



# TECNOLOGIE INNOVATIVE PER ACQUE PULITE

Premiato con il Premio Tesi di Dottorato “Cinzia Chiappe” 2025 del Gruppo Interdivisionale Green Chemistry - Chimica Sostenibile, questo studio illustra un innovativo processo ibrido di cavitazione idrodinamica e plasma freddo in grado di degradare rapidamente residui farmaceutici in matrici acquose su scala pilota, offrendo una soluzione “green” e potenzialmente scalabile a livello industriale.

## Introduzione

Negli ultimi anni la contaminazione delle risorse idriche da farmaci (API, Active Pharmaceutical Ingredients) è diventata una seria minaccia per la salute umana e degli ecosistemi. Le principali fonti di inquinamento includono allevamenti, ospedali e scarichi domestici, che contengono API e loro metaboliti, e le industrie farmaceutiche, che rilasciano direttamente residui farmaceutici e prodotti chimici. A causa della loro bassa biodegradabilità, molti API e metaboliti resistono ai tradizionali trattamenti biologici delle acque reflue. A causa di ciò, la Direttiva UE 2024/3019 prevede che entro il 2045 gli impianti europei di trattamento delle acque reflue (WWTP, WasteWater Treatment Plants) implementino processi di ossidazione avanzata (AOPs, Advanced Oxidation Processes) come trattamento quaternario, in grado di degradare efficacemente i microinquinanti grazie alla produzione di specie reattive dell'ossigeno (ROS, Reactive Oxygen Species) come radicali idrossilici ( $\cdot\text{OH}$ ), radicali superrossido ( $\text{O}_2^{\cdot-}$ ) e acqua ossigenata ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ). Durante il mio dottorato, abbiamo dunque ottimizzato un AOP innovativo e sostenibile, potenzialmente trasferibile su scala industriale, evitando l'uso di ossidanti o catalizzatori utilizzati nei più comuni AOPs come Fenton ( $\text{Fe}^{2+}/\text{H}_2\text{O}_2$ ), ozonizzazione ( $\text{O}_3$ ) e trattamenti a base  $\text{H}_2\text{O}_2$  o persolfati. In dettaglio, sono stati studiati i benefici derivanti dalla sinergia tra cavitazione idrodinamica (HC, Hydrodynamic Cavitation) e plasma “freddo” (ED, Electrical Discharge Plasma) in un prototipo di reattore pilota per la generazione in situ di  $\cdot\text{OH}$ ,  $\cdot\text{O}$ ,  $\text{H}_2\text{O}_2$  e radiazione UV (Fig. 1).

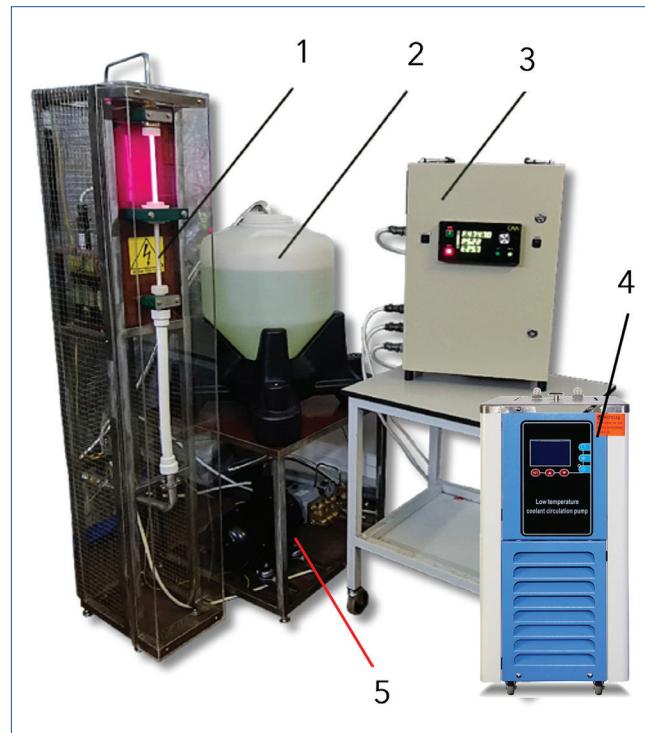


Fig. 1 - Reattore ibrido HC/ED plasma. 1. Reattore, 2. Serbatoio, 3. Pannello di controllo, 4. Unità di raffreddamento, 5. Pompa. Immagine tratta da: F. Verdini et al., Sci. Rep., 2024, 14, 6805, licenza Creative Commons CC BY 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>). VIDEO: <https://drive.google.com/file/d/1EfJhiVBd0jJHc0ARMB-ggNGVummmNRgX/view>



## Sinergia tra HC ed ED plasma

L'HC è un fenomeno fisico in cui, in un flusso d'acqua che attraversa una restrizione (es. tubo Venturi), la pressione diminuisce al di sotto di quella di vapore, causando la formazione di bolle di cavitazione (vapore) che implodono al ripristino della

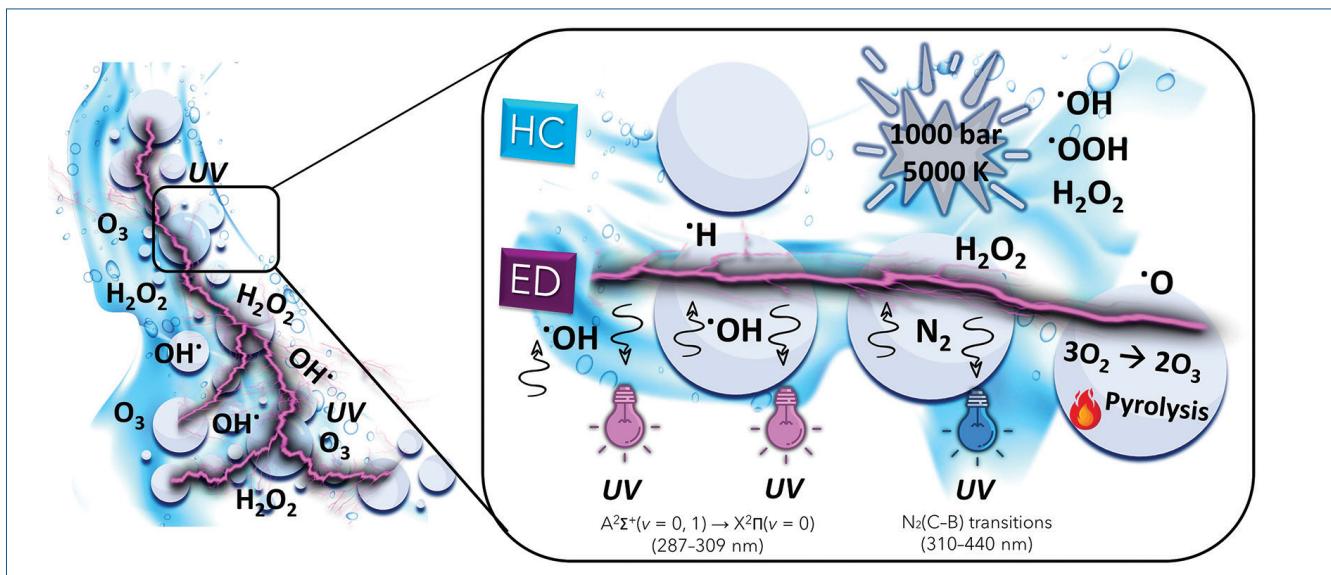
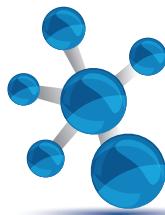


Fig. 2 - Rappresentazione schematica del meccanismo sinergico tra HC ed ED plasma. Immagine tratta da: F. Verdini et al., *Sci. Rep.*, 2024, 14, 6805, licenza Creative Commons CC BY 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

pressione a valle della restrizione (Bernoulli), rilasciando energia sufficiente a scindere omoliticamente i legami delle molecole d'acqua, generando  $\cdot\text{OH}$ . Il plasma, noto come il quarto stato della materia, è costituito da un mezzo ionizzato che comprende atomi, ioni carichi, elettroni, molecole eccitate e radicali liberi. Nel trattamento delle acque si utilizza un plasma freddo, in cui gli elettroni sono molto più energetici delle molecole circostanti, ottenendo reazioni chimiche efficaci senza innalzare la temperatura media, distinguendolo così dal plasma caldo. Nei sistemi convenzionali, l'ED plasma viene generato applicando una corrente a due elettrodi immersi in una fase gassosa o in acqua, producendo UV e ROS attraverso l'impatto degli elettroni con le molecole del mezzo [1]. Individualmente, entrambe le tecnologie hanno dei limiti: basse rese di produzione di ROS in HC e limitata diffusione degli ossidanti nei reattori al plasma convenzionali (DBD, *Dielectric Barrier Discharge*). Tali limitazioni sono state superate ibridando HC ed ED plasma in un reattore prototipo pilota: l'HC promuove la miscelazione turbolenta e la formazione di bolle di cavitazione, mentre le scariche elettriche si propagano attraverso di esse generando ROS *in situ*. In questa configurazione, l'ED plasma viene generato all'interno di bolle di cavitazione (Fig. 2).

## Risultati

L'approccio sinergico HC/ED plasma ha permesso di intensificare i processi di trattamento delle acque

reflue in termini di tempo, efficienza energetica, sostenibilità e scalabilità. Il reattore ha mostrato un'elevata capacità di degradare oltre il 95% di diversi API in meno di 15 minuti, anche a concentrazioni molto elevate (10-50 mg/L), nettamente superiori a quelle rilevate nelle acque superficiali (ng/L - µg/L), operando con flussi superiori ai 200 L/h. Durante i test svolti sulla classe di antibiotici delle tetracicline (TC) [2], condotti su 5 L di soluzione, abbiamo osservato che, a differenza di quanto avviene in molti AOPs, la variazione del pH iniziale della matrice acquosa (range 2-11) non ha influenzato né la velocità né l'efficienza di degradazione - un aspetto cruciale per l'applicazione reale, dove gli effluenti possono avere pH molto diversi. Un altro punto fondamentale riguarda i sottoprodoti di degradazione, che possono risultare addirittura più tossici del principio attivo. Il duo HC/ED plasma ha generato meno prodotti di ossidazione rispetto a quelli descritti in letteratura riguardanti la degradazione delle TC. Ulteriori indagini svolte durante la degradazione dell'acido salicilico (il metabolita dell'aspirina) [3] lo hanno confermato: degradazione contemporanea del farmaco e dei relativi sottoprodoti, con residui di qualche acido organico a corta catena. Anche aumentando il volume di trattamento a 10 L o utilizzando acque di diversa natura (di rete o distillata), il reattore ha mantenuto alte prestazioni, degradando completamente un altro antibiotico, il metronidazolo (MNZ) [4], in soli 10 minuti. Infine, il trattamento di un refluo farmaceutico reale [5] - contenente solventi organici (25,9%), API (10,7%) e tensioattivi (8,8%) con una domanda

chimica di ossigeno (COD) di 485 g/L - ha portato a una riduzione del 56% del COD dopo 10 minuti. Per raggiungere valori compatibili con la reimmissione nelle acque superficiali, è stata integrata una fase di adsorbimento su carboni attivi (AC), già consolidata a livello industriale. Nonostante i consumi energetici del reattore varino tra i 3 e i 18 kW/m<sup>3</sup> (in base alla complessità del refluo), l'efficienza energetica risulta essere molto alta (>400 mg/kWh).

## Conclusioni

Questi risultati hanno permesso lo sviluppo di un reattore HC/ED plasma operante su scala semi-industriale con flussi superiori ai 3000 L/h, con risultati preliminari incoraggianti che confermano un effettivo *scale-up* della tecnologia preservando efficienza e consumi energetici osservati su scala pilota. La tecnologia sta facendo passi concreti verso un'applicazione reale sostenibile, potenzialmente applicabile in flusso continuo grazie alle inferiori concentrazioni di API tipiche delle acque reali rispetto a quelle utilizzate in laboratorio.

## Ringraziamenti

Ringrazio il Gruppo Interdivisionale Green Chemistry - Chimica Sostenibile per il riconoscimento, il mio tutor accademico prof.ssa Emanuela Calcio

Gaudino, il prof. Giancarlo Cravotto e tutto il gruppo di ricerca.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] C.A. Aggelopoulos, *Chem. Eng. J.*, 2022, **428**, 131657.
- [2] F. Verdini, E. Calcio Gaudino *et al.*, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 2023, **62**(45), 19311.
- [3] F. Verdini, N. Desogus *et al.*, *Ultrason. Sonochem.*, 2025, **120**, 107468.
- [4] T.C. Pereira, E.M.M. Flores *et al.*, *Ultrason. Sonochem.*, 2023, **95**, 106388.
- [5] F. Verdini, E. Canova *et al.*, *Envir. Pollut.*, 2024, **342**, 123041.

## Innovative Solutions for Clean Water

Awarded the 2025 “Cinzia Chiappe” PhD Thesis Prize by the Interdivisional Group of Green Chemistry - Sustainable Chemistry, this study illustrates an innovative hybrid process combining hydrodynamic cavitation and cold plasma, capable of rapidly degrading pharmaceutical residues in aqueous matrices at pilot scale, offering a green and potentially scalable solution for industrial application.

# Chemistry Europe Fact Sheet

16 chemical societies, 15 European countries.

Family of high-quality scholarly chemistry journals, covering a very broad range of disciplines.

Societies:  
[www.chemistryviews.org/chemistry-europe-member-societies/](http://www.chemistryviews.org/chemistry-europe-member-societies/)

Association

Evaluate, publish, disseminate, and amplify the scientific excellence of chemistry researchers from around the globe in high-quality publications.

Hub:  
[www.chemistry-europe.org](http://www.chemistry-europe.org)

Newsletter

3 per year, free

Mission

*ChemistryViews*

[www.chemistryviews.org/register/](http://www.chemistryviews.org/register/)

Science news magazine

[www.chemistryviews.org](http://www.chemistryviews.org)

Fellows Program

Recognizes members for their outstanding achievements.

[www.chemistryviews.org/fellows/](http://www.chemistryviews.org/fellows/)

Award

Recognizes outstanding contributions to chemistry.

[www.chemistryviews.org/chemistryeuropeaward/](http://www.chemistryviews.org/chemistryeuropeaward/)

Hub:  
[www.chemistry-europe.org](http://www.chemistry-europe.org)

X  
@ChemEurope

in  
[linkedin.com/company/chemeurope/](https://linkedin.com/company/chemeurope/)



# SIAMO LA SCIENZA DEL CAMBIAMENTO

## SCOPRI PERCHÈ UNIRTI ALLA SCI

### VOCE UNICA

Rappresentiamo e valorizziamo ogni singolo membro della comunità chimica

### NETWORKING

Organizziamo attività congressuali ricche di opportunità e relazioni

### FORMAZIONE

Progettiamo attività di formazione per docenti, insegnanti, ricercatori e professionisti

### OPPORTUNITÀ

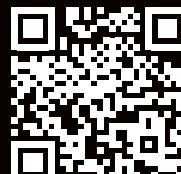
Agevoliamo la ricerca con borse di studio, progetti e promuoviamo programmi didattici

### PUBBLICAZIONI

Valorizziamo l'eccellenza nella ricerca e la comunicazione della nostra scienza in Italia, in Europa e nel mondo

### NUOVE GENERAZIONI

Ogni anno ideiamo iniziative per appassionare gli studenti alla bellezza e all'importanza della Chimica



ASSOCIATI SUBITO

Iscrizione a costo agevolato per studenti universitari