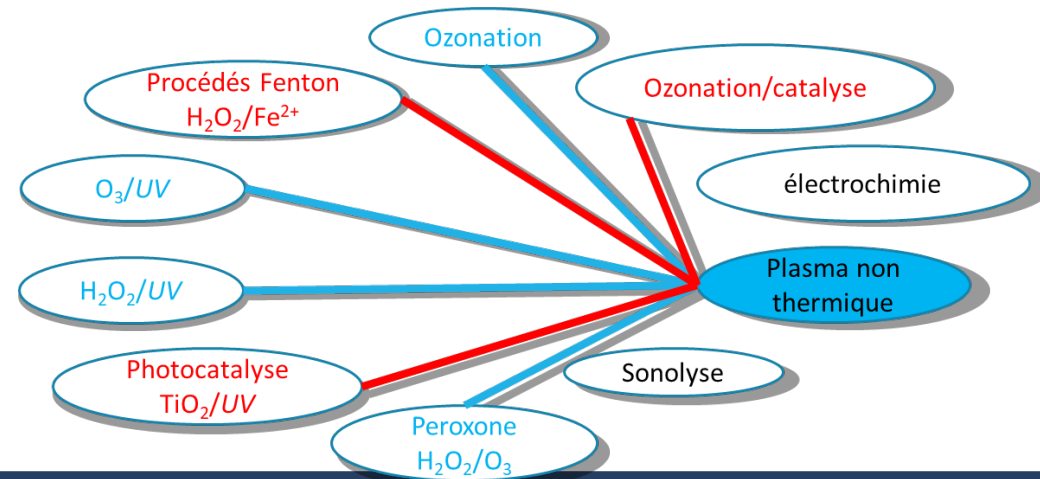
Fig. 2 The formation of strong oxides in the plasma-GO/TiO₂ system (Guo et al. 2019b)(CB: conduction band; VB: valence band)

Catalyse Hétérogène Fenton-Like,



E. Neyens, J. Baeyens (2003) J. Hazard. Mat. B98, 33-50

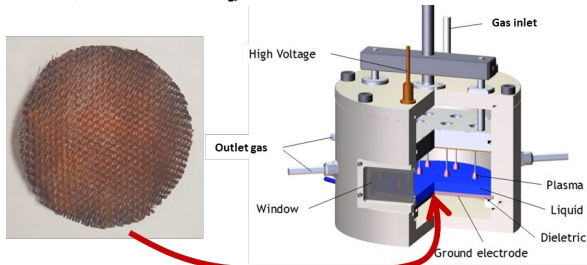
Exemple couplage **Plasma non thermique + catalyse hétérogène**
 → nouvelles voies de formation espèces oxydantes telles que HO•



Couplage plasma-catalyse (paracétamol)

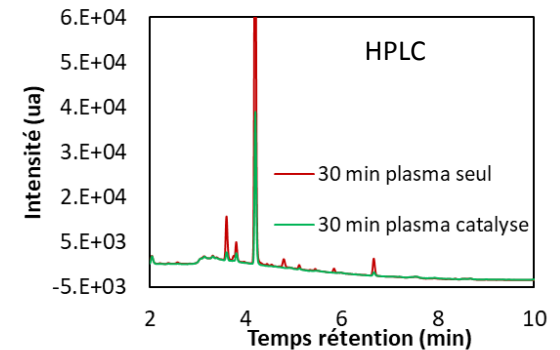
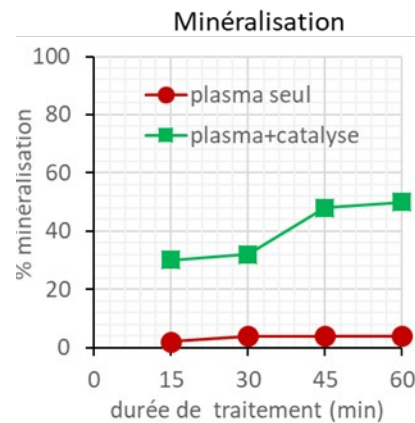
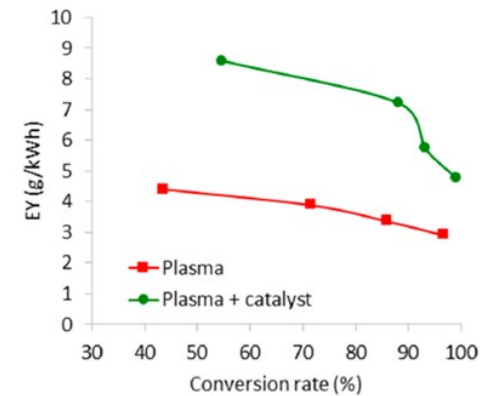
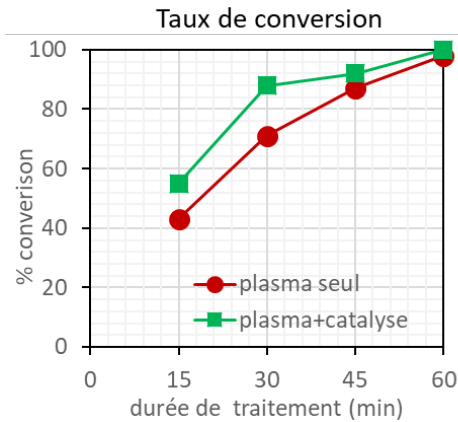


GREMI



Catalyseur
Gaz : air

Avec catalyseur : Améliorations taux de conversion, rendement énergétique, minéralisation
avec les catalyseurs seuls sans plasma, pas de dégradation du paracétamol



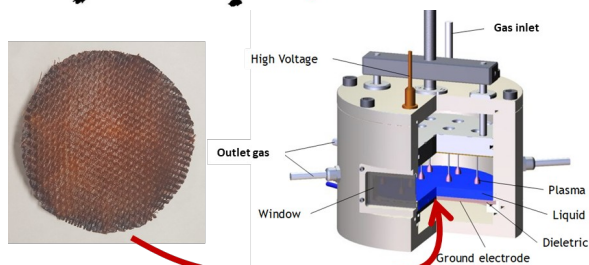
Norsic *et al.*, ISNTPT-11, (2017)

Korichi *et al.* Catalysts, 10, (2020) 959



Couplage plasma-catalyse (paracétamol)

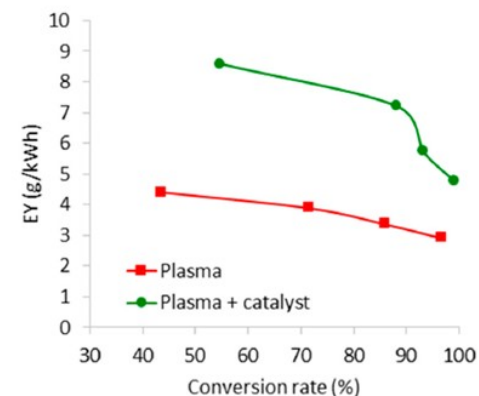
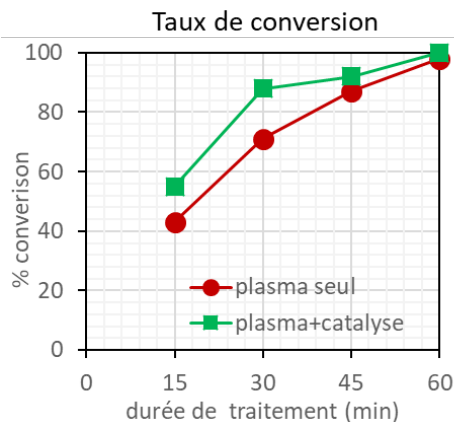
GREMI



Catalyseur
Gaz : air

Avec catalyseur : Améliorations taux de conversion, rendement énergétique, minéralisation

avec les catalyseurs seuls sans plasma, pas de dégradation du paracétamol



Effet nature et composition des catalyseurs

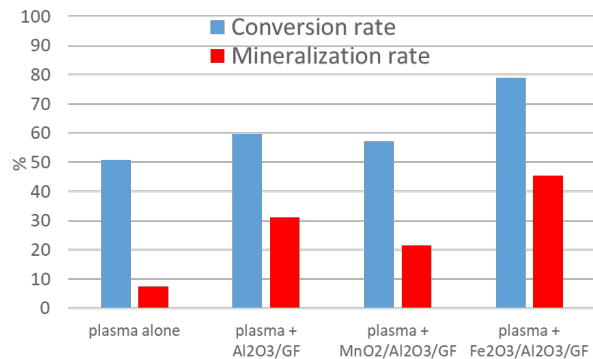
Operating conditions:

Plasma: 500 Hz, 11.2 kV

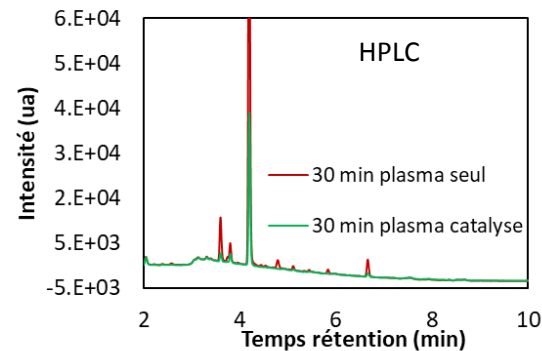
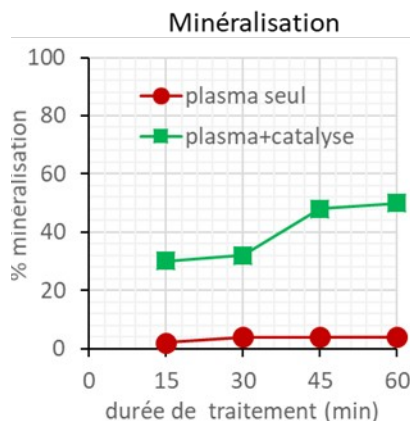
[para] = 25 mg.L⁻¹

V_{treated} = 40 mL

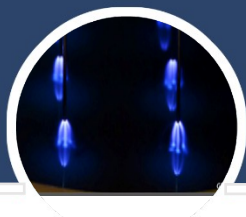
Treatment duration : 30 min



Norsic et al., ISNTPT-11, (2017)



Korichi et al. Catalysts, 10, (2020) 959



Comparaison plasma+catalyse / plasma seul

Gain sur conversion Gain sur RE
Gain sur minéralisation

Catalyst	Preparation method	Antibiotic	Improvement by plasma-catalysis vs. plasma alone ^a		
			Degradation rate / treatment time	Energy yield gain ^b	Mineralization rate / treatment time
FeSO ₄		Sulfadiazine	99% ^c (73%) / 9 min	136%	34% ^c (25%) / 30 min
			98% (35%) / 3 min	280%	33% (25%) / 30 min
		Norfloxacin	89.7% (42%) / 0.5 min	213%	72.5% (49.7%) / 15 min
TiO ₂	Sol-gel method	Tetracycline	85.2% (62%) / 24 min	137%	53% (25%)
Bi ₂ MoO ₆	Solvent thermal method		96% (62%) / 24 min	155%	63% (25%)
rGO-TiO ₂ nanocomposites	Modified Hummers method for GO; Impregnation for rGO/TiO ₂ or rGO/WO ₃	Flumequine	99.4% (64%) / 60 min	155%	35.8% (27.2%)
rGO - WO ₃ nanocomposites	TiO ₂ /WO ₃ Impregnation	Enrofloxacin	99.4% (64.8%) / 60 min	153%	35.8% (27.2%)
		Chloramphenicol	99.1% (76%) / 60 min	130%	39.9% (31.6%)
rGO-WO ₃ -Fe ₃ O ₄ nanocomposites	Impregnation	Thiamphenicol	88.1% (51.3%) / 60 min	172%	42.5% (33.7%)
Ag ₃ PO ₄ /ACFs		Levofloxacin	99.3% (59%) / 60 min	168%	45.3% (27.5%)
Mn/γ-Al ₂ O ₃ (10 wt%)	Incipient wetness impregnation method	Tetracycline hydrochloride	93.2% (63%) / 18 min	148%	46% (11.6%)
Fe-Mn GAC	Impregnation – desiccation method	Oxytetracycline	99.3% (69.7%) / 5 min (with O ₂)	142%	COD removal with air: 57% (20%)
			93.5% (82%) / 20 min	114%	42.3% (36.7%)

rGO – reduced graphene oxide; ACF – activated carbon fibers; GAC – granular activated carbon.

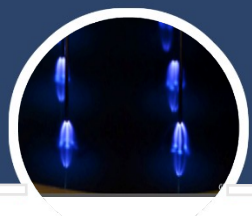
^a Numbers in parenthesis represent the values obtained by plasma treatment, in the absence of catalysts.

^b Calculated by using the degradation rate improvement, assuming the power remains unchanged.

^c Calculated from $\ln(c_0/c_t)$ or $\ln(\text{TOC}_0/\text{TOC}_t)$.

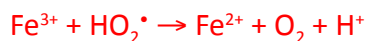
Magureanu *et al.*, J. Hazard Mater. 417 (2021) 125481

Couplage de procédés



Des paramètres supplémentaires (plasma+catalyse)

catalyseur : nature, quantités (ratio $[H_2O_2]/[Fe]$), géométrie



Xu *et al.* Sep. Purif. Technol. 230 (2020) 115862

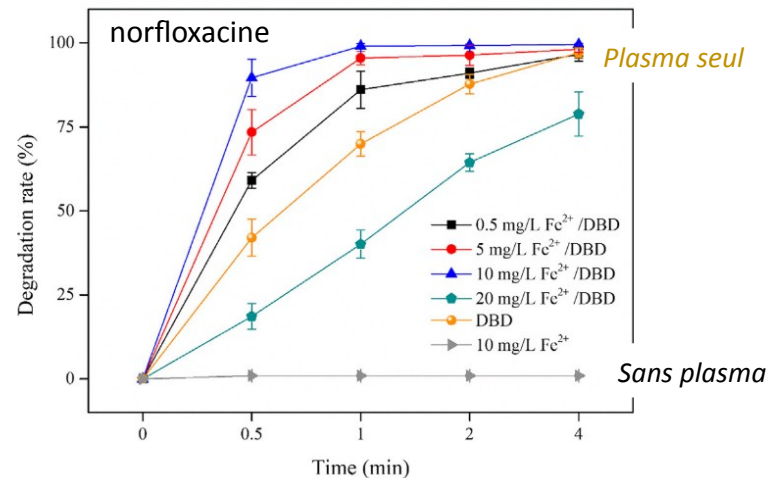


Fig. 8. Effect of DBD/Fe²⁺ on the NOR degradation rate (C₀ = 10 mg/L, P = 60 W).

Levofloxacin / catalyse Ag₃PO₄

Gong *et al.* Sep. Purif. Technol. 250 (2020) 117264

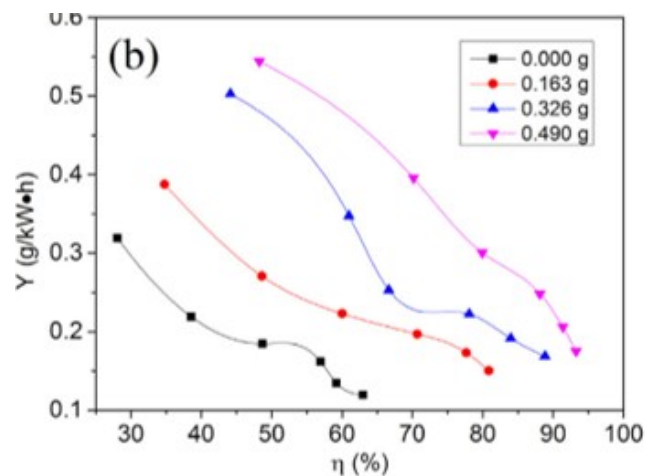
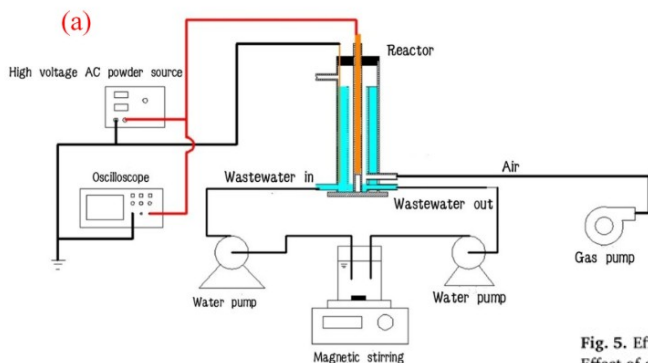
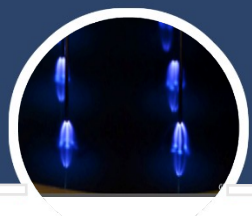


Fig. 5. Effect of catalyst dosage on the degradation efficiency (a) and energy efficiency of LFX (b); (c) Effect of recycle times on the degradation efficiency of LFX; (d) Effect of catalyst dosage on the mineralization efficiency of LFX (Experimental conditions: initial concentration of LFX 20 mg/L, discharge voltage 10 kV, initial pH 6.93, liquid circulation flowrate 168 mL/min).

Couplage de procédés



Des paramètres supplémentaires (plasma+catalyse)

catalyseur : nature, quantités (ratio $[H_2O_2]/[Fe]$), géométrie

Longévité, durée de vie du catalyseur : régénération du catalyseur, relargage dans l'eau de matériaux catalytique et support ...

Viellissement du catalyseur : Caractérisation des matériaux avant/après traitement

Position du catalyseur par rapport au plasma (post-décharge, au contact...) → effets du plasma sur le catalyseur et effets du catalyseur sur la décharge

...

Levofloxacin / catalyse Ag_3PO_4

Gong et al. Sep. Purif. Technol. 250 (2020) 117264

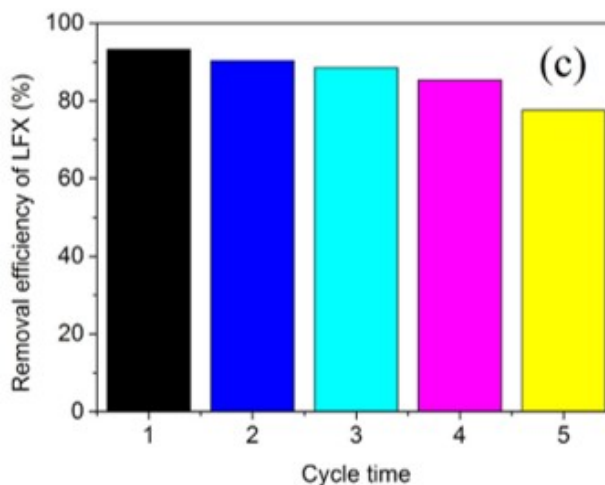
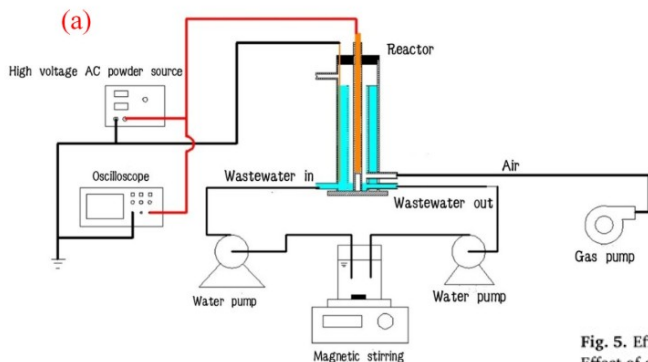


Fig. 5. Effect of catalyst dosage on the degradation efficiency (a) and energy efficiency of LFX (b); (c) Effect of recycle times on the degradation efficiency of LFX; (d) Effect of catalyst dosage on the mineralization efficiency of LFX (Experimental conditions: initial concentration of LFX 20 mg/L, discharge voltage 10 kV, initial pH 6.93, liquid circulation flowrate 168 mL/min).

Xu et al. Sep. Purif. Technol. 230 (2020) 115862

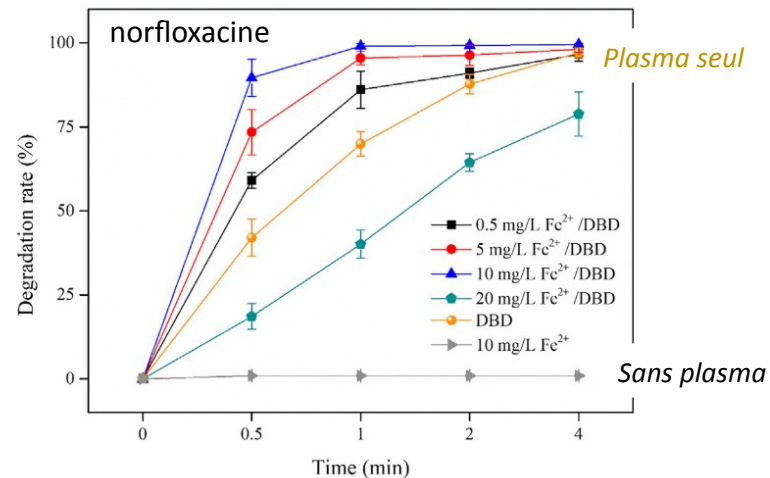
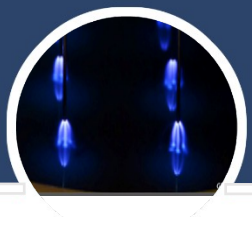


Fig. 8. Effect of DBD/Fe²⁺ on the NOR degradation rate ($C_0 = 10$ mg/L, $P = 60$ W).

Au final... il reste beaucoup de questions

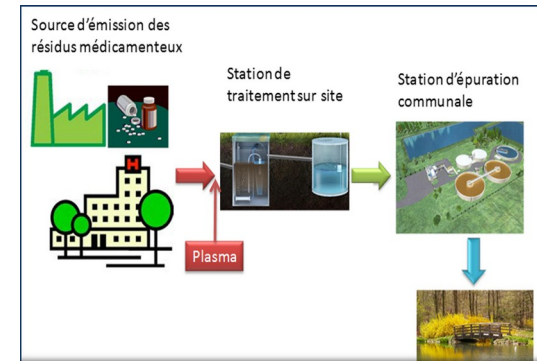


Au final... il reste beaucoup de questions (1/2)

Efficacité traitement et rendements énergétiques fonction des conditions

Procédé applicable à d'autres molécules organiques : herbicides, colorants...

PNT : « petits » volumes, « fortes » concentrations



Optimisation complexe (molécules, concentrations, configuration réacteurs, HT, gaz plasmagène, nature des matrices d'eau...)

Optimiser la production des espèces réactives (HT, réacteur, gaz plasmagène...) et **transferts dans la phase liquide** (utilisation simulation pour prédire l'évolution de ces espèces ?). Réaction avec polluant et intermédiaires générés.

Procédés couplés : plasma+catalyse, plasma + adsorption, plasma-ozonation...

Efficacité sur la dégradation, coûts de traitement (coût catalyseur ?), sélectivité des produits, ...

- ➔ Fonction des catalyseurs (nature, géométrie, dans la décharge, en post-décharge...), polluants...
- ➔ Optimisation du couplage

Au final... il reste beaucoup de questions (2/2)



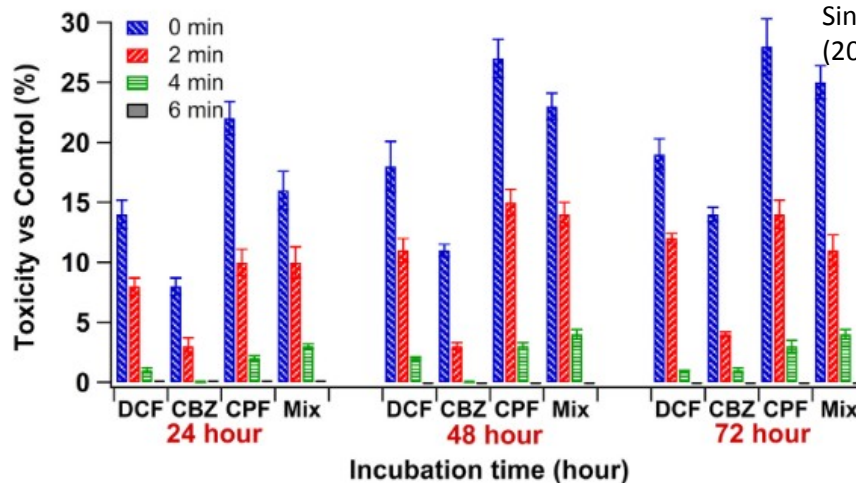
Produits générés → Détection/quantification des produits → seront-ils traités par STEP ?

Propriétés des eaux traitées fonction de leur devenir → STEP ? Infiltration ? ...

Efficacité des bactéries, boues... dépendent des molécules, DCO, DBO, du pH...

(eco)toxicité des solutions traitées.

Commence à être étudié !



Singh *et al.* Water Res. 121 (2017) 20-36

Suivi des produits désorbés (ou produits en phase gazeuse par le plasma) ?

Comparaison des procédés entre PNT couplés ou non / autres POA (photocatalyse, Fenton., ozonation...) : même molécules, même matrices d'eau...

Mise à l'échelle des procédés / coûts économiques ?

Et traitement des **matrices complexes** ?



Matrices complexes : ex des effluents hospitaliers

Ajo et al. J. Environ. Chem. Eng. 6 (2018) 1569-1577

Power	Raw	30 W	Removal	30 W	Removal	30 W
Energy, kWh m ⁻³		0.1		0.5		1.0
Substance, µg L ⁻¹		PCD		PCD		PCD
Bisoprolol	0.84	0.6	29%	0.17	80%	< 0.10
Caffeine	470	450	4%	420	11%	380
Carbamazepine	0.35	0.25	29%	< 0.05	100%	< 0.05
Ciprofloxacin	13	8.6	34%	4.1	68%	0.85
Citalopram	0.23	0.17	26%	< 0.10	100%	< 0.10
Diclofenac	0.6	0.42	30%	< 0.05	100%	< 0.05
Doxycycline	2	1.2	40%	< 0.20	100%	< 0.20
Enalapril	0.31	0.26	16%	0.23	26%	0.19
Entacapone	1.1	0.26	76%	< 0.10	100%	< 0.10
Estriol	0.91	1.1	-21%	< 0.05	100%	< 0.05
Estrone	0.1	0.065	35%	< 0.05	100%	< 0.05
Furosemide	11	4.7	57%	< 0.50	100%	< 0.50
Hydrochlorothiazide	4.2	4.8	-14%	4	5%	2.2
Hydrocortisone	0.45	0.33	27%	0.43	4%	0.35
Ibuprofen	28	34	-21%	24	14%	14
Metoprolol	0.37	0.33	11%	0.18	51%	< 0.05
Metronidazole	8.9	6.6	26%	7.8	12%	7.3
Naproxen	1.1	0.78	29%	< 0.10	100%	< 0.10
Ofloxacin	16	11	31%	2.2	86%	< 0.50
Paracetamol	580	420	28%	70	88%	63
Propranolol	0.21	0.1	52%	< 0.10	100%	< 0.10
Sulfamethoxazole	5.8	2.7	53%	< 0.10	100%	< 0.10
Tetracycline	1.6	0.83	48%	0.15	91%	0.14
Trimethoprim	1.2	0.92	23%	0.061	95%	< 0.01

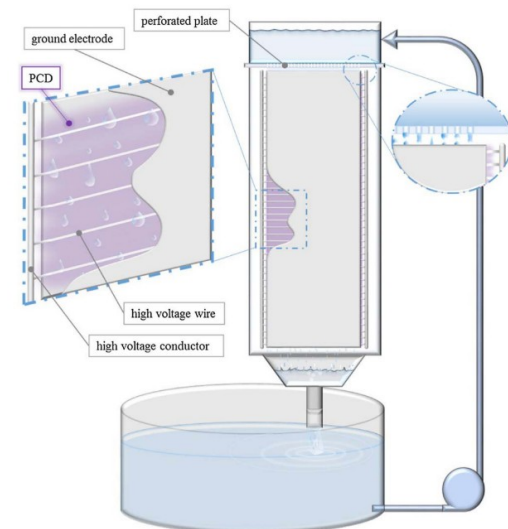


Fig. 1. Experimental PCD configuration for treatment of 50-L batches (not in scale).

Mais que sont devenus les produits générés ?



05 - 08 juillet 2021
Nancy



Merci pour votre attention

Hervé Rabat, Dunpin Hong, Caroline Norsic, Yasmine Baloul, Noussaiba Korichi, Mohamed-Ali Antoissi, Guy Coudrat, Nicolas Dumuis, Sébastien Dozias, Sotheara Chuon, Cyril Colas, Benoît Maunit, Benoît Cagnon



Groupes de Recherches sur l'Energétique des Milieux Ionisés
14 rue d'Issoudun 45067 Orléans Cedex 2 France

