

# Studio del comportamento dell'ozono per l'applicazione in motori ad accensione per compressione alimentati a benzina

Genova, 28 ottobre 2016

Stefano Macrì

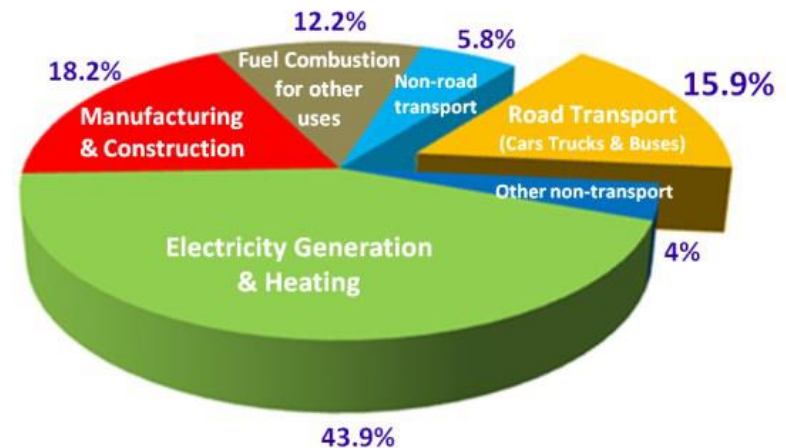
**Relatori:** Chiar.mo Prof. A. Bottaro, Università degli Studi di Genova

Chiar.mo Prof. F. Foucher, École Polytechnique de l'Université d'Orléans

**Correlatore:** Ing. Pietro Matteo Pinazzi, École Polytechnique de l'Université d'Orléans

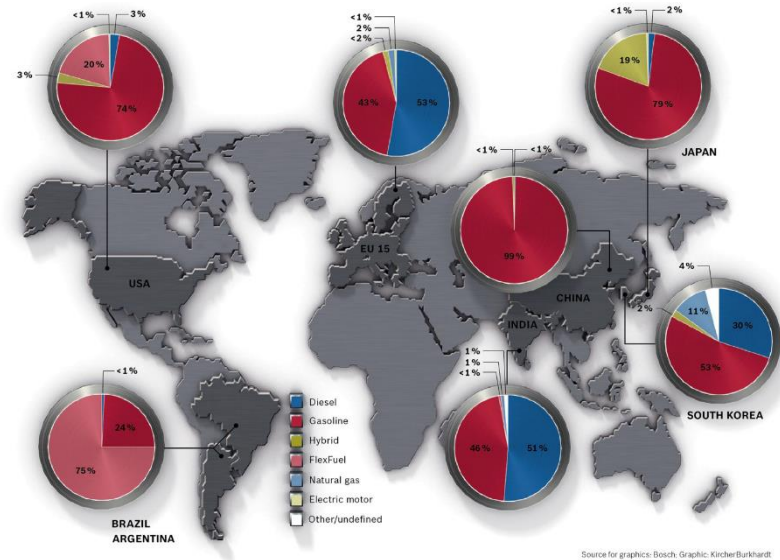
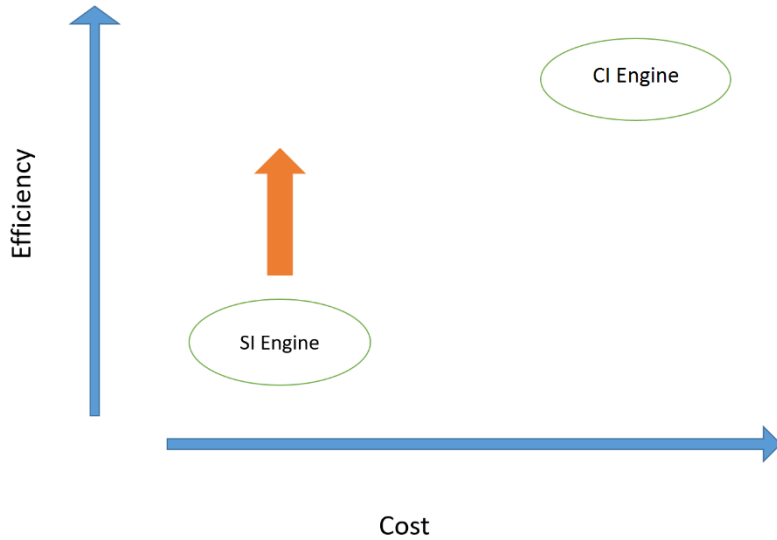
**Co-tesista:** Andrea Canevello

- ✓ **Riduzione emissioni CO<sub>2</sub> nei trasporti**
  - Riduzione masse
  - Aerodinamica
  - Resistenza al rotolamento pneumatici
  - Gestione dei flussi termici
  - **Efficienza motori**



*Produzione CO<sub>2</sub> (\*)*

(\*) OICA



## ✓ Motore ad accensione per compressione

- Alta efficienza a fronte di costo elevato
- Minore impiego globale del gasolio rispetto alla benzina per alimentazione autoveicoli

## ✓ **Obbiettivi**

- Analisi potenzialità motore GCI (Gasoline Compression Ignition)
- Studio del comportamento dell'ozono in ambiente motore
- Applicazione dell'ozono al motore GCI

## ✓ Setup sperimentale

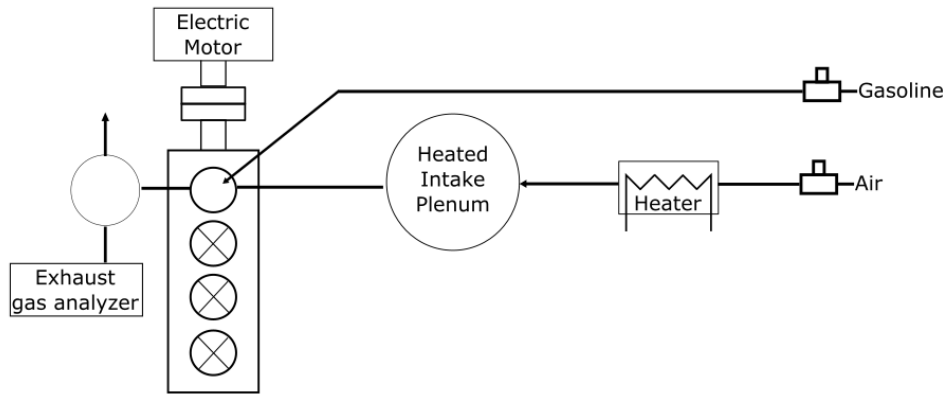
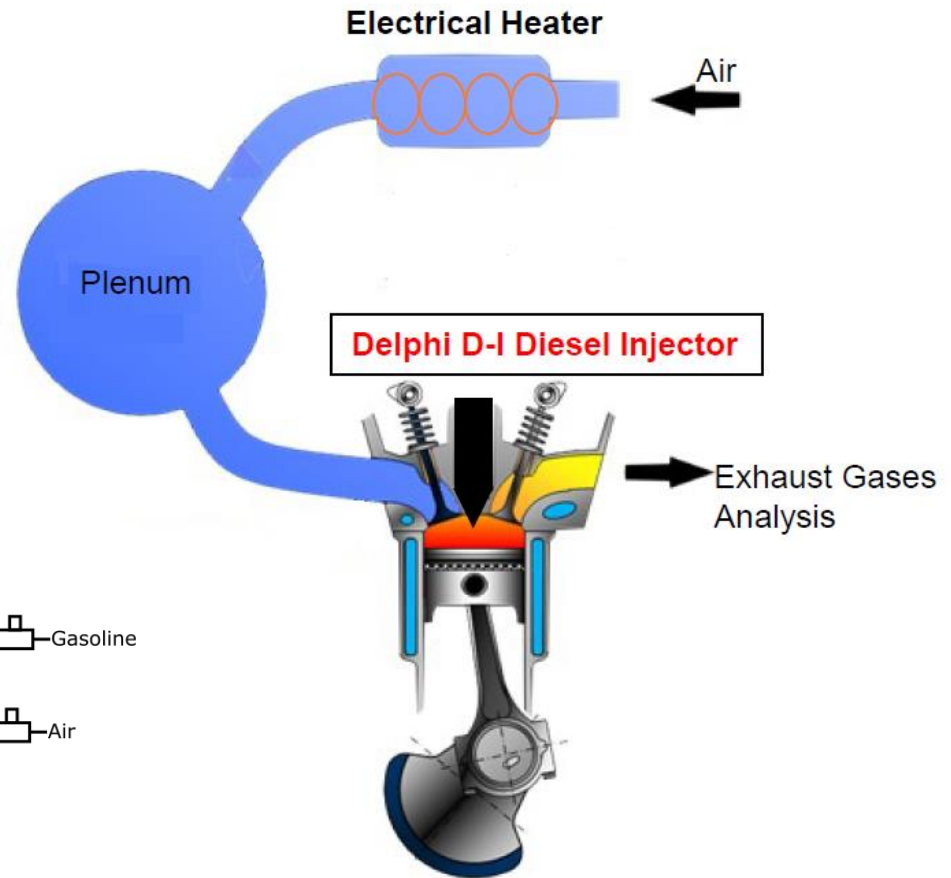
- Motore Peugeot DW 10-series in configurazione monocilindrica aspirata
- Iniezione diretta tramite iniettore Delphi con Angolo di Ombrello di 120°C



Alesaggio	85 mm
Corsa	88 mm
Lunghezza biella	145 mm
Cilindrata	499 cm <sup>3</sup>
Rapporto di compressione	16:1

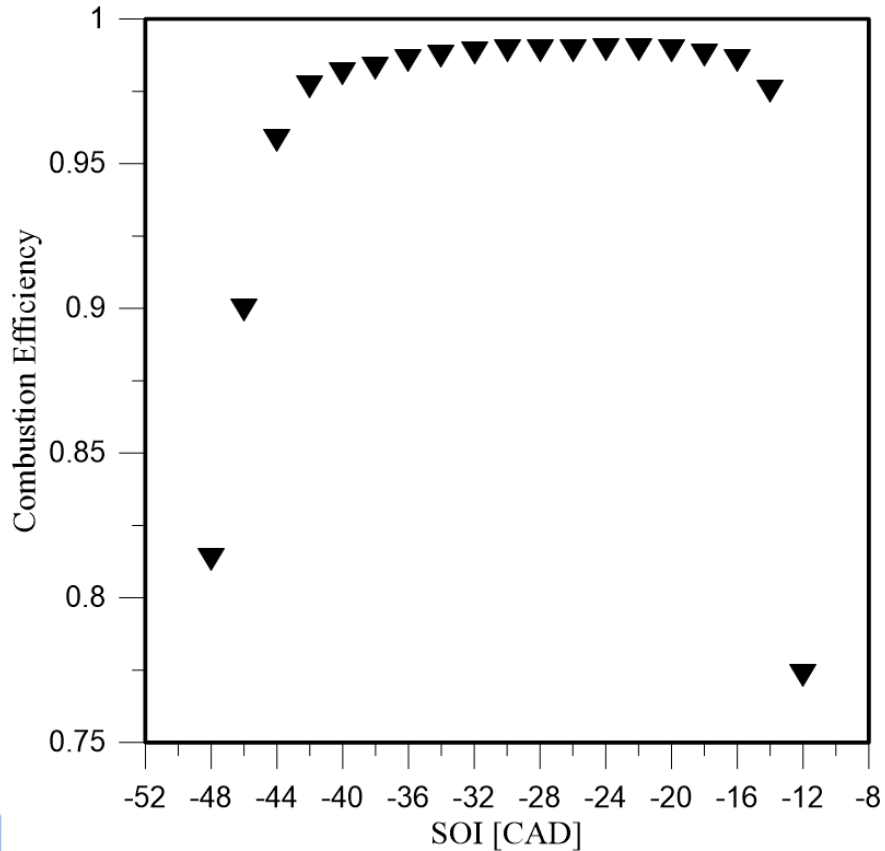
## ✓ Condizioni operative

- Regime = 1500 rpm
- P ammissione = 1 bar
- **T ammissione  $\approx 205^{\circ}\text{C}$  !!!**
- Massa combustibile  $\approx 0.34$  kg/h

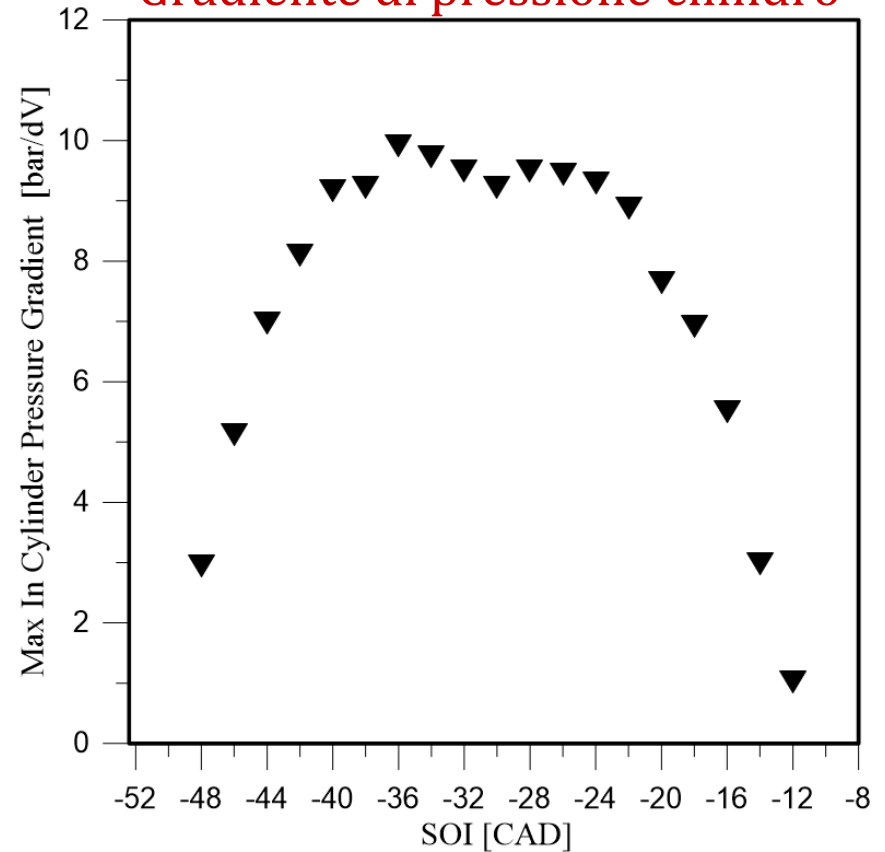


✓ Singola iniezione

Efficienza di combustione



Gradiente di pressione cilindro



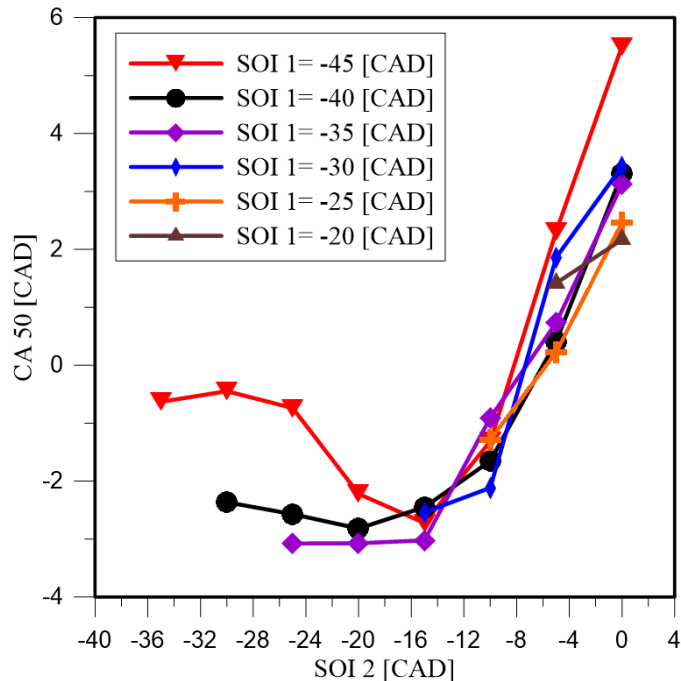


## ✓ Doppia Iniezione

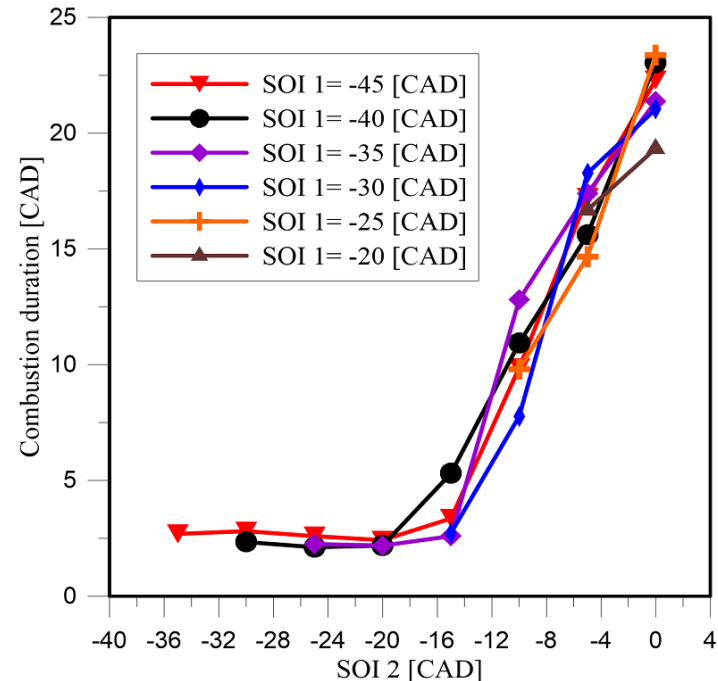
- Equa ripartizione del combustibile tra le due iniezioni
- Studio effetto istante della seconda iniezione su vari SOI 1

		SOI2 [CAD]							
		-35	-30	-25	-20	-15	-10	-5	0
SOI1 [CAD]	-45	•	•	•	•	•	•	•	•
	-40		•	•	•	•	•	•	•
	-35			•	•	•	•	•	•
	-30				•	•	•	•	•
					-25	•	•	•	•
						-20	•	•	•

### CA50

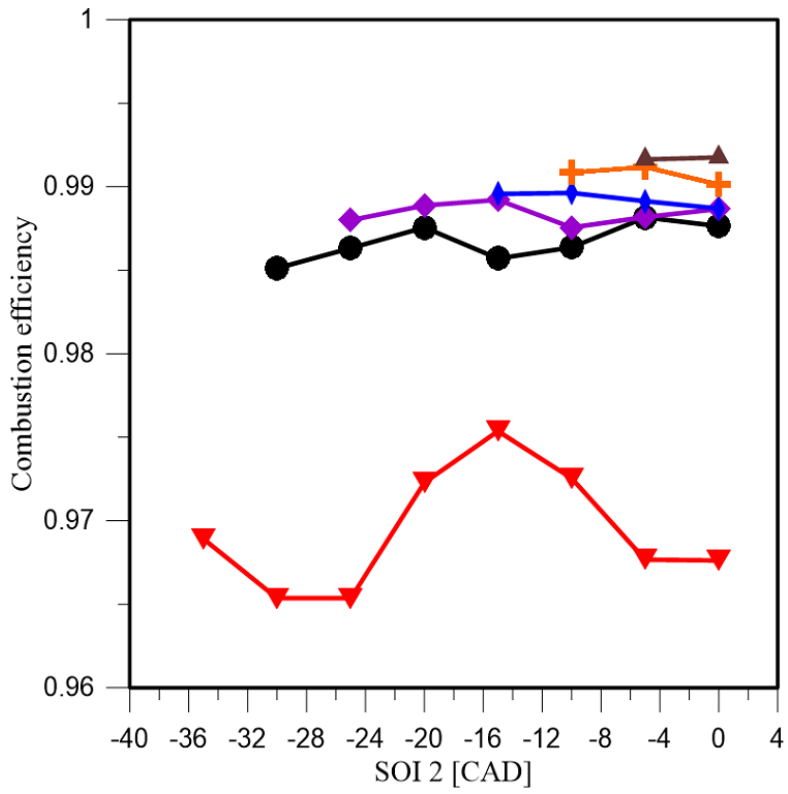


### Durata combustione

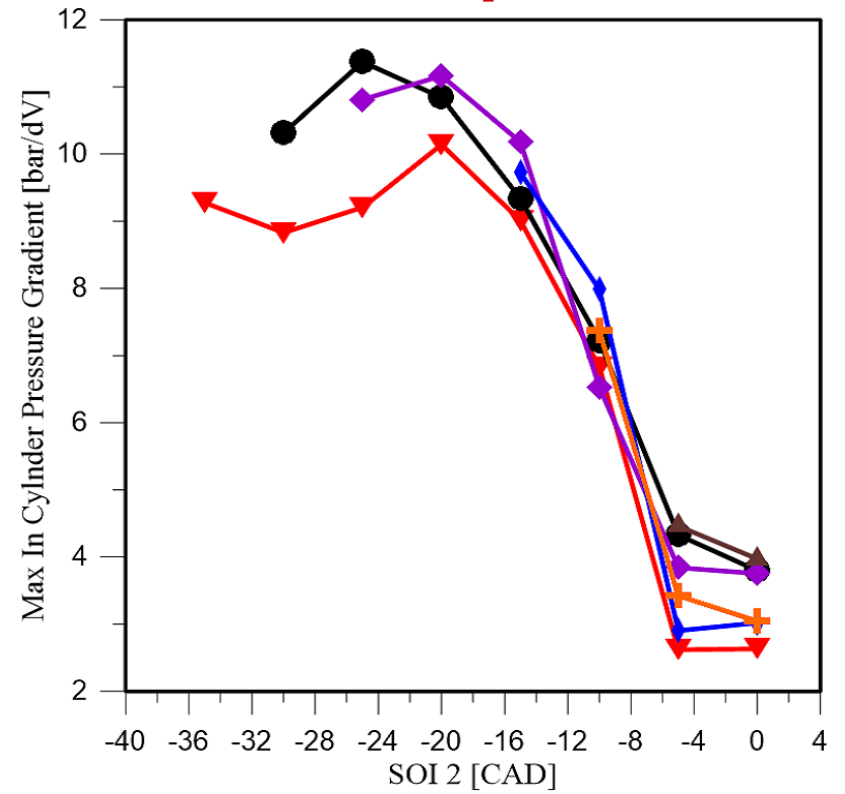




## Efficienza di combustione



## Gradiente di pressione

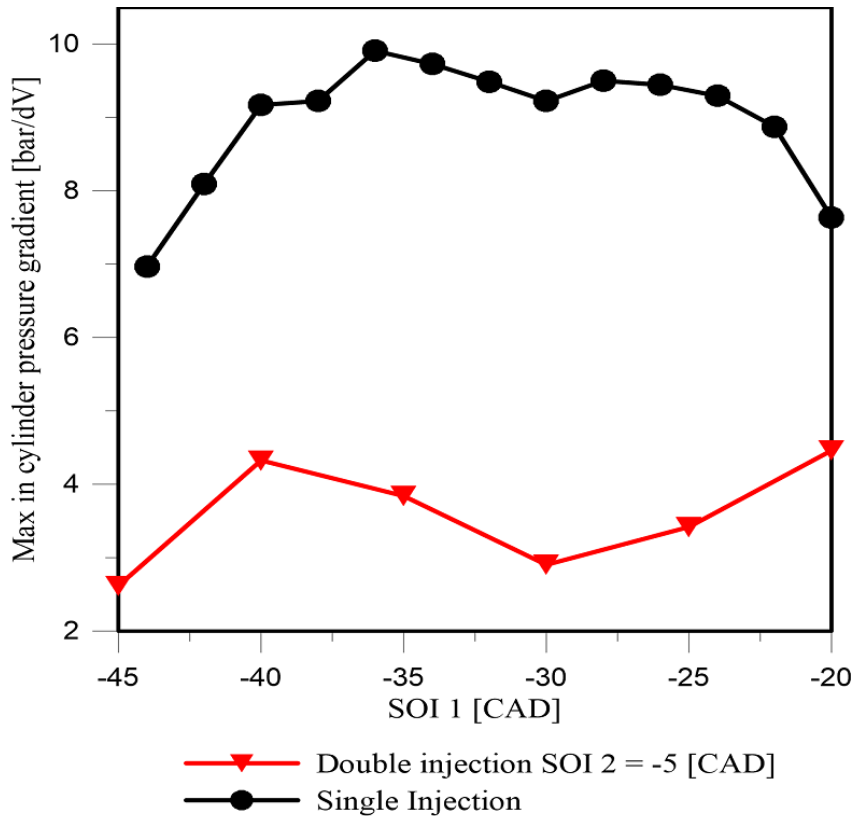


- ▼ SOI 1= -45 [CAD]
- ◆ SOI 1= -30 [CAD]
- SOI 1= -40 [CAD]
- + SOI 1= -25 [CAD]
- ◆ SOI 1= -35 [CAD]
- ▲ SOI 1= -20 [CAD]

## ✓ Singola iniezione vs doppia iniezione

- SOI 1 variabile, SOI 2 = -5 CAD

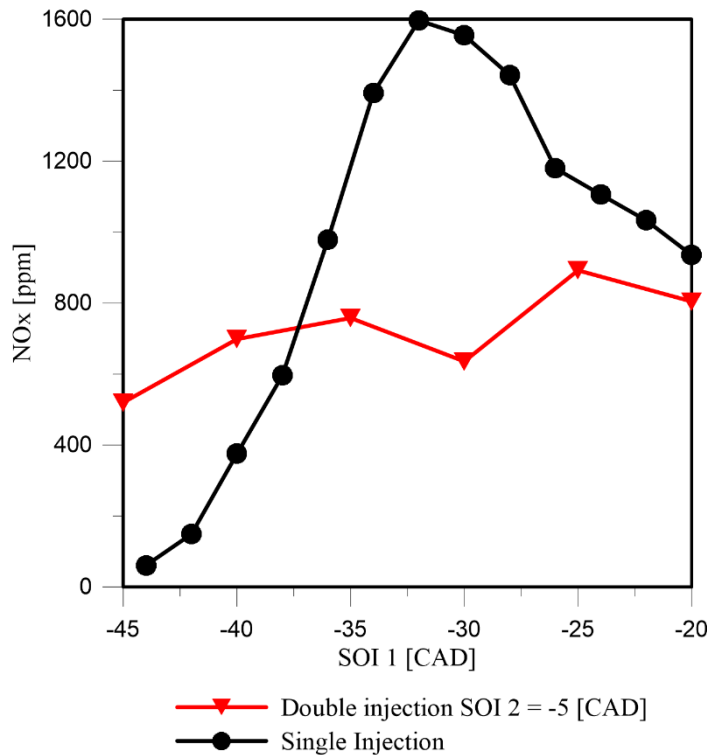
### Gradiente di pressione



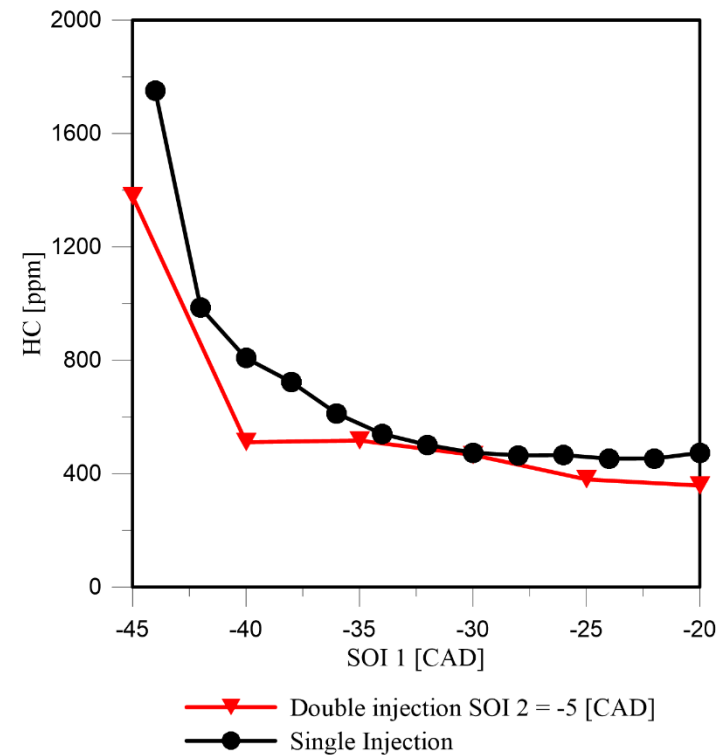
## ✓ Effetti doppia iniezione

- Sensibile diminuzione delle sollecitazioni meccaniche
- Diminuzione rumore

## Emissioni NO<sub>x</sub>



## Emissioni HC



### ✓ Effetti doppia iniezione

- Minor temperatura locale → Riduzione emissioni NO<sub>x</sub>
- Emissioni HC comparabili

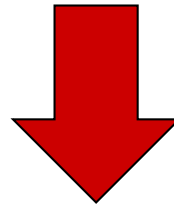
## Motore GCI

### ✓ **Punti di forza**

- Alta efficienza
- Basse emissioni
- Sostenibilità economica

### ✓ **Limitazioni**

- Bassa propensione all'auto-accensione del combustibile
- Scarsa governabilità del fenomeno di combustione



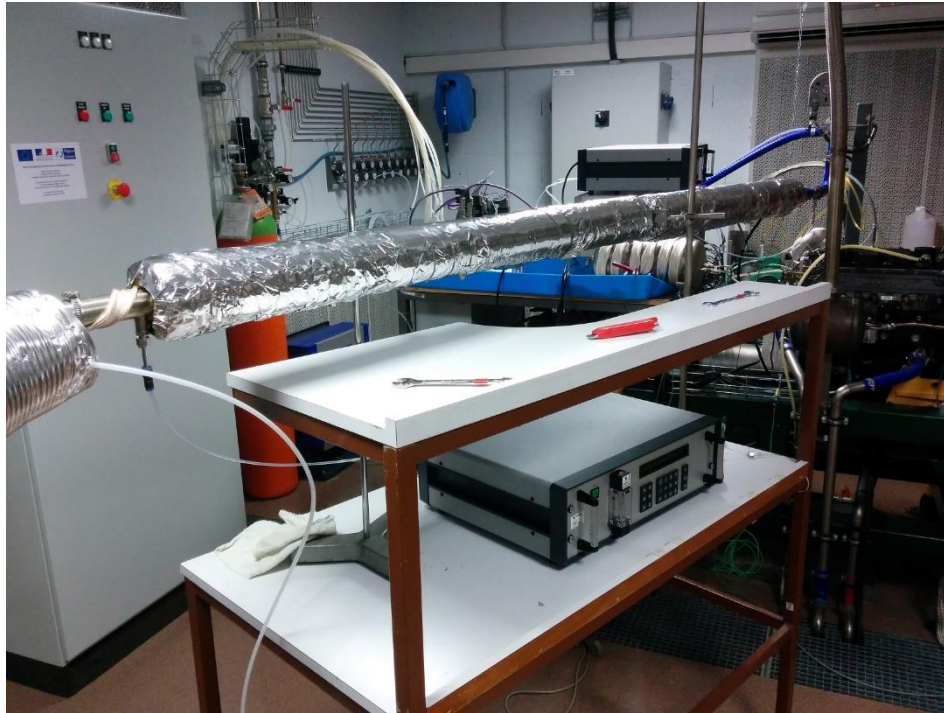
## Motore GCI + Ozono

## ✓ Perché l'ozono ( $O_3$ )?

- Agente fortemente ossidante → promotore della combustione
- Possibilità di produzione in loco
- Minor impatto economico rispetto ad altre soluzioni
- Compatibilità tecnologica con i layout motoristici attualmente in uso

## ✓ Setup sperimentale

- Ottimizzazione sistema di iniezione ozono
- Sviluppo coibentazione
- Predisposizione per studio delle interazioni con altre specie chimiche → Monossido di azoto (NO)

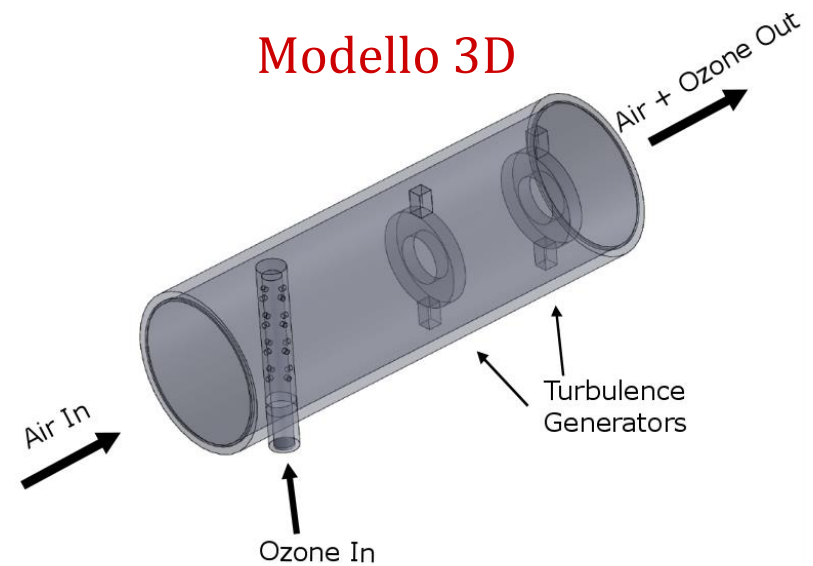


- ✓ **Setup sperimentale**
  - Generatore industriale Anseros COM-AD 01
  - Analizzatore di ozono Anseros MP-6060.
  - Sezione di prova coibentata

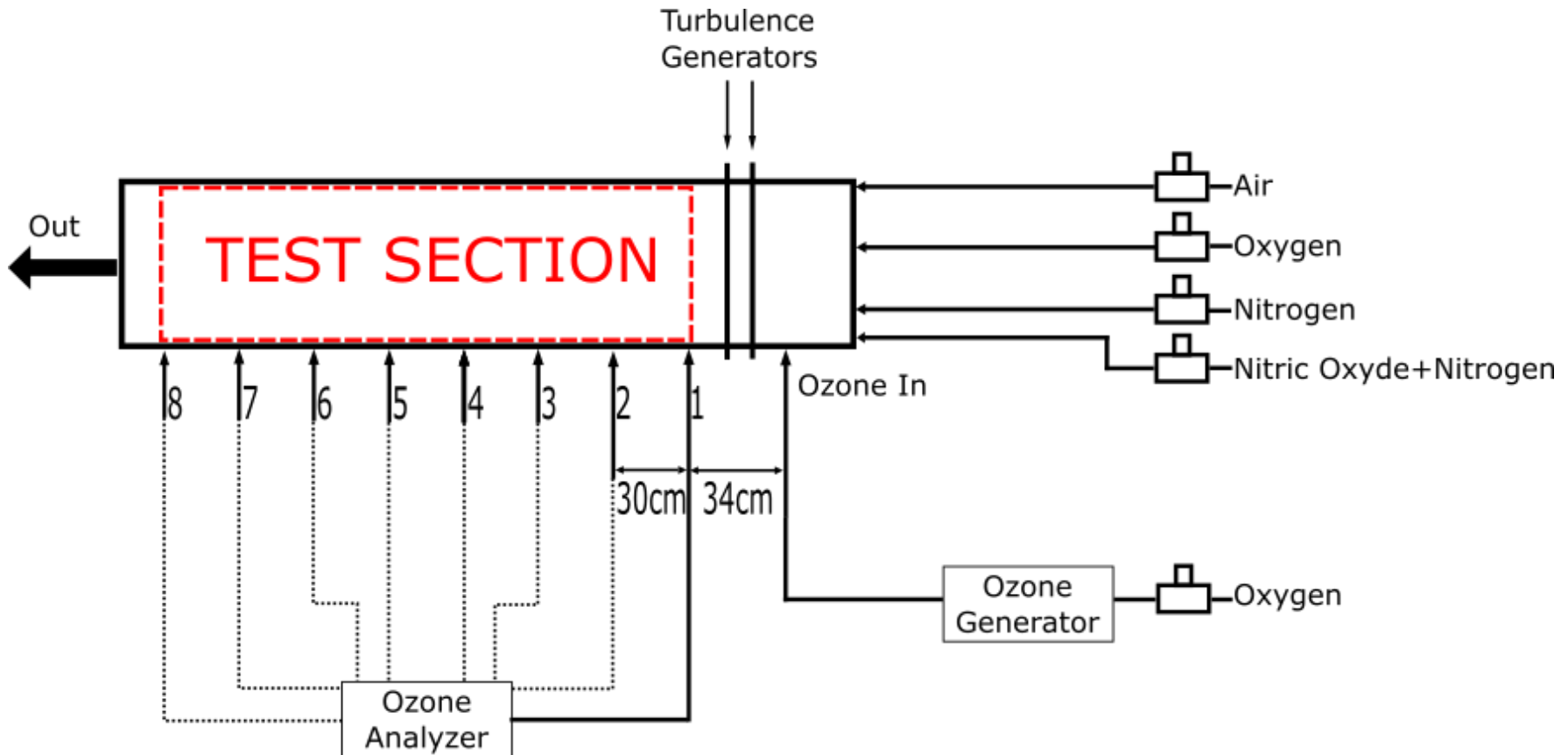




## ✓ Iniettore ozono



# ✓ Schema setup sperimentale



## ✓ Esperimenti su decomposizione ozono ed interazione $O_3$ -NO:

### ➤ Decomposizione ozono:

- $O_3 + N_2 \rightarrow O_2 + O + N_2$
- $O_3 + O_2 \rightarrow O_2 + O + O_2$
- $O_3 + M \rightarrow O + O_2 + M$

### ➤ Interazione $O_3$ -NO:

- $O_3 + NO \rightarrow O_2 + NO_2$

### ➤ $O_3 = 190\text{ppm}$

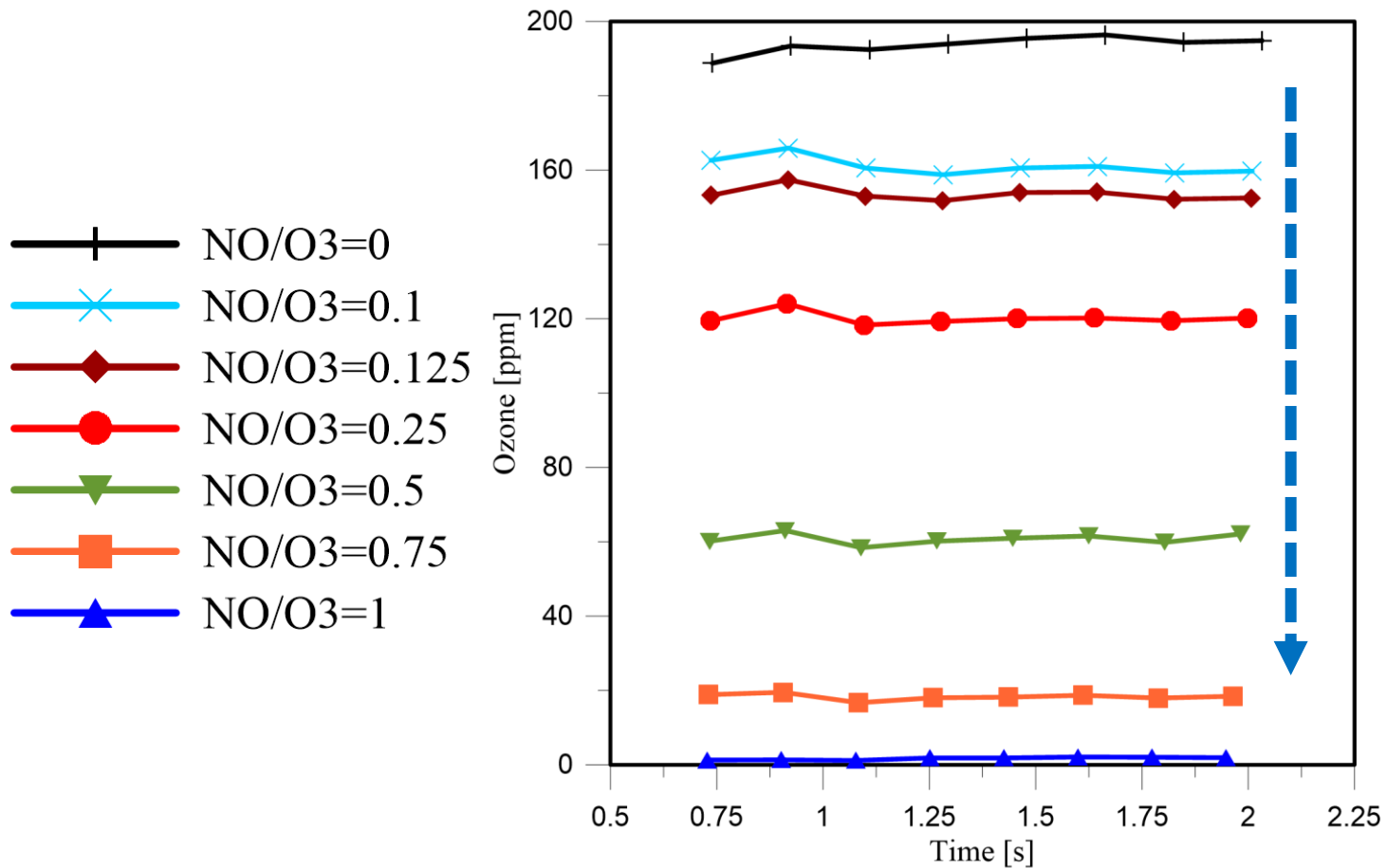
### ➤ Influenza del monossido di azoto

- $NO = 0 - 190\text{ppm} \rightarrow$  Sette rapporti  $NO / O_3$

### ➤ Influenza della temperatura

- $T = 20 - 200\text{ °C}$

✓ **Influenza dell'interazione con monossido d'azoto**

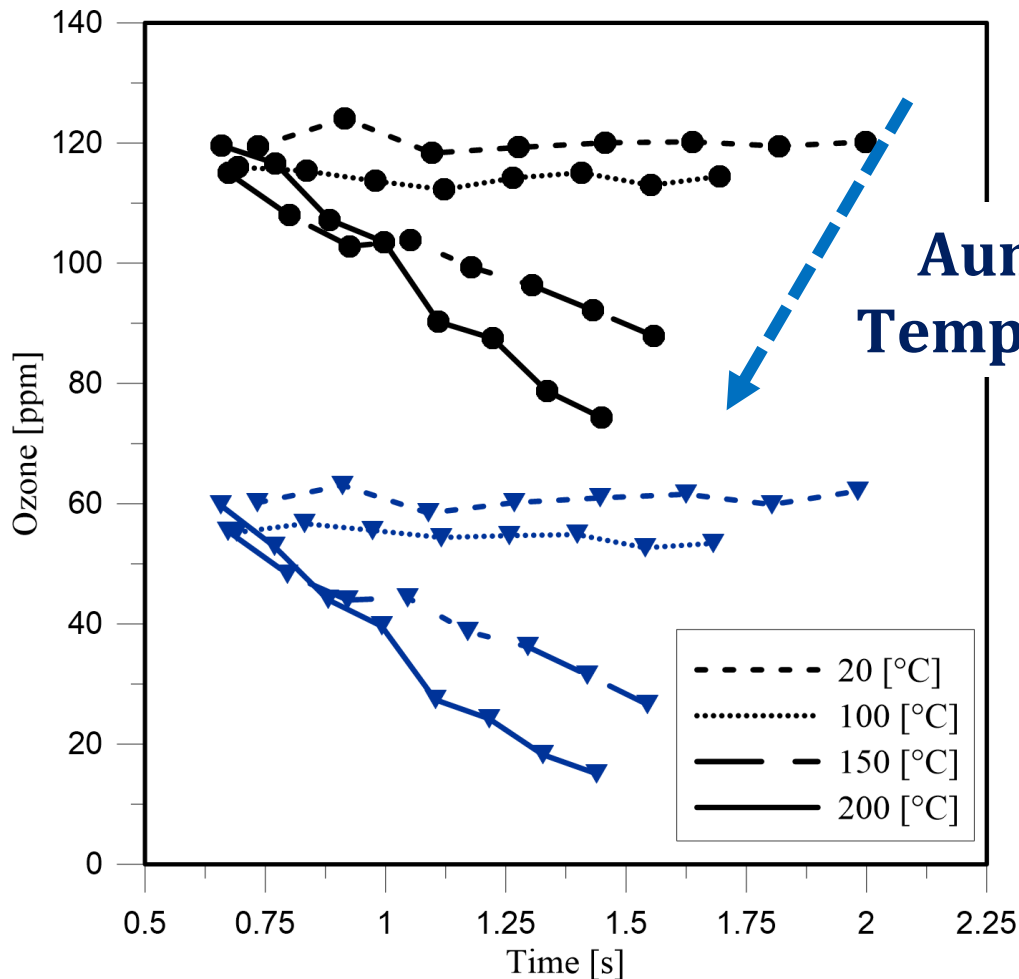


**Rapporto  
NO/ O<sub>3</sub>**

➤ Reazione istantanea, non rilevabile con il presente setup.

## ✓ Influenza della temperatura

➤  $\text{NO} / \text{O}_3 = 0,5$  e  $0,25$



**Aumento  
Temperatura**

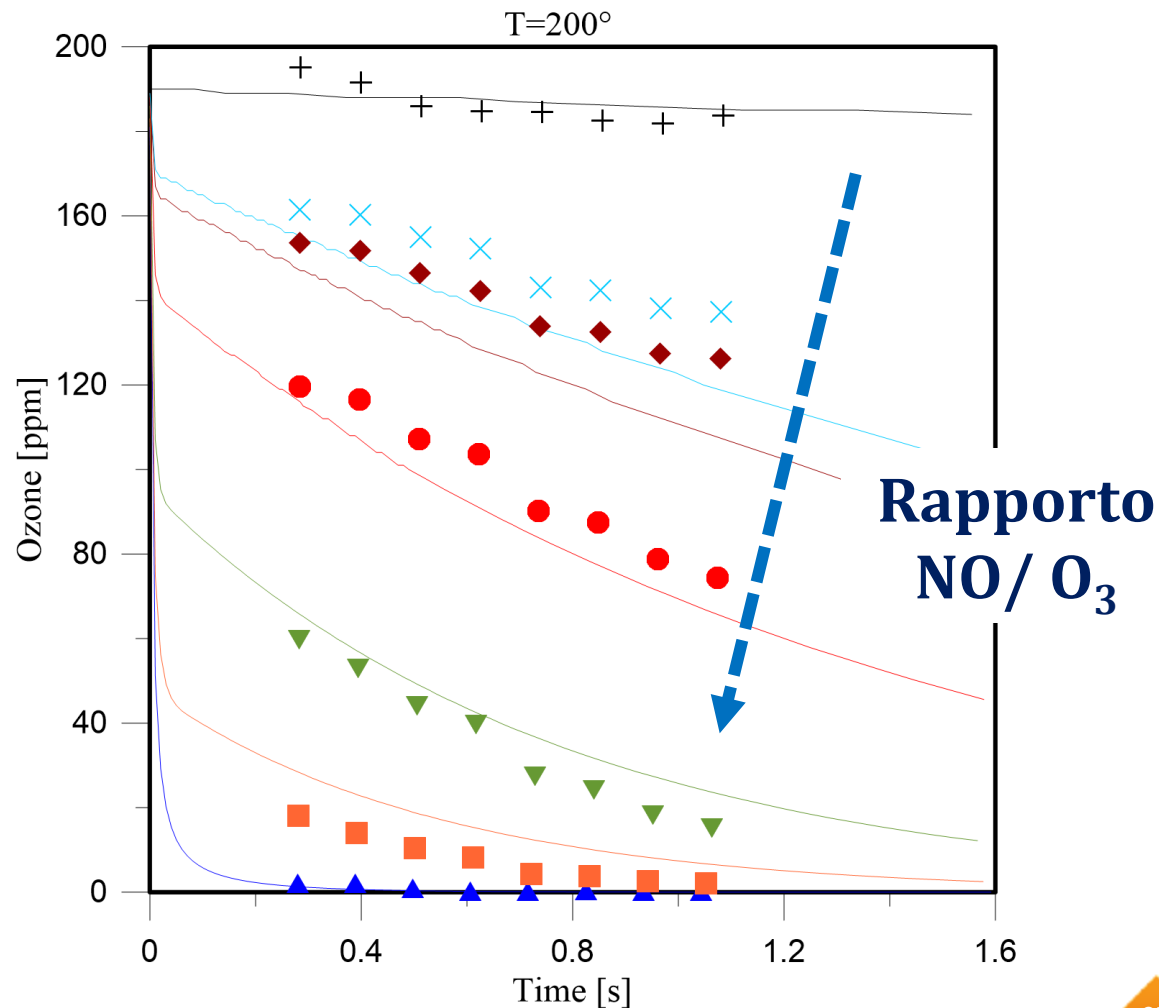
Decomposizione  $\text{O}_3$   
per  $T > 150 \text{ } ^\circ\text{C}$



Non avviene nel  
condotto di  
aspirazione

## ✓ Simulazioni vs Dati sperimentali

- $T=200^{\circ}\text{C}$
- Software SENKIN
- $\text{NO}/\text{O}_3 = 0 \rightarrow 1$
- Coerenza tra simulazioni ed esperimenti



## Applicazione ozono al motore GCI

### ✓ Bassi carichi

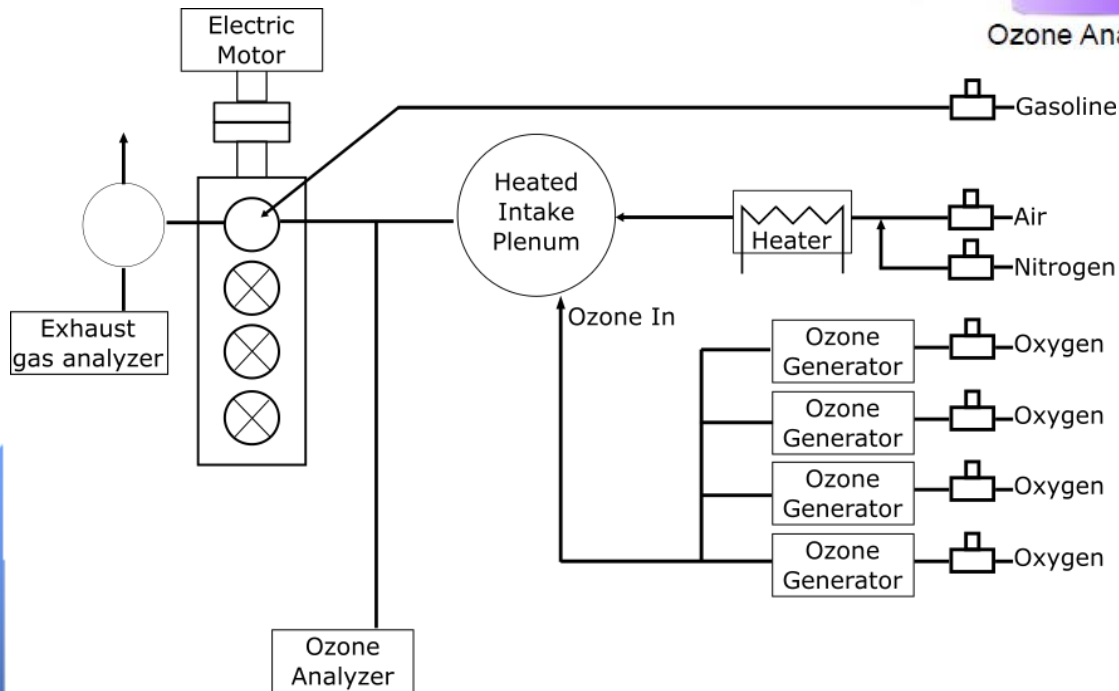
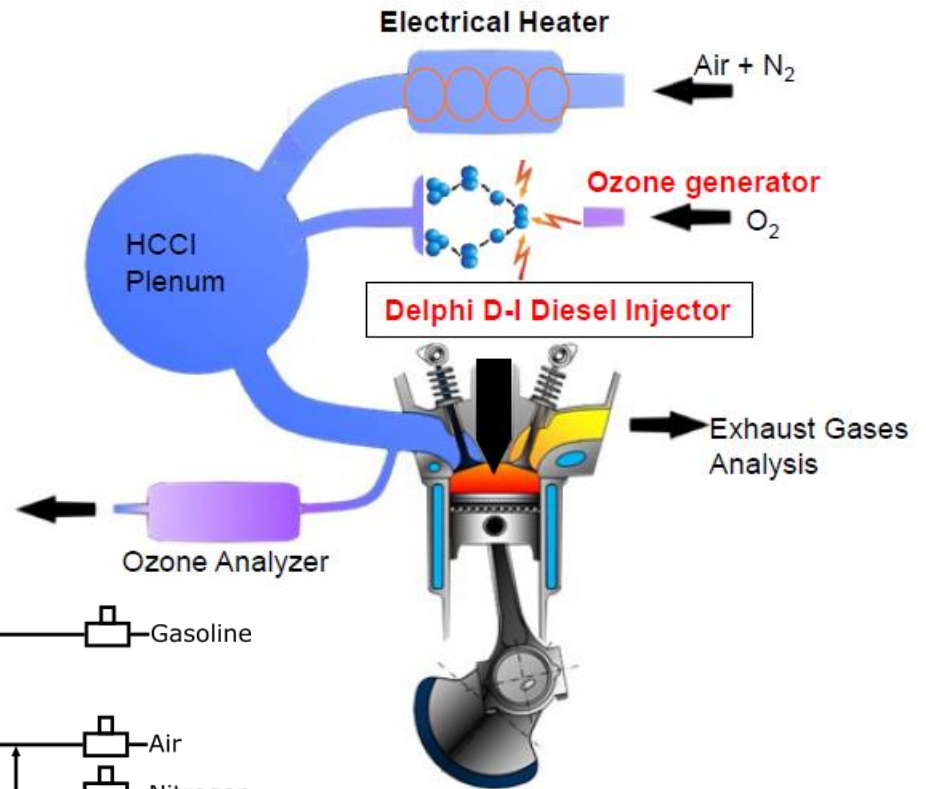
- 1500 rpm
- P ammissione = 1bar
- T ammissione variabile
- Quantità ozono variabile
- CA50 = 6 CAD
- Combustibile  $\approx 0.5$  kg/h
- Doppia iniezione

### ✓ Autosostentamento

- 800 rpm
- P ammissione = 1bar
- T ammissione = 40 °C
- Quantità ozono variabile
- Combustibile  $\approx 0.18$  kg/h
- Singola Iniezione

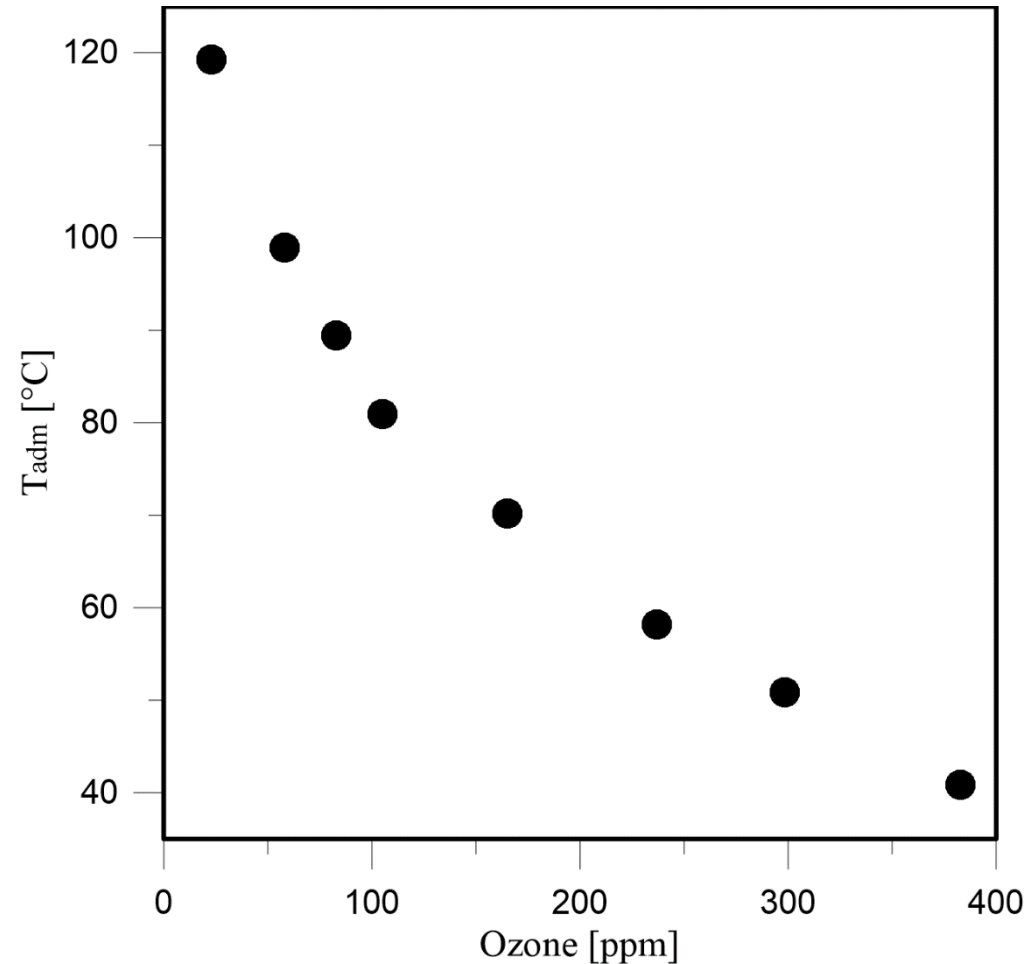


## ✓ Setup sperimentale



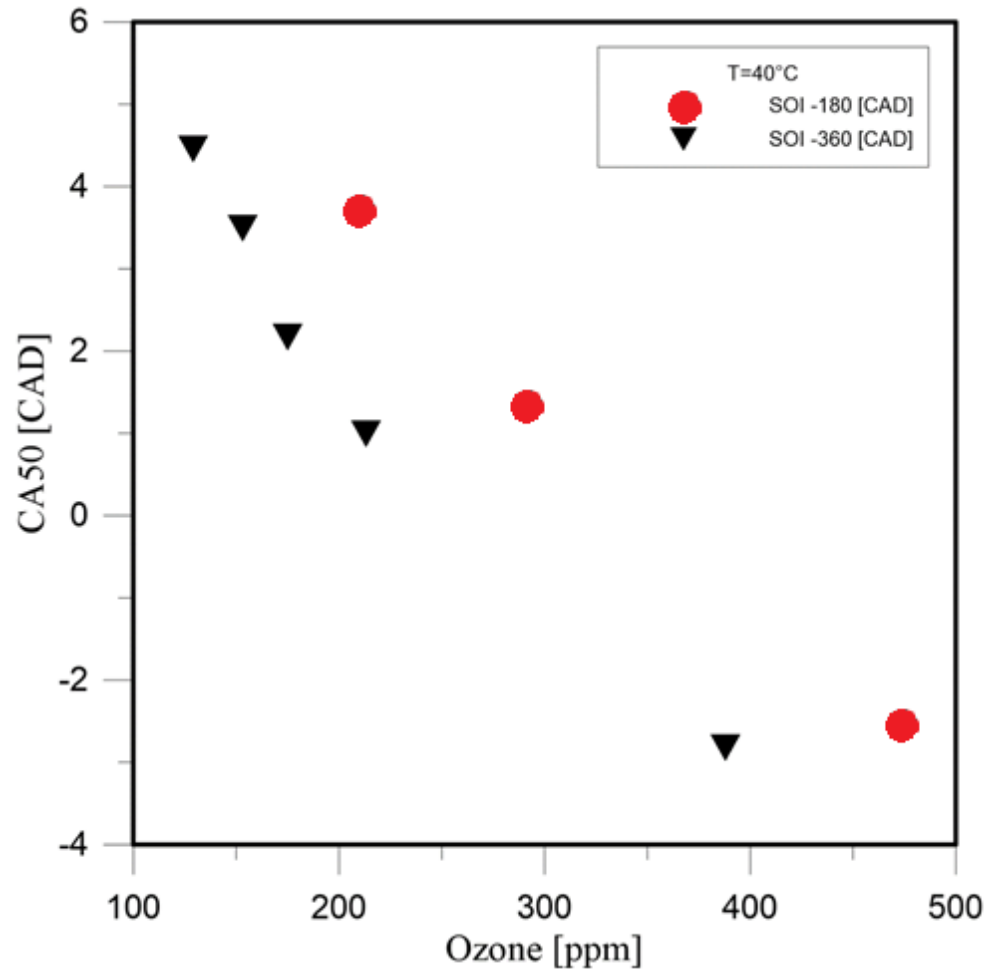
## ✓ Bassi carichi

- CA50=6 CAD
- Marcata influenza dell'ozono sulla temperatura di ammissione
- Massa di combustibile equamente ripartita tra SOI 1 = - 180 CAD e SOI 2 = - 5 CAD BTDC



## ✓ Autosostentamento

- Effetto ozono sulla fasatura della combustione
- Due strategie a singola iniezione
  - SOI= -360 BTDC
  - **SOI= -180 BTDC**



## ✓ Motore GCI

### ➤ Punti di forza

- Alta efficienza
- Basse emissioni
- Sostenibilità economica

### ➤ Limitazioni

- Bassa propensione all'auto-accensione del combustibile
- Scarsa governabilità del fenomeno di combustione

- ✓ **Analisi comportamento ozono in condizioni motore.**
  - Decomposizione dell'ozono con  $T > 150^{\circ}\text{C}$  → Radicali O liberi nella camera di combustione.
  - Nessuna decomposizione nel condotto di aspirazione
  
- ✓ **Interazione tra ozono e monossido di azoto**
  - Reazione estremamente rapida
  - Avviene nel cilindro con IGR e nel condotto di aspirazione con EGR
  - **EGR/IGR potrebbero diminuire l'effetto dell'ozono!**
  
- ✓ **Caratterizzazione di un generatore di ozono prototipale**
  - Work in progress.

## ✓ **Applicazione ozono al motore GCI**

### ➤ Soluzione efficace per:

- Ridurre la temperatura di ammissione
- Controllo della fasatura di combustione

### ➤ Criticità:

- Interazione dell'ozono con le specie presenti nell'EGR
- Produzione dell'ozono a bordo del veicolo

# Grazie per l'attenzione



# Ulteriori analisi

## ✓ Analysis of ozone behavior at engine intake conditions

- $O_3 + N_2 \rightarrow O_2 + O + N_2$ .
- $O_3 + O_2 \rightarrow O_2 + O + O_2$ .
- $O_3 + M \rightarrow O + O_2 + M$ .

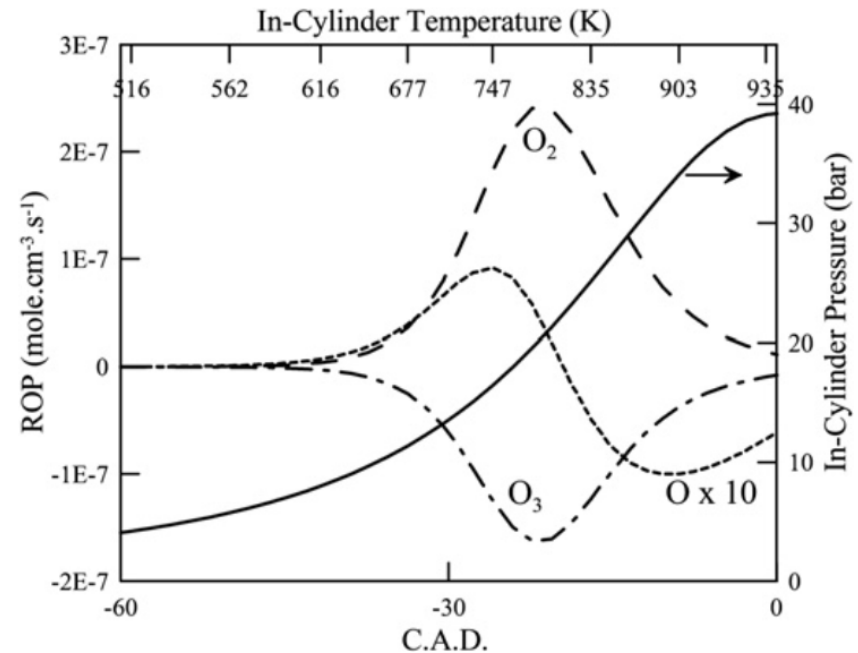
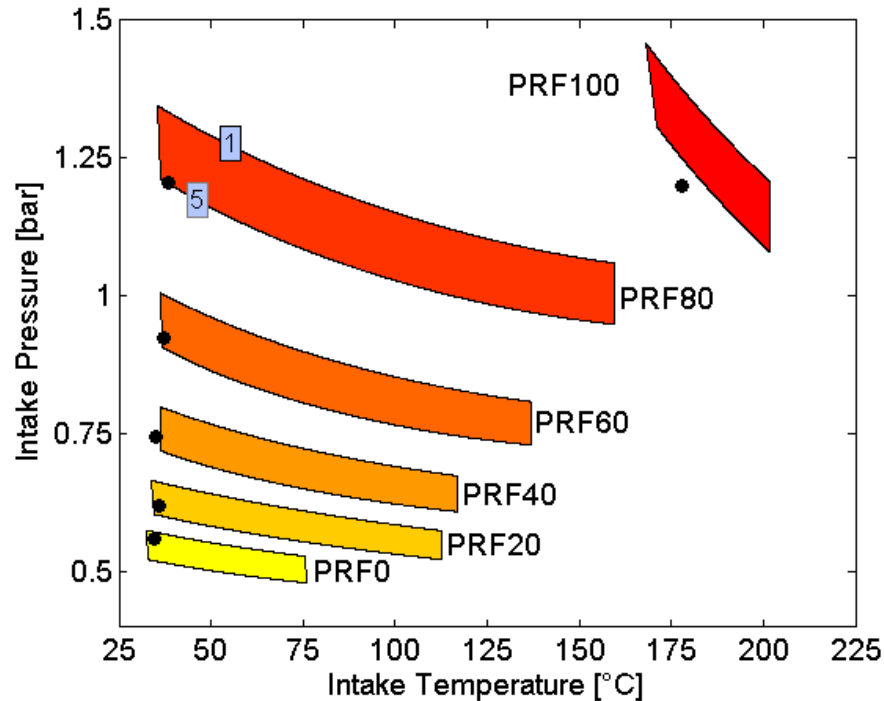
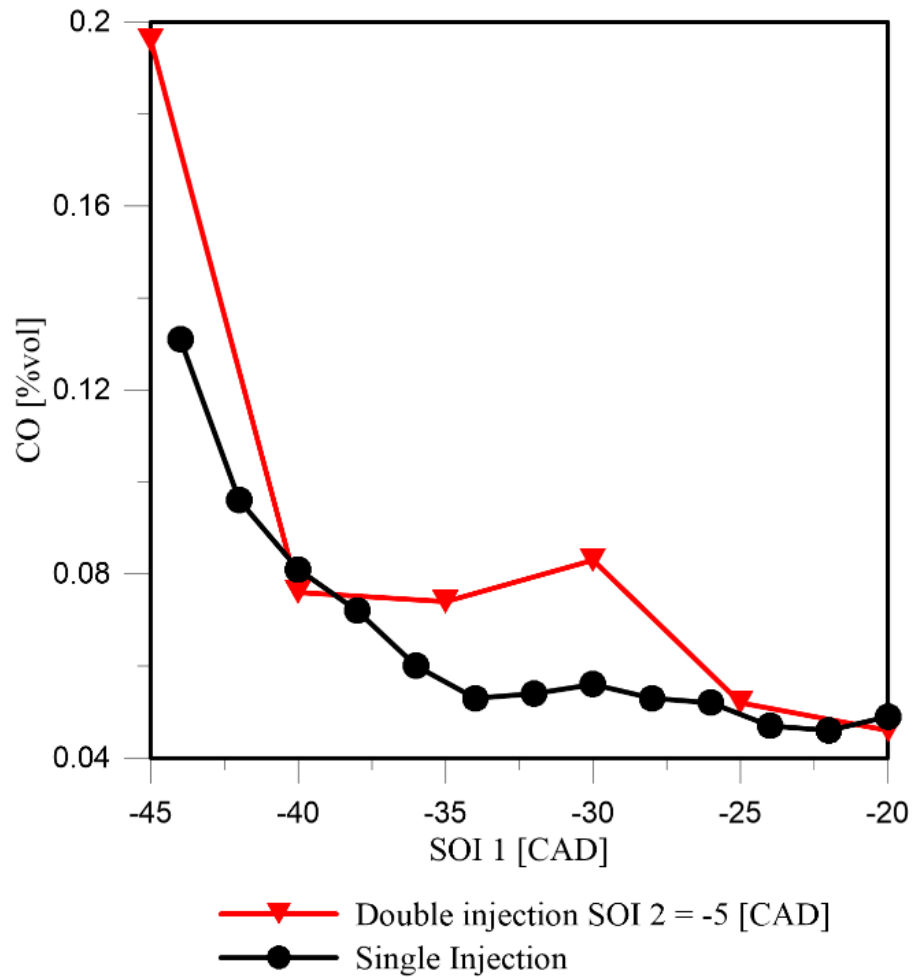


Fig. 4. Rate of product of O<sub>3</sub>, O and O<sub>2</sub>\*species (left axis) and in-cylinder pressure (right axis) as function of CAD. In-cylinder gas temperature is represented at the top axis for 10 ppm of ozone concentration.

(\*) F. Foucher, P. Higelin, C. Mounam-Rousselle, and P. Dagaut. Influence of ozone on the combustion of n-heptane in a HCCI engine. Proceedings of the Combustion Institute, 34(2):3005-3012, jan 2013.



*Optimal combustion areas for each PRFs selected as a function of the intake pressure and the intake temperature of the engine for an equivalence ratio of 0.3 and a rotation speed of 1500 rpm. 1 and 5 correspond to the iso-CA50 limits. Black points correspond to the conditions selected to examine the effect of ozone*



## ✓ Prototypal generator characteristics

- Fedded with air in place of pure oxigen.
- High voltage power supply, variable from 10 to 15 kV.
- Frequency of discharge ranging from 50 to 350 Hz.



## ✓ Future challenges

- Variable production due to air humidity → Humidity sensor installed and test with synthetic air.
- Interaction with other species during the production of O<sub>3</sub>.
- Experiments with highly humid air.

✓ **Still a work in progress due to failure in the alimentation unit.**