

Università degli Studi di Padova – Dipartimento di Ingegneria Industriale
Corso di Laurea in Ingegneria Aerospaziale

***Relazione per la prova finale
«Controllo attivo dello strato limite»***

Tutor universitario: Prof. Picano Francesco

Laureando: *Michelin Attilio*

Padova, 15/07/2026

- Ricavare le ***equazioni per descrivere*** lo strato limite
- Descrivere il fenomeno del ***distaccamento*** dello strato limite
- Presentare i principali metodi di ***controllo attivo*** dello strato limite
- ***Sviluppi futuri***

$$\delta = \sqrt{\frac{L_{\infty} \omega}{U_{\infty}}} \longrightarrow \frac{\delta}{L_{\infty}} = \frac{1}{\sqrt{Re}} \longrightarrow \frac{\partial P'}{\partial y'} = 0$$

Stima dimensionale dello spessore dello strato limite

Stima adimensionale dello spessore dello strato limite

Variazione di pressione in direzione trasversale allo strato limite

Si giunge infine:

$$\left\{ \frac{\partial u'}{\partial x'} + \frac{\partial v'}{\partial y'} = 0 \right\}, \left\{ u' \frac{\partial u'}{\partial x'} + v' \frac{\partial u'}{\partial y'} = \frac{-dP_{e,0}^x}{dx} + \frac{\partial^2 u'}{\partial y'^2} \right\}, \left(\frac{\partial P'}{\partial y'} = 0 \right)$$

Equazioni di strato limite

Influenza del gradiente di pressione

Applicando le **equazioni di strato limite** sulla **parete del corpo**, con le opportune **condizioni al contorno**



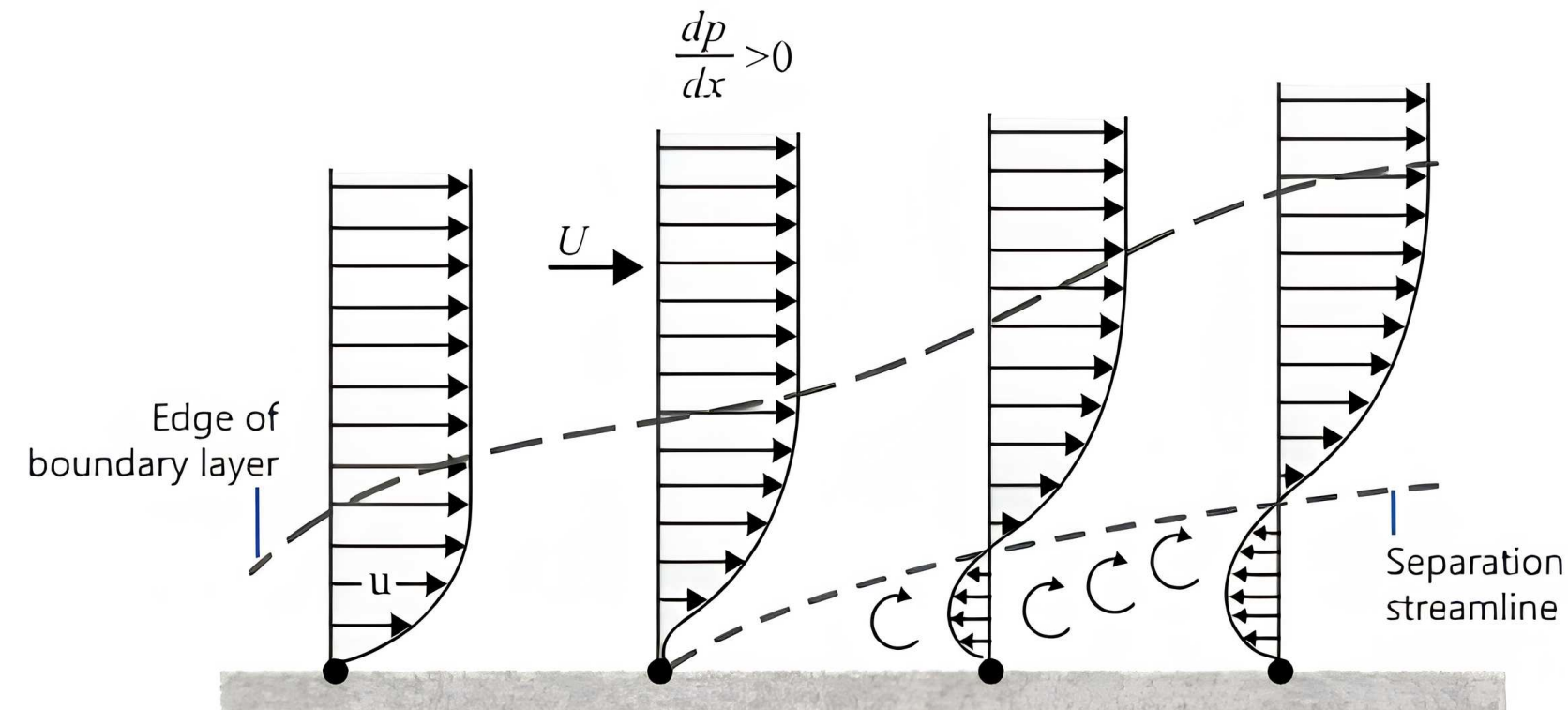
$$\frac{d P_{e,0}^x}{d x^x} = \frac{\partial^2 u'}{\partial y'^2}$$

Condizione necessaria al distaccamento dello strato limite

Distaccamento avviene in presenza di **gradiente di pressione avverso**



$$\frac{d P_{e,0}^x}{d x^x} \gg 0 \quad e \quad \frac{\partial^2 u'}{\partial y'^2} \gg 0$$



Cosa si intende con controllo dello strato limite ?

Metodi che consentano di:

- ***ridurre lo spessore*** dello strato limite
- ***ritardare*** oppure ***favorire*** la ***transizione da regime laminare a regime turbolento***
- ***ritardare*** la ***separazione dello strato limite*** in modo da ridurre differenze di pressione tra monte e valle del profilo

In che modo è operato tale controllo ?

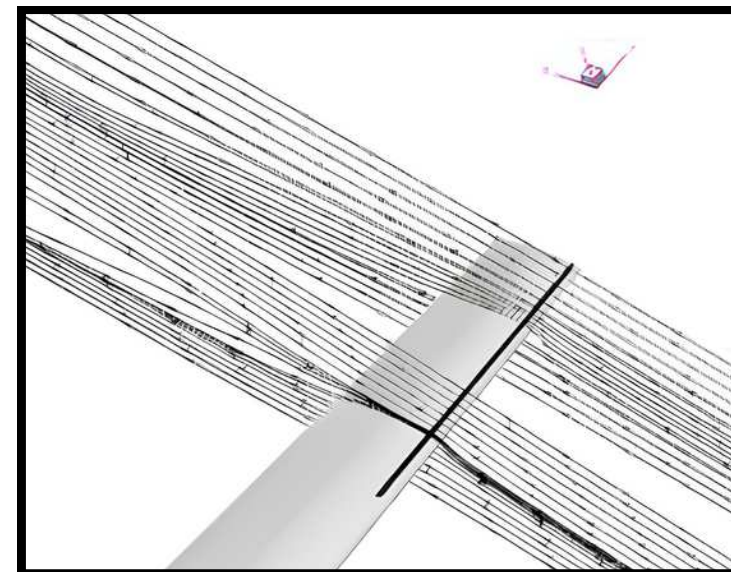
3 Modalità

Controllo *passivo*



Body aerodinamico

Controllo *semi-attivo*

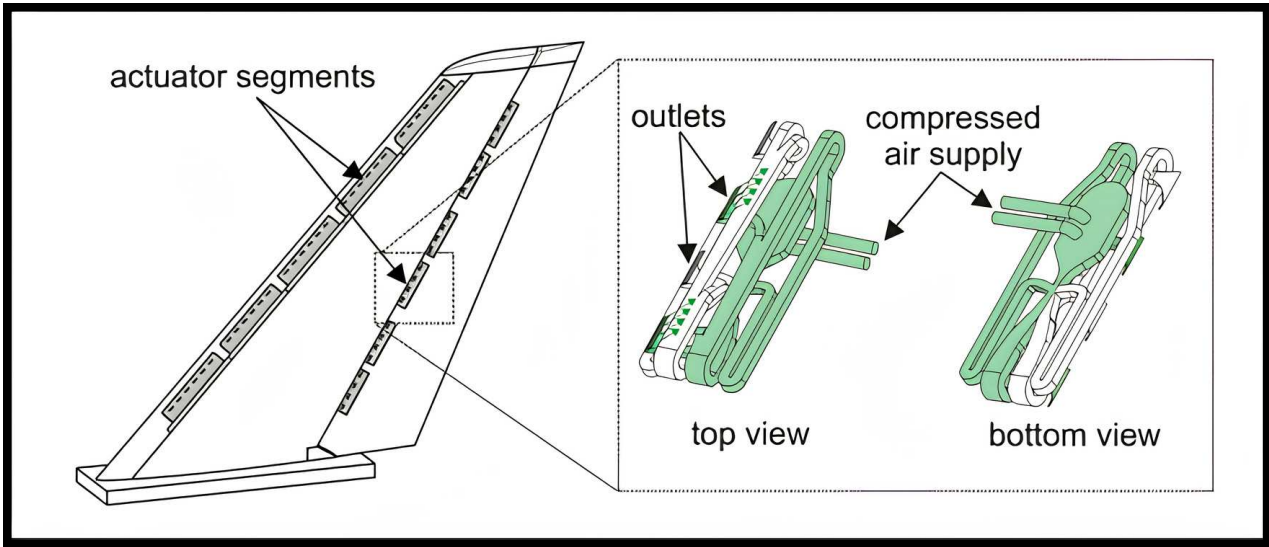
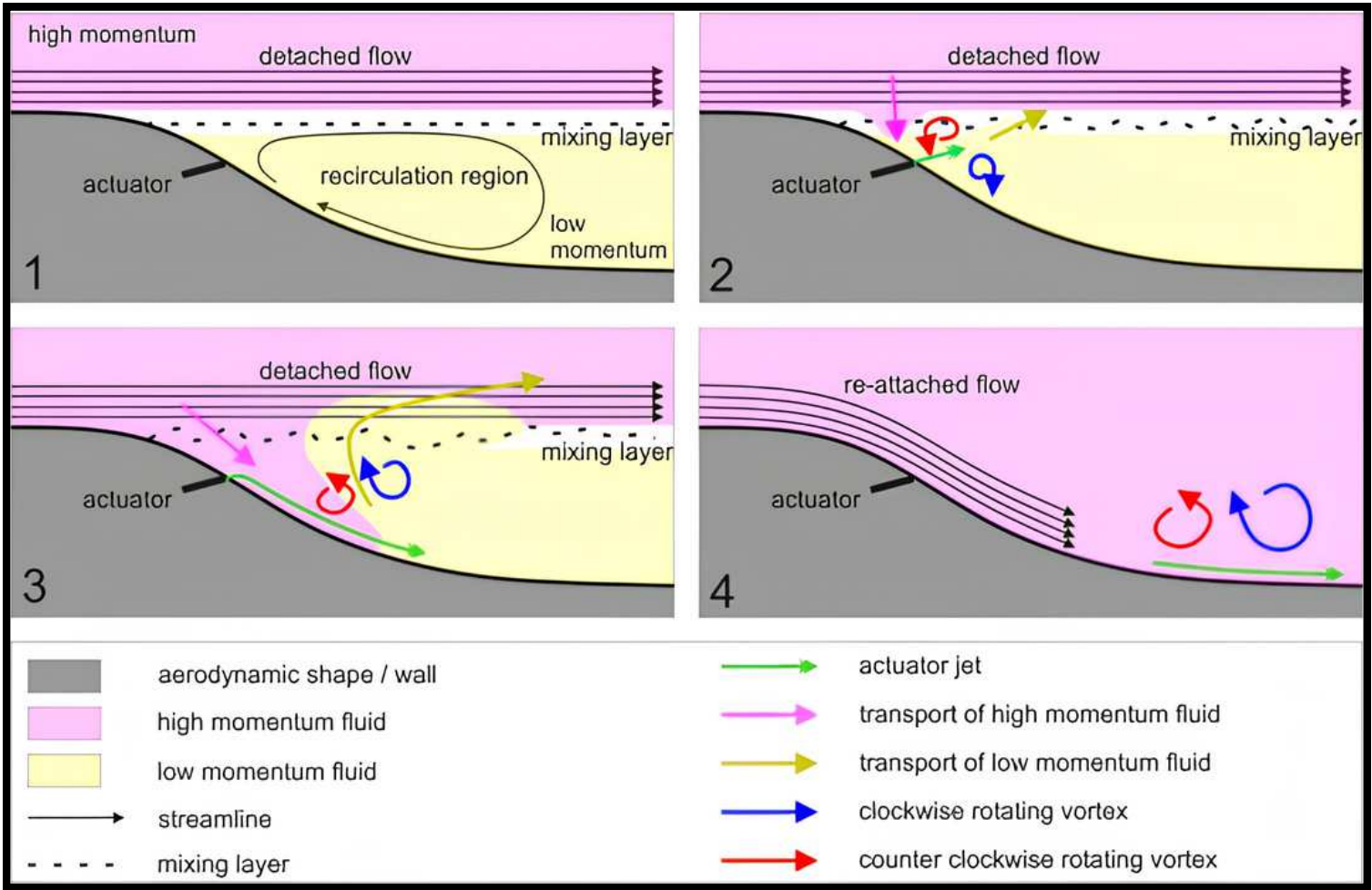


Soffiaggio tangenziale su pala di turbina eolica

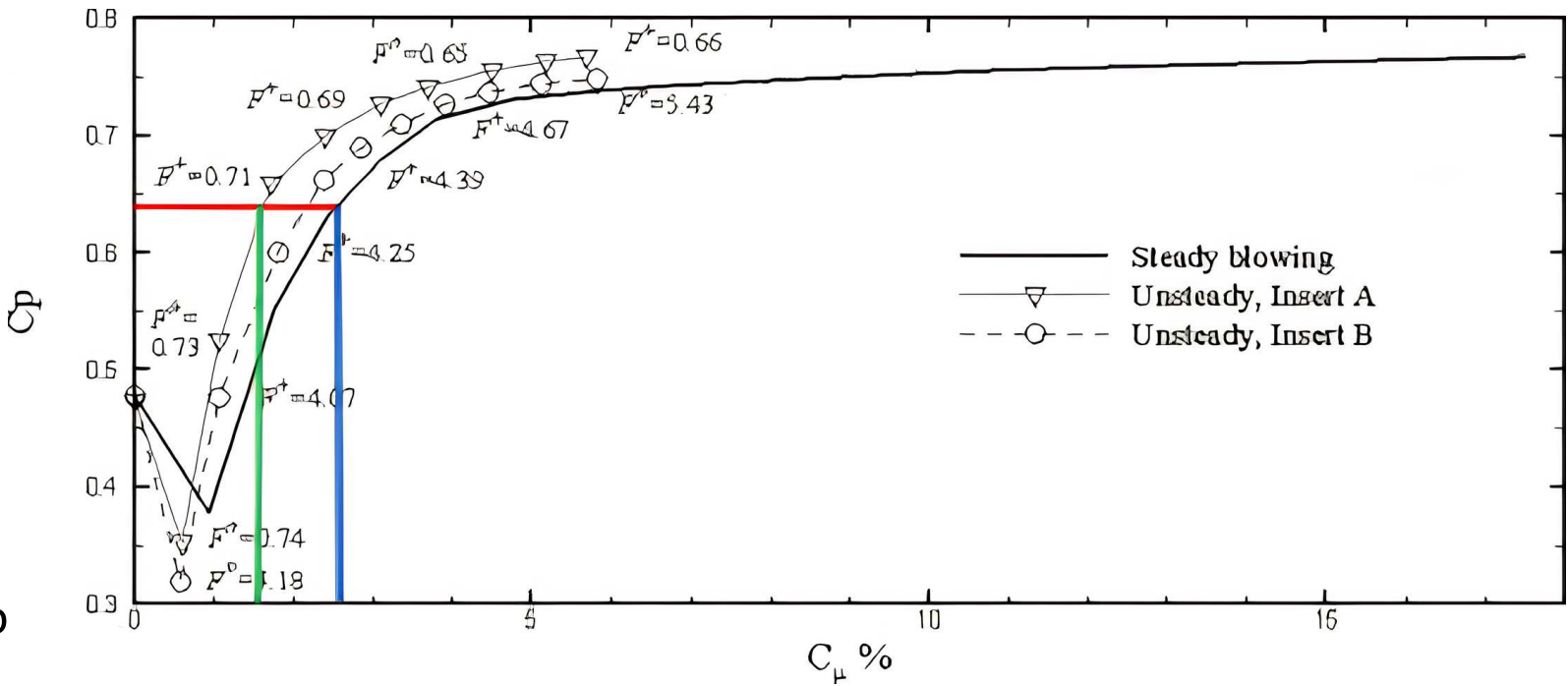
Controllo attivo:

- GETTI PULSATI
- GETTI SINTETICI
- ATTUATORI AL PLASMA

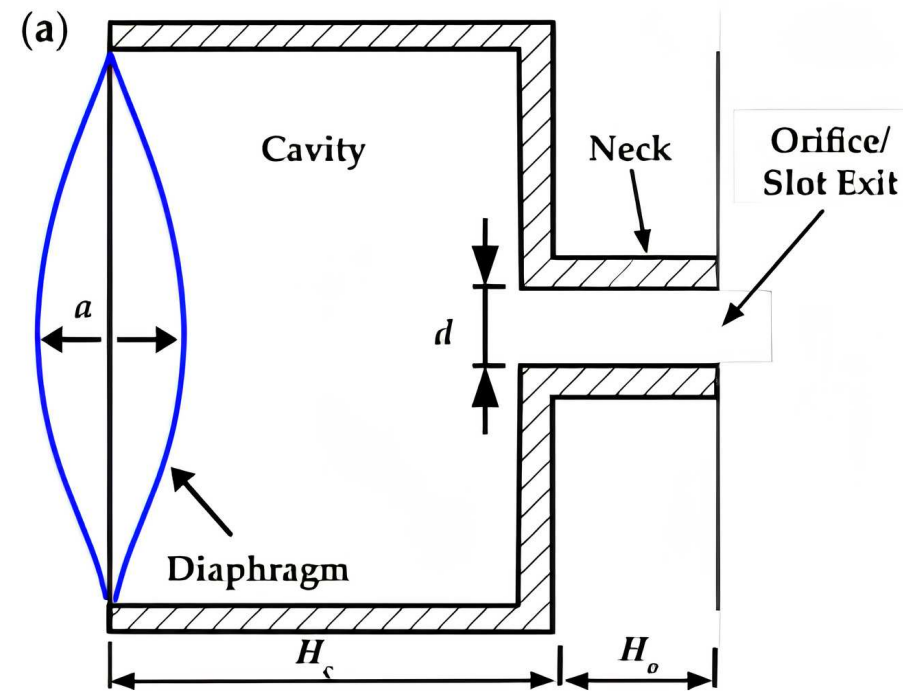
GETTI PULSATI con attuatori a fluido



VANTAGGI:



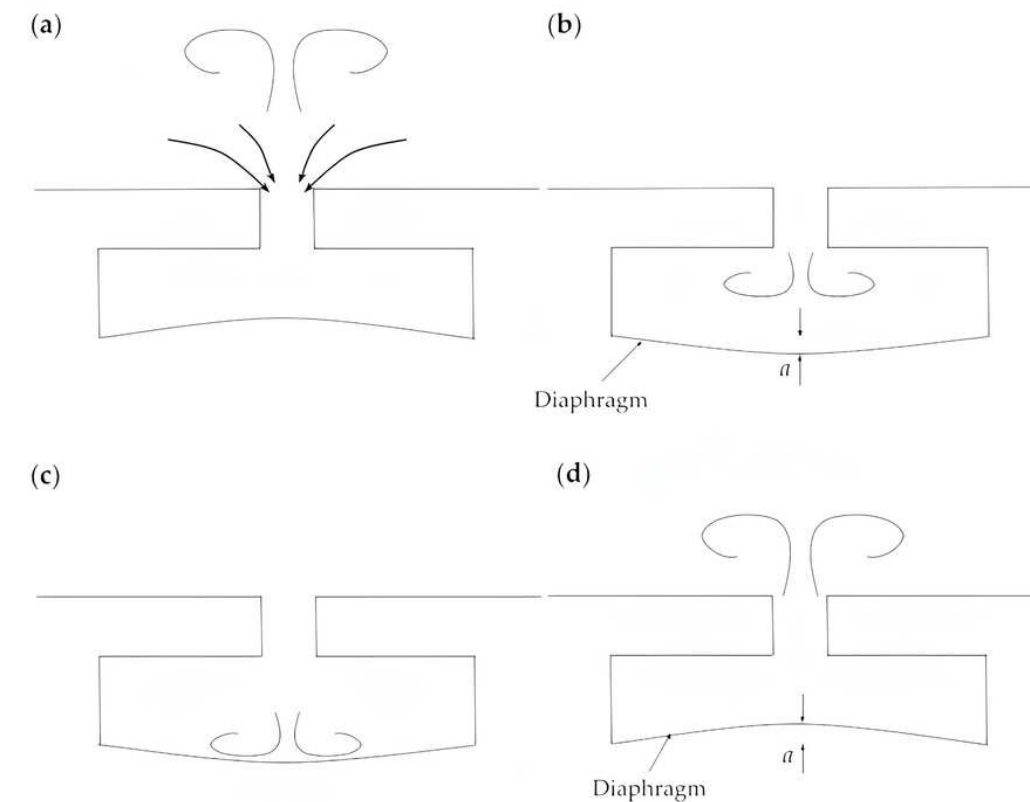
GETTI SINTETICI con diaframma



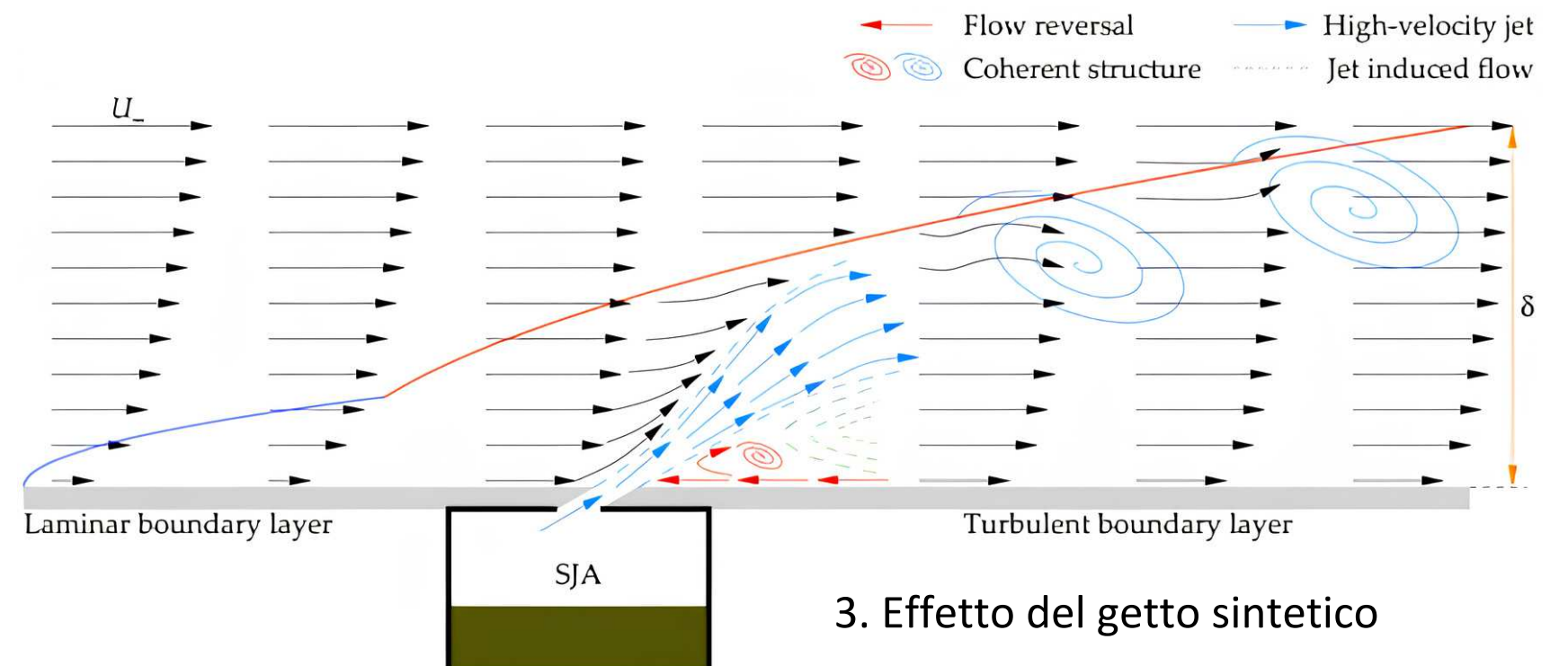
1. Schema costruttivo

VANTAGGI:

- **Risposta veloce e reattiva** al segnale di corrente elettrica in input
- **Assenza di fonti di flusso esterne**
- **Leggerezza, semplicità costruttiva ed affidabilità**

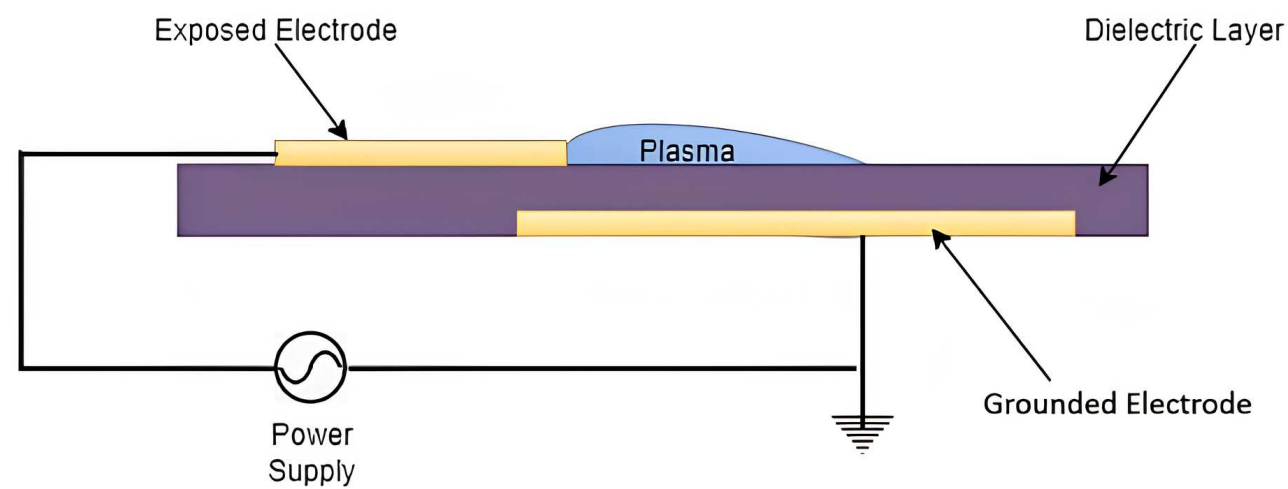


2. Ciclo di funzionamento



3. Effetto del getto sintetico

Attuatori al plasma Dielectric Barrier Discharge

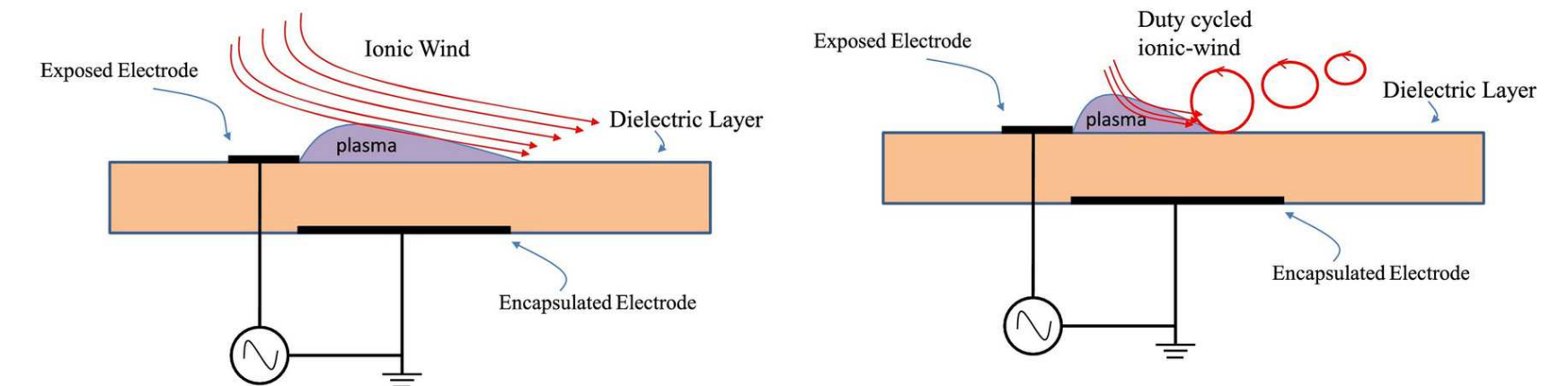
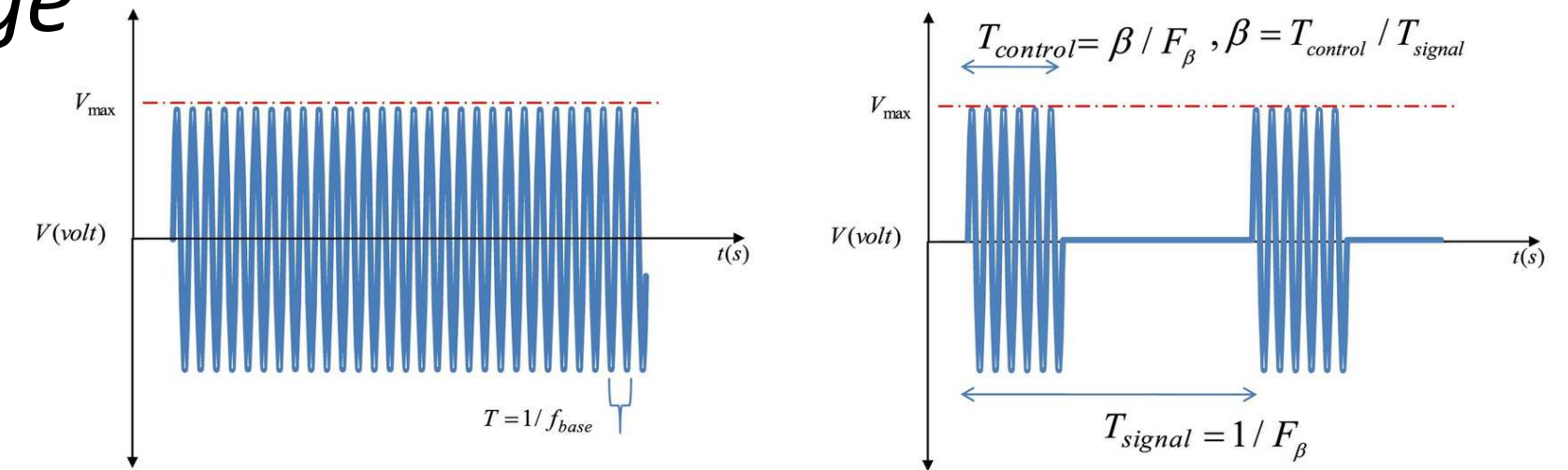


1. Schema circuitale

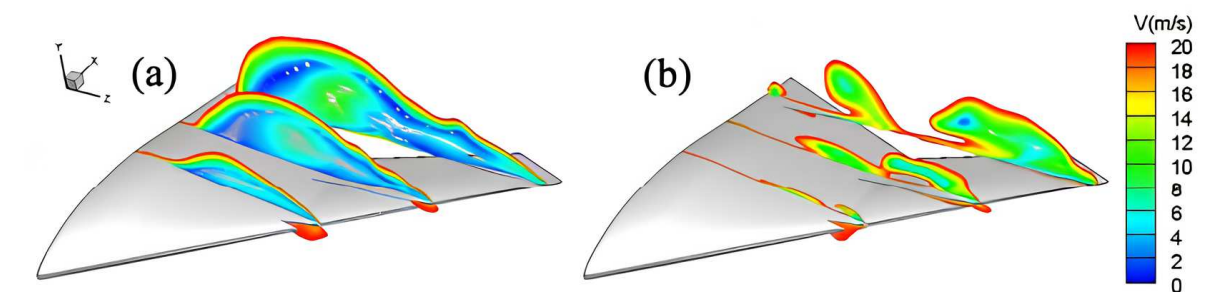
VANTAGGI:

- tempi di risposta all' input **brevissimi**
- leggeri e poco ingombranti
- Possono essere **combinati** insieme ai **Synthetic Jet Actuators** per ottenere **configurazioni** ancora più **prestazionali ed efficaci**.

Svantaggio: Produzione di **ozono**

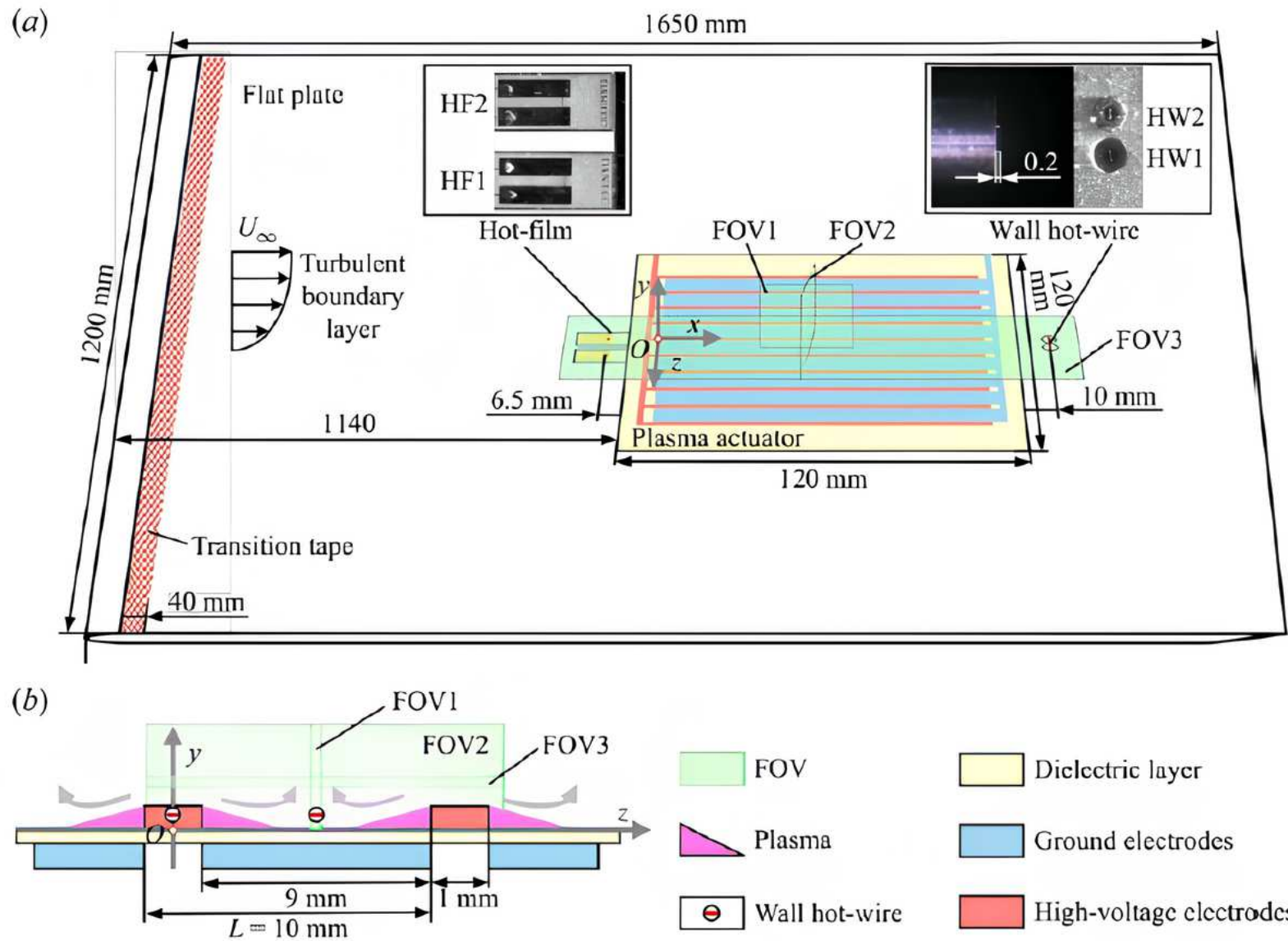


2. Modalità di controllo

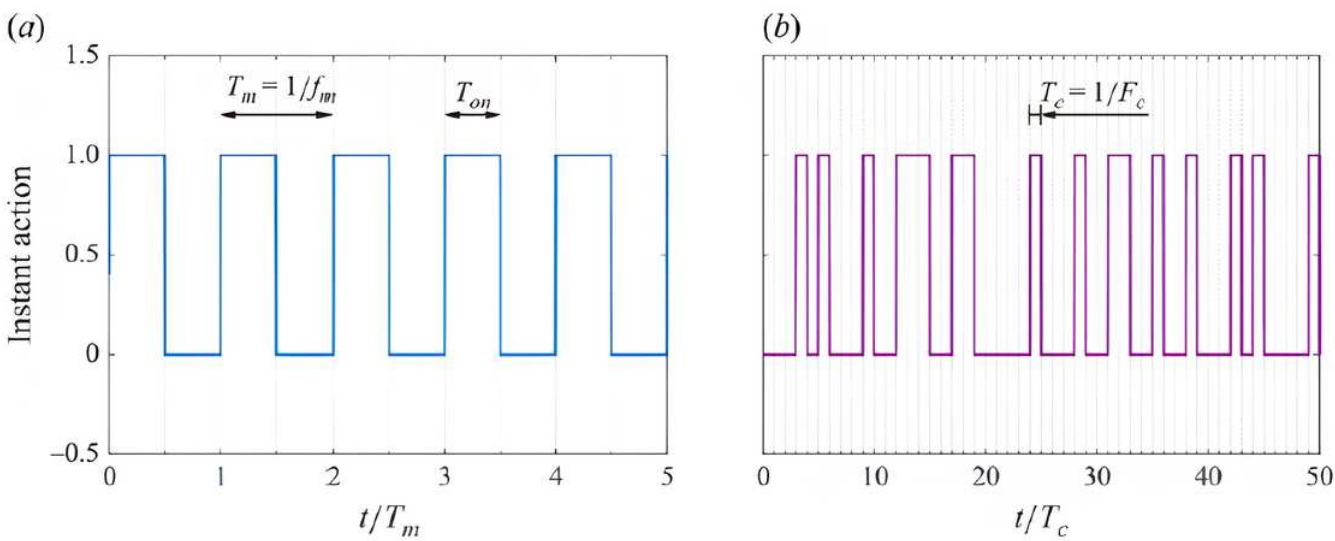


3. Applicazione in ambito aeronautico

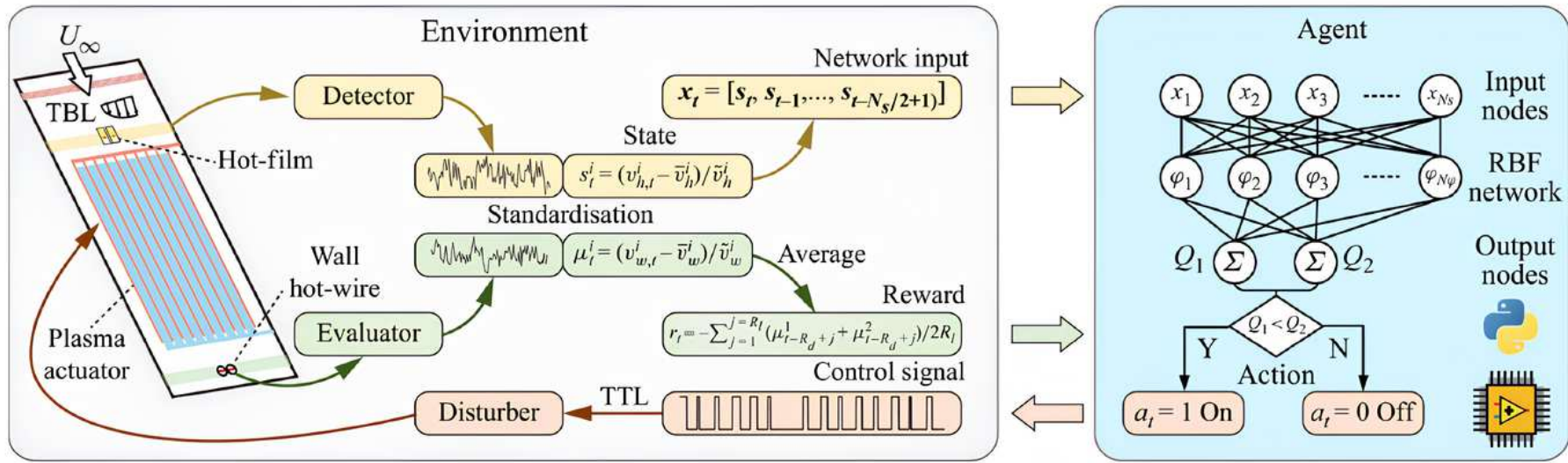
Reinforcement learning



1. Apparato sperimentale



2. Funzionamento continuo e discontinuo degli attuatori al plasma



3. Schema algoritmo DRL

- Il tema del controllo dello strato limite è molto **esteso, complesso** e in continua **evoluzione**. Quelli presentati infatti, sono soltanto **alcuni dei principali** metodi di controllo **attivo** dello strato limite.
- L'obiettivo per il futuro sarà quello di raggiungere **configurazioni** che siano **ottimizzate** da un punto di vista della prestazione aerodinamica, offrendo numerosi benefici in tutti quei settori dove vi è una spiccata interazione con i flussi aerodinamici.