
TRATTAMENTI BIOLOGICI



Controllo dell'inquinamento

La prevenzione e l'attenuazione degli effetti inquinanti sull'ambiente può basarsi su due azioni strategiche, entrambe finalizzate alla riduzione degli apporti di sostanze inquinanti:

- **l'attenuazione di modifiche dei comportamenti sociali e dei cicli produttivi**
- **la rimozione delle sostanze indesiderate, mediante idonei trattamenti.**

Lo scopo dei trattamenti delle acque reflue, nella fase iniziale del loro sviluppo, primi trent'anni del XX secolo, è stato innanzitutto quello di intensificare i processi naturali di rimozione, riproducendoli in condizioni controllate negli impianti di depurazione. Gli obiettivi erano essenzialmente:

- 1) la rimozione dei solidi sospesi e flottanti;
- 2) la rimozione della sostanza organica biodegradabile;
- 3) l'eliminazione dei microrganismi patogeni.

Controllo dell'inquinamento

A partire dagli anni '60, lo sviluppo di una nuova coscienza ecologica, la maggiore comprensione dei processi ambientali, il progredire delle conoscenze nell'ambito dei processi di rimozione, a quegli obiettivi iniziali, che conservano tutta la loro validità, se ne sono andati aggiungendo altri:

- 1) la rimozione dei nutrienti (azoto e fosforo)**
- 2) la rimozione dei metalli pesanti (Pb, Hg, Cu, etc.)**
- 3) la rimozione delle sostanze organiche biorefrattarie (fenoli, pesticidi, etc.)**
- 4) la rimozione di ioni inorganici (Na, Ca, solfati, etc.).**

Controllo dell'inquinamento

Esiste un gran numero di processi di depurazione, la cui applicazione è da correlare al grado di trattamento richiesto, in funzione delle caratteristiche delle acque reflue e di quelle richieste per lo scarico o il riuso dell'effluente.

I processi più diffusi sono riportati nella prossima diapositiva; non tutte le fasi vanno necessariamente impiegate, in quanto la scelta della catena di trattamento dipende dal grado di trattamento e dalle alternative più convenienti.

Efficienza di rimozione di processi di trattamento (%)

Processo	BOD₅	Solidi sospesi	Batteri	COD
Grigliatura fine	5-10	2-20	10-20	5-10
Clorazione e scarico grezzo	15-30	-	90-95	-
Sedimentazione	25-40	40-70	25-75	20-35
Chiariflocculazione	50-85	70-90	40-80	40-70
Filtri percolatori	50-95	50-92	90-95	50-80
Fanghi attivati	55-95	55-95	90-98	50-80
Lagune aerate	90-95	85-95	95-98	70-80
Clorazione scarico trattato	-	-	98-99	-

Classificazione dei trattamenti

I trattamenti possono essere classificati in funzione della natura delle operazioni impiegate in:

- **processi fisici**: comprendono i trattamenti nei quali prevale l'applicazione di principi fisici: grigliatura, miscelazione, flocculazione, sedimentazione, filtrazione)
- **processi chimici**: comprendono i trattamenti nei quali la rimozione o la trasformazione dei contaminanti avviene per effetto di reazioni chimiche (precipitazione, disinfezione, adsorbimento)
- **processi biologici**: comprendono i trattamenti nei quali la rimozione avviene principalmente per biodegradazione, attraverso l'azione di biomasse costituite da popolazioni batteriche (rimozione delle sostanze organiche, rimozione dei composti azotati).

Classificazione dei trattamenti

I trattamenti possono anche essere raggruppati in funzione della loro successione e del grado di rimozione progressivamente ottenuto in:

- pretrattamenti
- trattamenti primari
- trattamenti secondari
- trattamenti terziari o di affinamento

L'obiettivo dei trattamenti biologici delle acque reflue è quello di coagulare i solidi organici sospesi e solubili in modo da renderli allontanabili per decantazione.

In varia misura i trattamenti biologici rimuovono anche i nutrienti, azoto e fosforo.



Per meglio comprenderne i concetti è utile conoscere i seguenti termini:

- Aerobico è il processo biologico che avviene in presenza di ossigeno a spese di batteri aerobi obbligati (che sopravvivono soltanto in presenza di ossigeno).
- Anaerobico è il processo biologico che avviene in assenza di ossigeno a spese di batteri anaerobi obbligati (che sopravvivono soltanto in assenza di ossigeno).
- Denitrificazione anossica è il processo in cui l'azoto nitrico viene convertito in azoto gas in assenza di ossigeno.
- Facoltativo è il processo che può avvenire in assenza o in presenza di ossigeno.
- Microaerofili sono i microrganismi che si accrescono meglio a basse concentrazioni di ossigeno.
- Rimozione del BOD carbonioso è il processo di conversione biologica della materia organica carboniosa in tessuto cellulare ed in vari prodotti finali gassosi con la conversione di tutto l'azoto in ammoniaca.

- Nitrificazione è il processo biologico a due stadi con il quale l'ammoniaca viene prima convertita a nitrito e poi a nitrato.
- Stabilizzazione è il processo biologico di conversione della materia organica presente nei fanghi primari e biologici di supero in prodotti finali gassosi e nuovi tessuti cellulari. Può essere di tipo aerobico o anaerobico e viene anche chiamato processo di digestione.
- Substrato è costituito dalla sostanza organica o nutrienti convertiti nei processi biologici e che può limitarne il trattamento.
- Processo a biomassa sospesa è quel processo biologico in cui i microorganismi specifici vengono mantenuti in sospensione nel liquido.
- Processi a biomassa adesa sono quei processi biologici in cui i microrganismi sono attaccati a qualche mezzo inerte quali rocce, sabbie o materiali speciali in plastica o ceramica. Tali processi spesso vengono chiamati a film fisso.

Classificazione dei microrganismi

Per potersi sviluppare adeguatamente una popolazione microbica ha bisogno, oltre che di condizioni ambientali adeguate e di assenza di sostanze tossiche o inibenti di:

- una sorgente di energia;
- una fonte di carbonio;
- di elementi inorganici (N, P, S, K, Ca, Mg, etc.)

Classificazione dei microrganismi

I microrganismi, tutti caratterizzati dalla cellula come unità biologica di base, sono raggruppati in tre distinti regni:

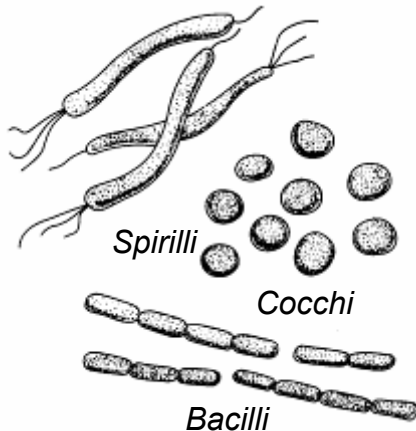
Regno	Membri rappresentativi	Caratterizzazione
Animale	Rotiferi Crostacei	Organismi multicellulari con differenziazione del tessuto cellulare
Piante	Muschi Felci Piante seminate	Organismi multicellulari con differenziazione del tessuto cellulare
Protista (Alto)	Algh Protozoi Funghi	Organismi uni o multicellulari, senza differenziazione del tessuto con un vero nucleo cellulare (cellule eucariotiche)
Protista (Basso)	Muffe Algh blu-verdi Batteri	Organismi uni o multicellulari, senza differenziazione del tessuto con un nucleo privo di membrana. (cellule procariotiche)

Classificazione dei microrganismi

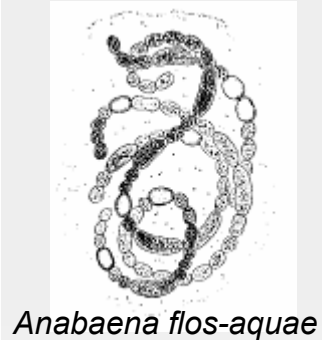
ORGANISMI UNICELLULARI O CON CELLULE TUTTE UGUALI

PROCARIOTI

BATTERI



ALGHE AZZURRE



EUCARIOTI

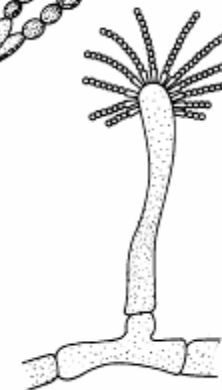
FUNGHI

MUFFE



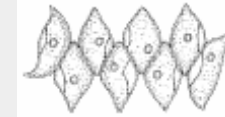
Penicillium

LIEVITI



Aspergillus

ALGHE VERDI



Scenedesmus

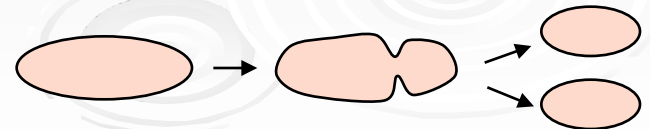
PROTOZOI



Charchesium

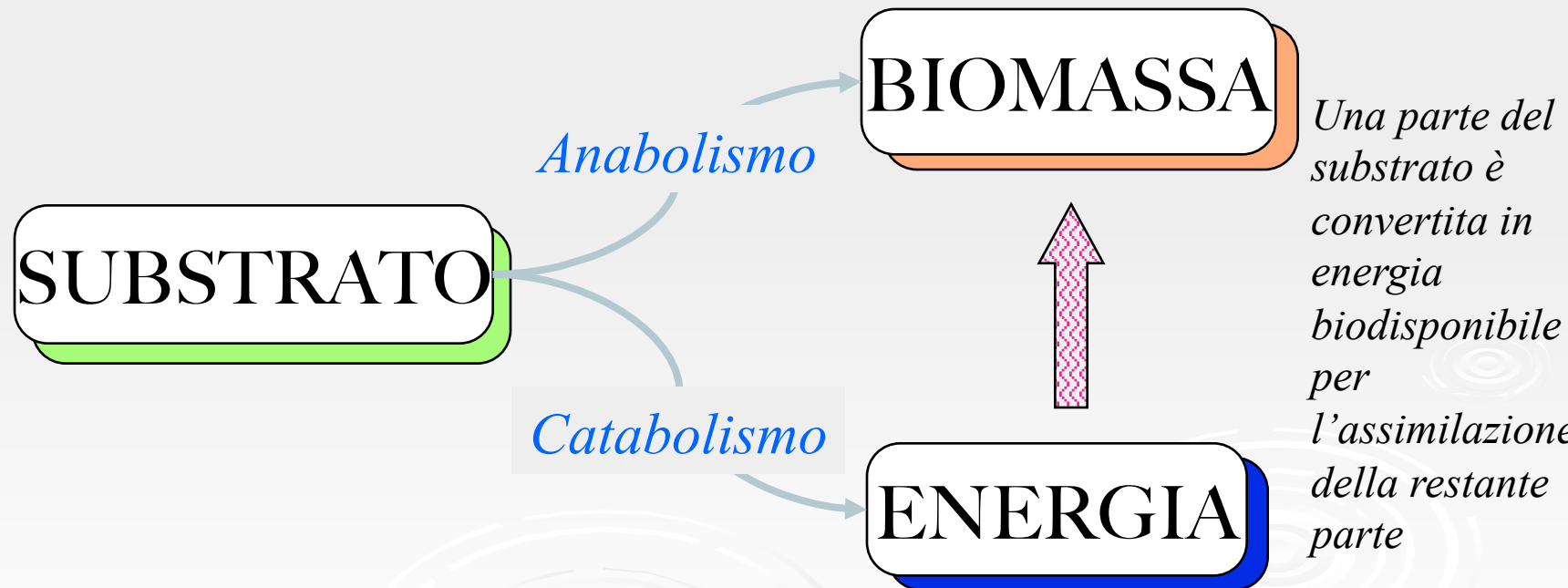
Dinamica dei microrganismi

- I microrganismi possono adattarsi a qualsiasi condizione ambientale
- Molti di essi svolgono funzioni utili o addirittura essenziali per l'ecosistema (degradazione inquinanti, decomposizione dei detriti, produzione di sostanze utili)
- Si tratta di organismi elementari (unicellulari)
- Il loro metabolismo è molto semplice
 - Assimilano nutrienti (**substrato**) attraverso la membrana cellulare
 - La immagazzinano e la trasformano al proprio interno per ricavarne energia e con questa fabbricare altro materiale cellulare
 - In mancanza di nutriente esterno, utilizzano materiale nutriente di riserva accumulato nella cellula (**crescita sbilanciata**)
 - Si riproducono per scissione



Ripartizione del Substrato

- Il metabolismo dei microorganismi sfrutta il substrato attraverso due diversi percorsi metabolici
- Il cammino **anabolico** converte il Substrato in Biomassa
- Il cammino **catabolico** produce l'Energia necessaria a questa trasformazione



I processi attraverso cui i Micro-organismi trasformano le sostanze nutritive (Substrati) sono i seguenti:

- **Dissimilativi (catabolici):** reazioni di degradazione del substrato attraverso una catena di passaggi intermedi, fino a giungere a dei prodotti stabili. Durante questi passaggi viene resa disponibile energia, di cui si servono i microrganismi per i loro processi di *crescita* e di *mantenimento*;
- **Assimilativi (anabolici):** in cui il substrato viene utilizzato per sintetizzare i componenti principali della cellula (biosintesi) oltre a prodotti metabolici di respirazione come CO_2 , H_2O , NH_4^+ , etc.
- I due processi sono complementari e si svolgono attraverso una serie di reazioni di ossido-riduzione (RedOx)

Ingredienti per il metabolismo cellulare

- La cellula ricava energia per la crescita ed il mantenimento attraverso reazioni di ***Ossido-Riduzione*** (RedOx)
- Esse hanno bisogno dei seguenti quattro elementi:
 - ***Sorgente di Energia***
 - Fornisce l'energia per le reazioni Anaboliche (Sintesi)
 - ***Sorgente di Carbonio***
 - Viene convertito in materiale cellulare (protoplasma)
 - ***Donatore di Elettroni***
 - Alimenta la semireazione di ossidazione
 - ***Accettore di Elettroni***
 - Alimenta la semireazione di riduzione

- Esistono due sorgenti di energia possibili:
 - **Energia solare**
 - **Energia chimica**
- I microorganismi che usano l'energia solare sono detti **fototrofi** e sfruttando una fonte esterna di energia, non sono accoppiati ad alcuna reazione dissimilativa (catabolica) interna per la produzione di energia.
- I microorganismi **chemiotrofi** basano il loro rifornimento di energia su reazioni cataboliche, a cui sono accoppiate le reazioni di biosintesi (anaboliche).
- Devono perciò possedere i vari meccanismi in grado di trasportare elettroni dal donatore all'accettore finale.

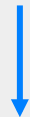
- Il Carbonio utilizzato può essere:
 - **Carbonio Inorganico**
(CO₂ atmosferica o disciolta nell'acqua)
 - **Carbonio Organico**
- Nel primo caso si ha a che fare con microorganismi **autotrofi** in quanto sintetizzano biomassa (materia organica $\sim nCH_2O$) a partire da sostanze **inorganiche**
- Nel secondo caso si hanno microorganismi **eterotrofi**, in quanto la biosintesi si basa su composti **organici**
- **In questo caso la sorgente di energia coincide con la sorgente di carbonio (organico)**

Forme di carbonio

➤ Carbonio inorganico

- *Nella molecola c'è un solo atomo di Carbonio*
- Carbonio in forma ossidata
- La disponibilità di C. inorganico è legato all'equilibrio dei carbonati

- Fase gassosa $CO_{2(g)}$



- Fase liquida $CO_{2(aq)} \leftrightarrow H_2CO_3 \leftrightarrow H^+ + HCO_3^- \leftrightarrow 2H^+ + CO_3^{2-}$

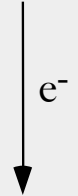
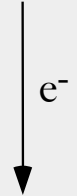
➤ Carbonio organico

- *Ogni atomo di Carbonio è legato ad altri atomi di Carbonio*
- Unica eccezione: Metano (CH_4) - unico atomo di C
- Carbonio in forma ridotta
- Composti in grado di fornire energia per ossidazione
- Es. Carboidrati, Acidi grassi, Proteine, etc.....

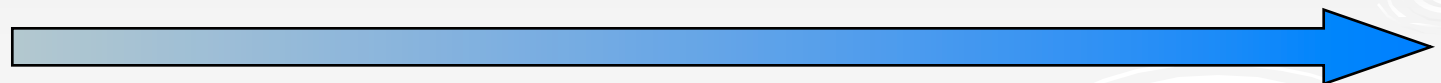
Tipo di batteri	Nome della reazione	Fonte di Carbonio	Donatore di elettroni (substrato ossidato)	Accettore di elettroni	Prodotti
Eterotrofi aerobici	Ossidazione aerobica	Composti organici	Composti organici	O ₂	CO ₂ , H ₂ O
Autotrofi aerobici	Nitrificazione	CO ₂	NH ₃ ⁻ , NO ₂ ⁻	O ₂	NO ₂ ⁻ , NO ₃ ⁻
	Ossidazione del ferro	CO ₂	Fe (II)	O ₂	Fe(III)
	Ossidazione dei solfuri	CO ₂	H ₂ S, S ⁰ , S ₂ O ₃ ²⁻	O ₂	SO ₄ ²⁻
Eterotrofi facoltativi	Denitrificazione anossica	Composti organici	Composti organici	NO ₂ ⁻ , NO ₃ ⁻	N ₂ , CO ₂ , H ₂ O
Eterotrofi anaerobici	Fermentazione acida	Composti organici	Composti organici	Composti organici	Acidi grassi volatili (VFAs, Volatile Fatty Acids) (acido acetico, propano, acido butirrico)
	Riduzione del ferro	Composti organici	Composti organici	Fe(III)	Fe(II), CO ₂ , H ₂ O
	Riduzione dei solfati	Composti organici	Composti organici	SO ₄ ²⁻	H ₂ S, CO ₂ , H ₂ O
	Metanogenesi	Composti organici	Acidi grassi volatili (VFAs, Volatile Fatty Acids)	CO ₂	Metano

Scambio elettronico nei vari metabolismi eterotrofi

Il tipo di trasformazione che il Carbonio organico subisce dipende dai livelli energetici disponibili, che sono tipici di ciascun metabolismo.

	<i>Fermentazione anaerobica</i>	<i>Respirazione anossica</i>	<i>Respirazione aerobica</i>
Trasformazione del Carbonio	Substrato organico $\xrightarrow{C}$ Prodotti di fermentazione	Substrato organico $\xrightarrow{C}$ CO ₂	Substrato organico $\xrightarrow{C}$ CO ₂
Accettore di elettroni	 Ossido-Riduzioni interne	 NO ₃ ⁻ , SO ₄ ⁻⁻ , CO ₃ ⁻⁻	 O ₂

POTENZIALE REDOX



molto negativo

*debolmente negativo
o circa zero*

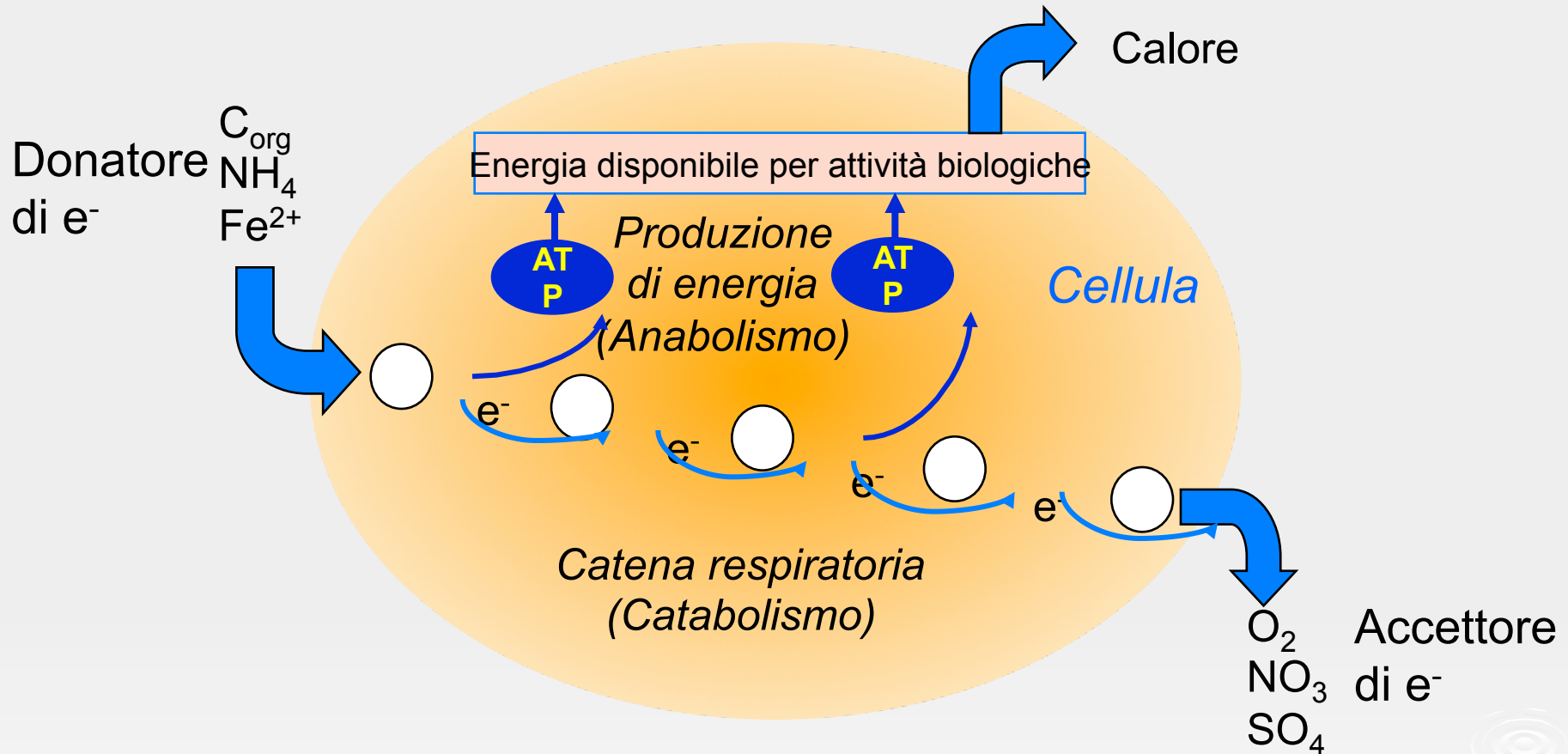
positivo

$\approx -400mV \div -100 mV$

$\approx -50 mV \div 10 mV$

$> 10 mV$

Produzione di bio-energia nella catena respiratoria



La catena respiratoria consiste in una serie di reazioni RedOx con trasporto di elettroni dal substrato all'acceptore finale.

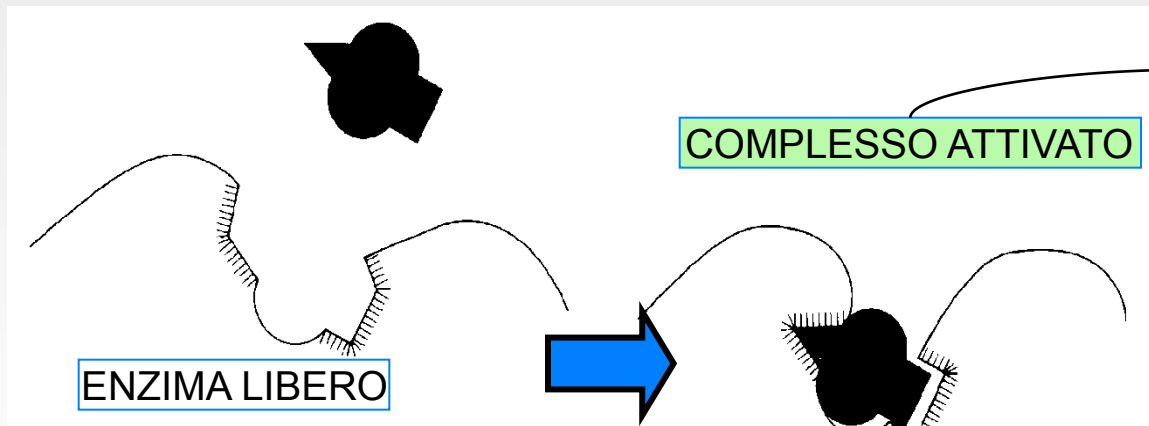
Lungo il percorso di reazione vengono generate varie molecole di ATP che costituiscono la riserva di energia *biologicamente disponibile*

Cinetica Enzimatica

La trasformazione da reagenti a prodotti è mediata da un *enzima* che ha la funzione di combinarsi temporaneamente con il reagente (*substrato*) formando un *complesso attivato* instabile (ES^*), che poi forma il prodotto finale (P).

Il meccanismo di attivazione dell'enzima (E) consiste spesso nel collocarsi in una particolare posizione del substrato (in genere costituito da complesse catene proteiche) in modo da catalizzare la trasformazione del substrato (S) in Prodotto (P).

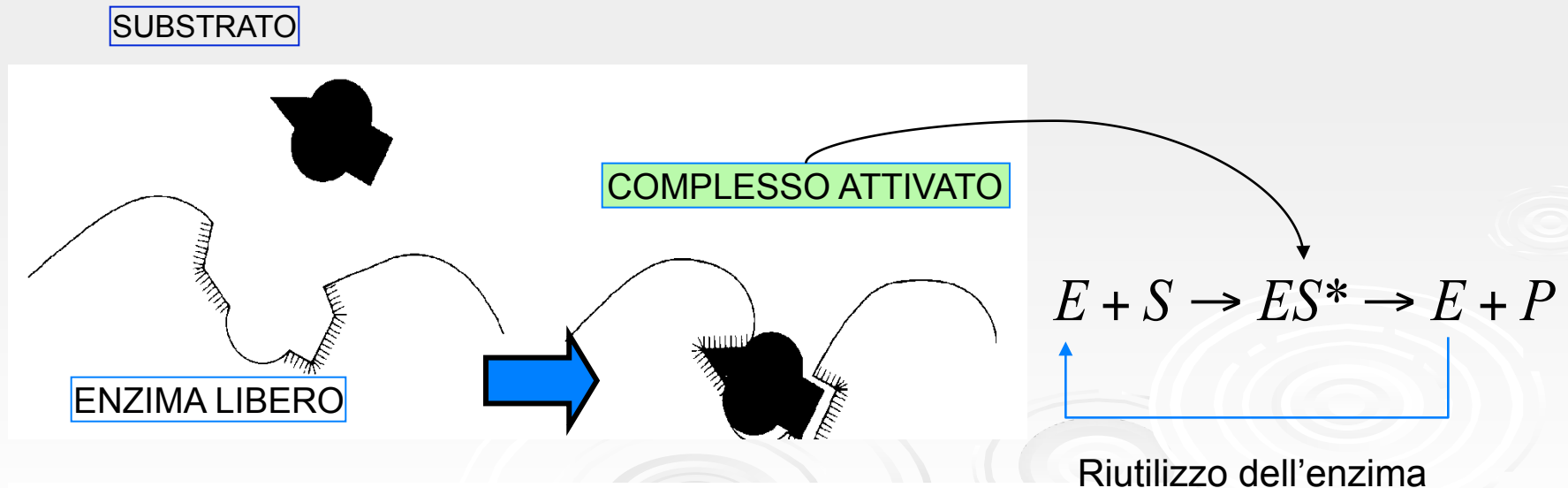
SUBSTRATO

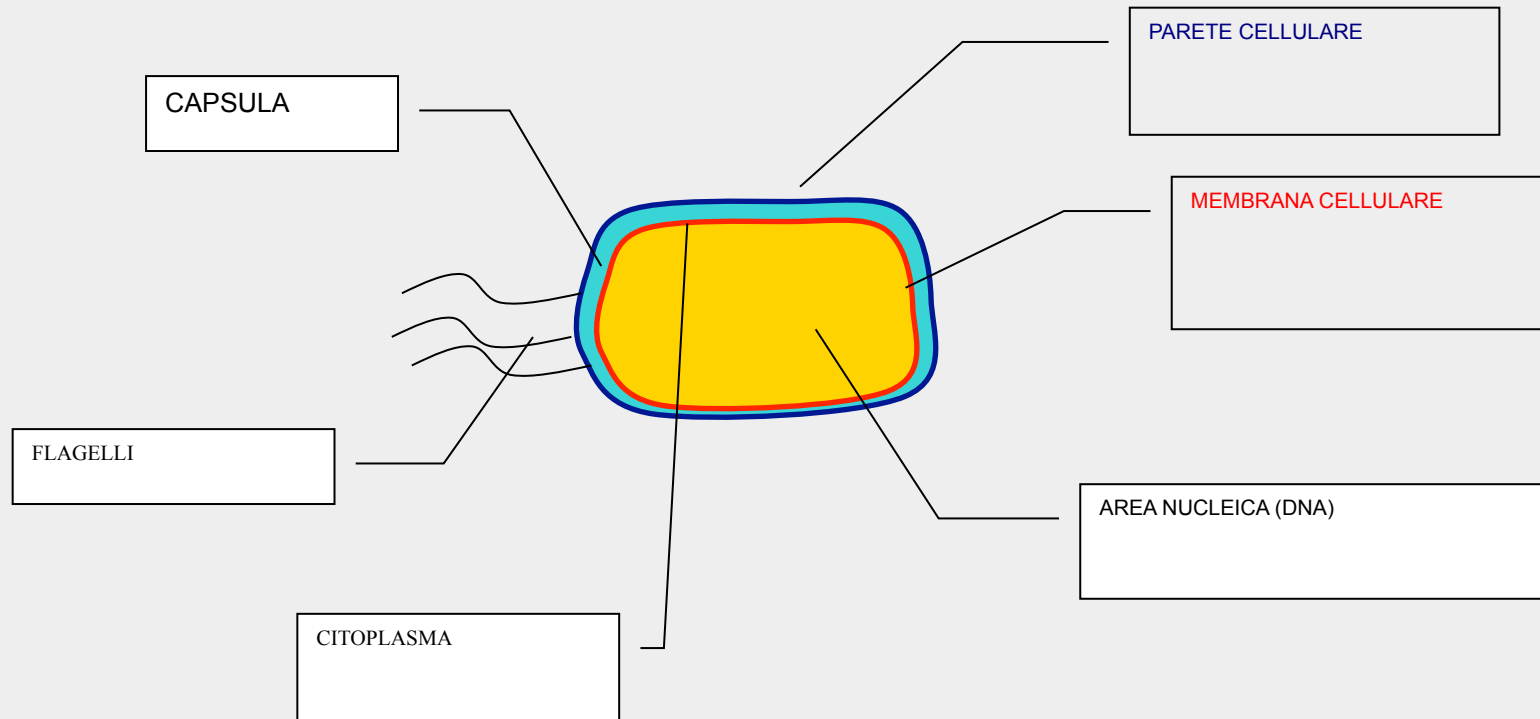


Riutilizzo dell'enzima

Cinetica Enzimatica

- Gli enzimi possono essere extracellulari o intracellulari.
- Sono altamente specifici nei confronti del substrato e la cellula produce un enzima differente per ciascun substrato.
- L'attività degli enzimi è fortemente condizionata dal pH e dalla temperatura oltre che dalla concentrazione di substrato.





Le cellule possono avere una parete rigida o flessibile. Se mobili, usualmente posseggono flagelli o ciglia ed internamente al nucleo contengono una sospensione colloidale di proteine, carboidrati ed altre sostanze organiche complesse (citoplasma). L'acido nucleico contenuto nelle cellule (DNA) è un materiale ereditario utile nella riproduzione mentre l'acido ribonucleico (RNA) provvede alla sintesi delle proteine.

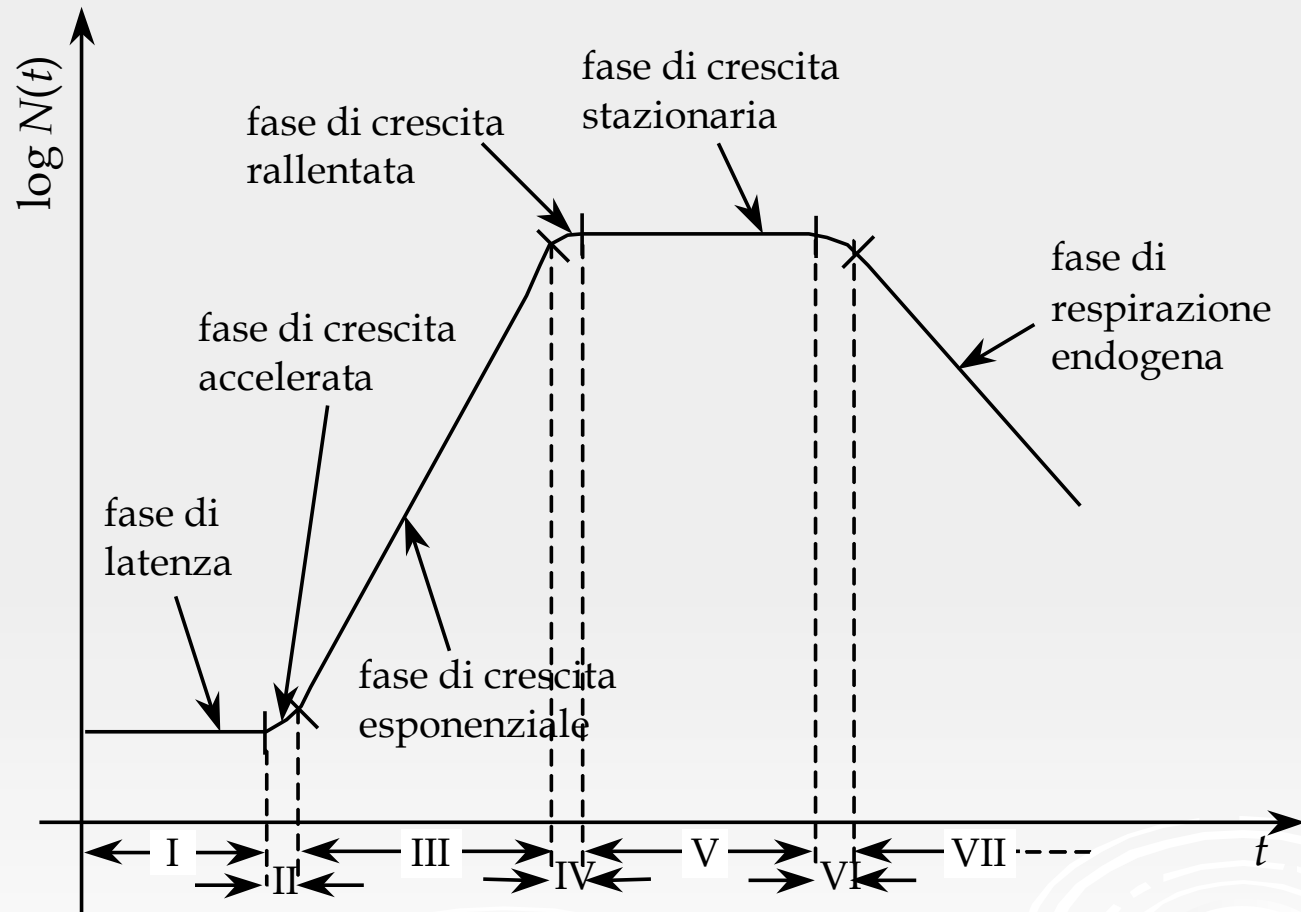
Intervalli di temperatura ai quali i microrganismi possono sopravvivere

Intervallo di temperatura	Organismi
$T < 20^{\circ}\text{C}$	Psicrofili
$25 < T < 40^{\circ}\text{C}$	Mesofili
$45 < T < 60^{\circ}\text{C}$	Termofili
$T > 60^{\circ}\text{C}$	Stenotermofili

Possibili accettori di elettroni per i diversi tipi di metabolismo

Ambiente	Accettore di elettroni	Processo
Aerobico	O_2	Metabolismo aerobico
Anossico	NO_3^-	Denitrificazione
Anaerobico	SO_4^{2-}	Riduzione dei solfati
Anaerobico	CO_2	Metanogenesi

CRESCITA BATTERICA IN CULTURA PURA



CRESCITA BATTERICA IN CULTURA PURA

La cinetica biologica viene generalmente studiata facendo riferimento a **microrganismi in coltura pura**. Si ipotizzi, a tale scopo, che una certa quantità di microrganismi di una determinata specie batterica venga introdotta a un certo istante all'interno di un reattore *batch* contenente un mezzo liquido che risponda alle condizioni sopracitate. Indicato con N_0 il numero di microrganismi presenti all'istante iniziale $t = 0$ all'interno del reattore *batch*, si osserva che prima che i microrganismi inizino a svolgere le proprie funzioni di sintesi cellulare, è necessario che essi si adattino alle nuove condizioni ambientali in cui sono stati introdotti. Sarà, dunque, necessario un *periodo* iniziale di *acclimatazione* (anche detto **fase di latenza**) prima che si osservi un incremento del numero di microrganismi presenti nel sistema.

CRESCITA BATTERICA IN CULTURA PURA

In tale fase, pur restando costante il numero di microrganismi, ha luogo un incremento delle dimensioni cellulari e dunque della massa di microrganismi (tratto orizzontale della Figura 5.3).

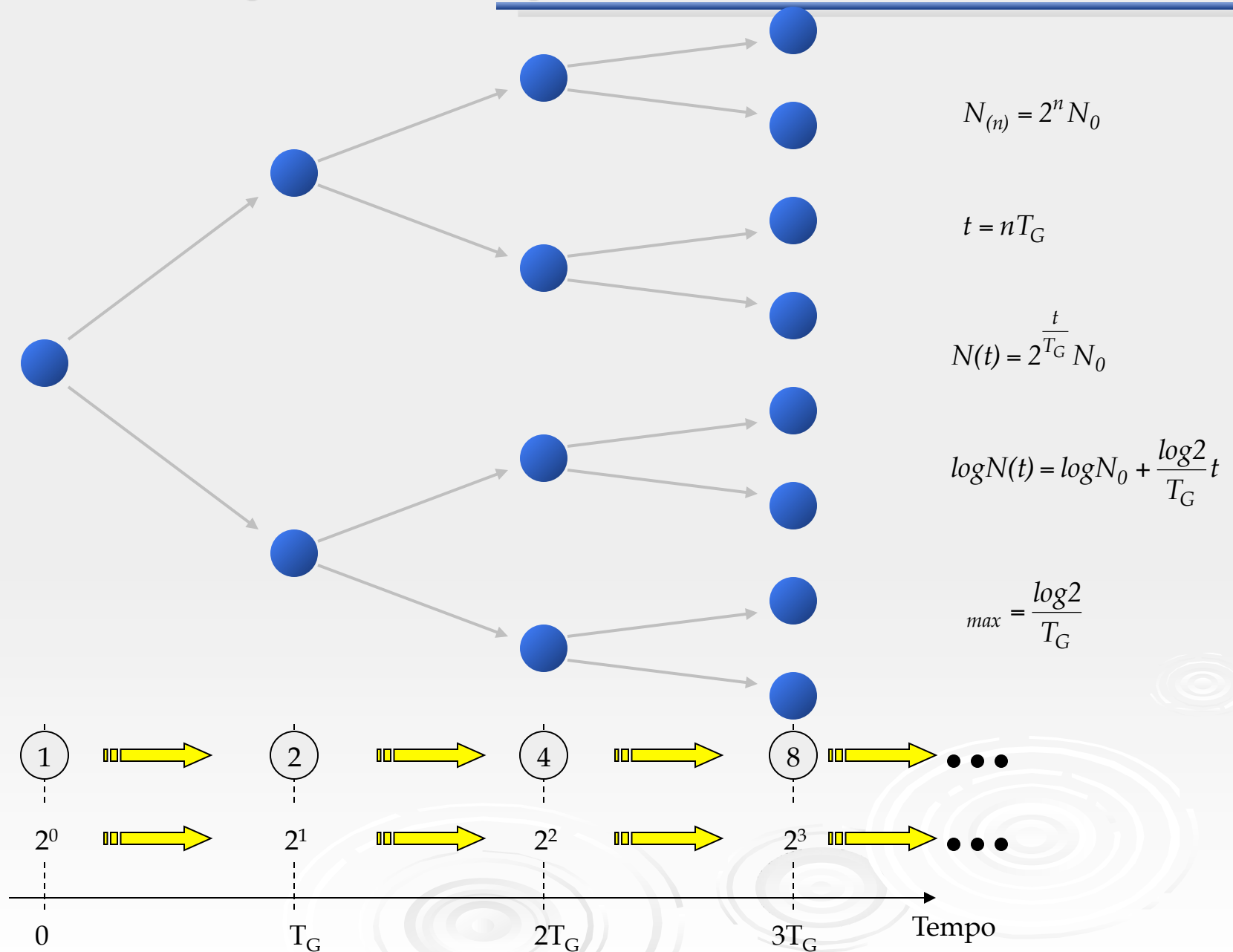
Nel periodo successivo, i microrganismi cominceranno a dividersi (*scissione binaria*) e, se il substrato è in quantità superiore alle richieste della biomassa, la crescita avverrà alla velocità massima. L'incremento della popolazione microbica seguirà una progressione geometrica.

Si definisca con *TG il tempo di generazione*, ovvero il tempo richiesto perché a partire da un determinato numero di microrganismi se ne sviluppi un numero doppio; tale tempo varia in relazione alla specie microbica considerata ed è pertanto caratteristico della specie stessa, così come indicato nella seguente tabella.

CRESCITA BATTERICA IN COLTURA PURA

Specie	T _G (minuti)
Proteus vulgaris	20,5
Escherichia coli	16,5
Aerobacter aerogenes	17,2
Eberthella typhosa	23,5
Diplococcus pneumoniae	20,5
Clostridium butyrricum	51,0
Rhizobium trifolii	101,0
Rhizobium japonicum	344,0

Riproduzione per scissione binaria



$$\log N(t) = \log N_0 + \frac{\log 2}{T_G} t$$

Si tratta di una relazione lineare nel piano $\log N(t) - t$, il che spiega perché la fase di crescita esponenziale sia rappresentata nella figura 3 da una retta (tratto III).

In realtà, tra la fase di latenza e quella di crescita esponenziale si individua in genere un'ulteriore fase, detta di **crescita accelerata** (tratto II), nella quale i microrganismi si sviluppano con velocità differenti, per cui la crescita della popolazione microbica avviene a un tasso globale inferiore a quello della successiva fase di crescita esponenziale.

Per quanto esposto, si nota come **la pendenza del tratto lineare relativo alla fase di crescita esponenziale rappresenti il tasso massimo di crescita della popolazione microbica analizzata**; indicando tale tasso massimo di crescita con il simbolo $\mu_{\max}$, si avrà:

$$\mu_{\max} = \frac{\log 2}{T_G}$$

- Contemporaneamente alla crescita dei microrganismi, si osserverà una corrispondente diminuzione della concentrazione di substrato nel sistema. La fase di crescita esponenziale procede finché la quantità di substrato presente non diviene limitante per la crescita biologica.
- Quando si verifica tale condizione, la crescita dei microrganismi viene assicurata dalla cosiddetta *respirazione endogena*, nella quale essi utilizzano quale fonte di carbonio e di energia lo stesso materiale cellulare. Pertanto, potrà individuarsi sulla curva della figura 3 un intervallo di tempo, corrispondente alla cosiddetta fase di *crescita stazionaria* (tratto V), nella quale il tasso di crescita dei microrganismi è esattamente bilanciato dal tasso di scomparsa per respirazione endogena, per cui la crescita netta è nulla.
- Anche in questo caso, nella realtà si osserva generalmente un tratto di raccordo (tratto IV nella figura 3) tra quelli corrispondenti alle fasi di crescita esponenziale e di crescita stazionaria, detto fase di *crescita rallentata*.

- Oltre il tratto relativo alla fase di crescita stazionaria, la concentrazione di substrato nel sistema risulta talmente bassa che il tasso di respirazione endogena prevale su quello di crescita, per cui la crescita netta della popolazione batterica considerata risulta negativa (tratto VII della Figura 3); tale condizione corrisponde alla fase di *respirazione endogena* propriamente detta.
- Definito dunque l'andamento del numero di microrganismi nel reattore batch in funzione del tempo, è possibile determinare i parametri cinetici relativi alla crescita microbica e all'utilizzazione del substrato a questa legata.

REATTORI A FANGHI ATTIVATI A BIOMASSA SOSPESA

Un reattore *a fanghi attivati* è un reattore all'interno del quale la rimozione della sostanza organica viene realizzata sfruttando opportune reazioni biochimiche di degradazione. I **microrganismi** crescono utilizzando il **substrato** come fonte di carbonio e di energia e sviluppandosi in **colonie microbiche organizzate in fiocchi**, detti appunto fanghi attivati.

La biomassa che opera la rimozione del substrato può essere presente in forma dispersa all'interno del volume del reattore, nel qual caso questo si dice *a biomassa sospesa*, ovvero può crescere aderendo a opportuni supporti, nel qual caso il reattore si dice *a biomassa adesa*.

REATTORI A FANGHI ATTIVATI A BIOMASSA SOSPESA

- Il processo a fanghi attivi fu **sviluppato in Inghilterra da Arden e Lockett** (1914), e fu così chiamato perché implica la produzione di una massa attiva di microrganismi capaci di depurare aerobicamente un'acqua di scarico.
- L'acqua di scarico, generalmente effluente dal trattamento primario (pretrattamenti meccanici + sedimentazione primaria), è introdotta nel **reattore biologico** dove una coltura batterica aerobica è mantenuta in sospensione. Il contenuto del reattore è usualmente chiamato **miscela aerata**. All'interno del reattore avviene la demolizione della sostanza organica contenuta nell'influente ad opera della coltura batterica. L'ambiente aerobico nel reattore è ottenuto usando diffusori d'aria e/o aeratori meccanici.
- L'effluente dal reattore entra in una **vasca di sedimentazione** dove la fase solida costituita dalla materia cellulare (fiocchi di fango) è separata da quella liquida, che costituisce l'effluente trattato, ormai pressoché privo delle sostanze inquinanti. Tuttavia, sarà chiaro più avanti che, a seconda della configurazione adottata per il sistema, il funzionamento del reattore biologico può essere considerato o meno svincolato da quello del sedimentatore secondario posto a valle di esso.

REATTORE A COMPLETO MESCOLAMENTO CON RICIRCOLO DEI FANGHI E SPUGO DAL REATTORE

Per mantenere il sistema in condizioni stazionarie è necessario **spurgare** da questo l'eccesso di biomassa prodotta a seguito delle reazioni di degradazione del substrato. Tale eccesso può essere spurgato direttamente dal reattore, ovvero dalla corrente dei fanghi estratti dal fondo del sedimentatore.

Secondo la seconda ipotesi, il sistema potrebbe essere schematizzato come indicato nella successiva slide, con il seguente significato dei simboli:

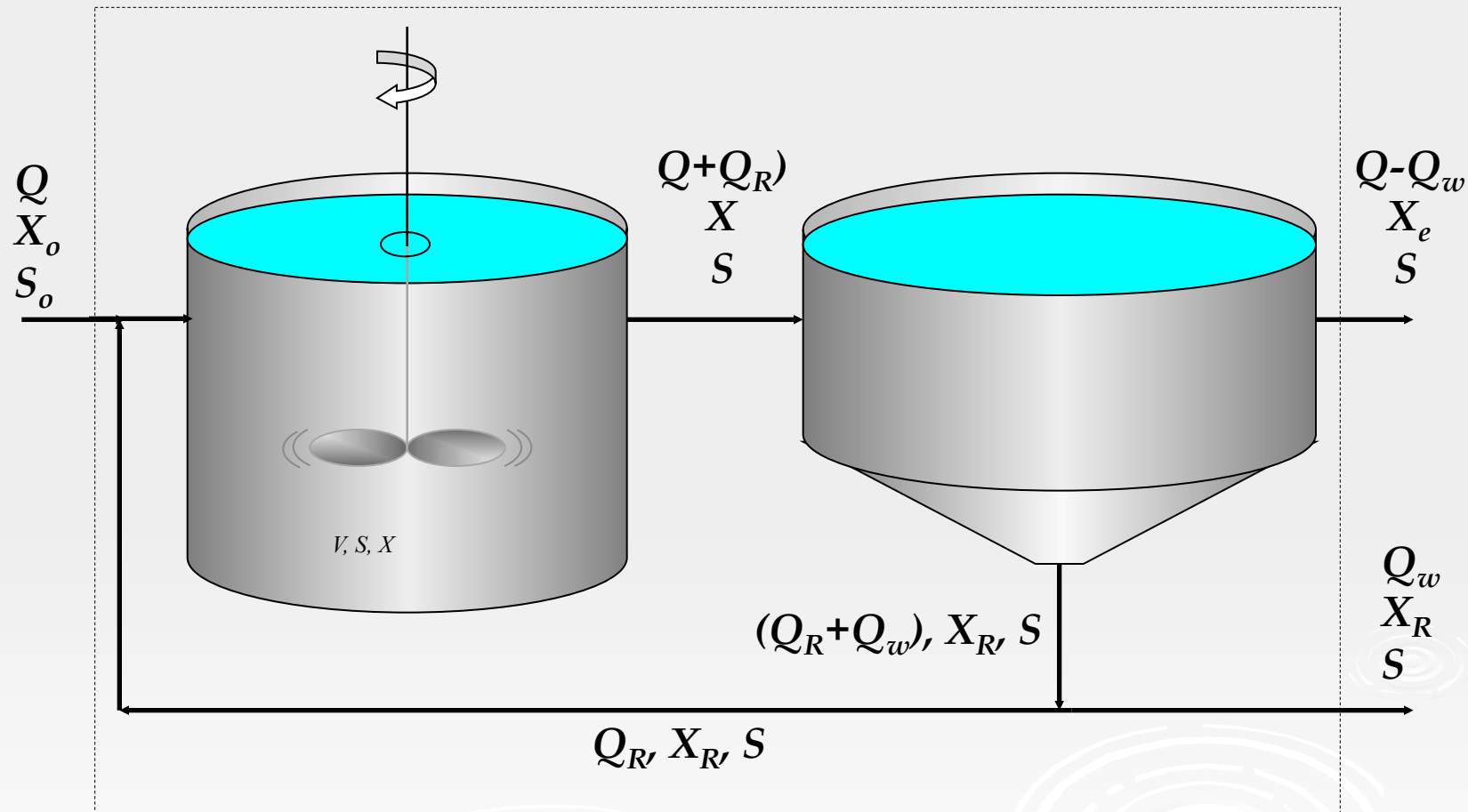
X_R = concentrazione di biomassa nella linea di ricircolo dei fanghi;

X_e = concentrazione di biomassa nell'effluente dal sedimentatore;

Q_R = portata volumetrica di ricircolo = αQ , essendo α il rapporto di ricircolo;

Q_w = portata volumetrica di spurgo.

REATTORE A COMPLETO MESCOLAMENTO CON RICIRCOLO DEI FANGHI E SPUGO DALLA LINEA DI RICIRCOLO



CFSTR a fanghi attivati con ricircolo e spurgo dalla linea di ricircolo

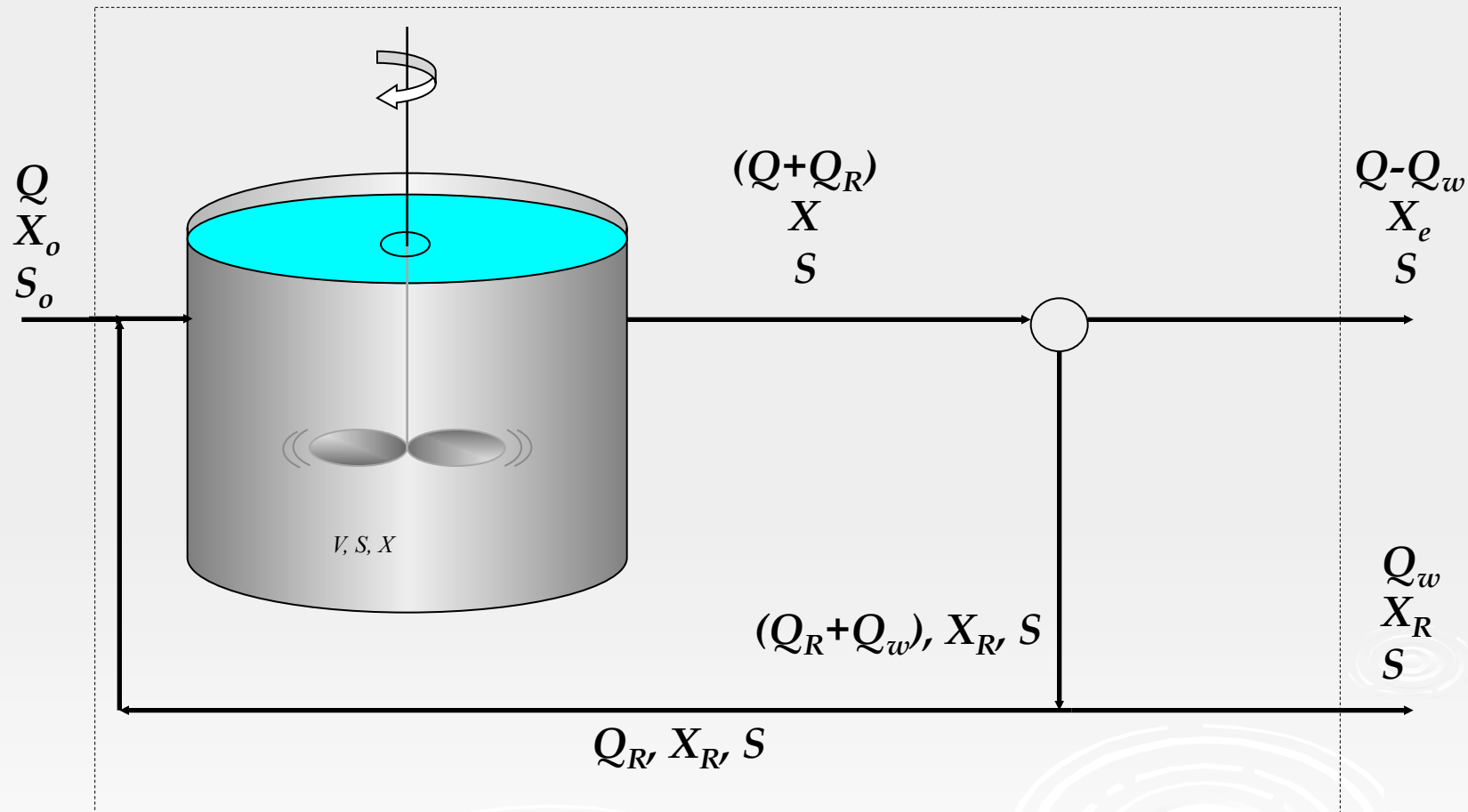
REATTORE A COMPLETO MESCOLAMENTO CON RICIRCOLO DEI FANGHI E SPUGO DAL REATTORE

Si assumano valide le seguenti **IPOTESI**:

- a) Le reazioni biochimiche che avvengono all'interno del sistema hanno luogo esclusivamente all'interno del reattore biologico, mentre nessuna reazione di tale natura avviene all'interno del sedimentatore secondario;
- b) Il sedimentatore secondario ha, ai fini del bilancio di massa, un volume nullo; ciò vuol dire che tale unità svolge la sola funzione di separazione della biomassa dal flusso di liquami.

Il sistema allora potrà essere sostituito concettualmente da quello seguente, in cui il tempo di residenza idraulico nel sistema coincide con il tempo di residenza idraulico nel reattore biologico.

REATTORE A COMPLETO MESCOLAMENTO CON RICIRCOLO DEI FANGHI E SPUGO DALLA LINEA DI RICIRCOLO



CFSTR a fanghi attivati con ricircolo e spurgo dalla linea di ricircolo

E' fondamentale definire il **tempo di residenza cellulare (o età del fango)**, che può essere ricavato dal rapporto tra la quantità di biomassa presente nel sistema e la quantità di biomassa spurgata da esso nell'unità di tempo (generalmente espressa su base giornaliera) allo scopo di mantenere costante la concentrazione di microrganismi nel reattore. In simboli:

$$\vartheta_c = \frac{VX}{Q_w X_R + (Q - Q_w) X_e} = \frac{\text{massa biologica nel reattore}}{\text{portata di massa biologica allontanata}}$$

Si noti che l'età del fango così definita rappresenta un valore medio del tempo di residenza della biomassa all'interno del sistema, e inoltre che tale definizione assume significato fisico soltanto nell'ipotesi di stazionarietà del sistema.