

BIOMIMETICA FUNZIONALE E BIOROBOTICA



L'osservazione morfologica e micromorfologica dei viventi ha permesso di sviluppare superfici, materiali e assemblare sistemi ibridi per replicare alcune funzioni degli organismi viventi adattandoli a contesi produttivi e comunque di interesse per la società.

Le sfide degli ultimi anni si sono rivolti alla 'replicazione' di processi funzionali che sono spesso frutto di un'evoluzione sia morfologica, sia fisiologica.

ELEMENTI CHIAVE:

- 1) I PROCESSI FUNZIONALI SONO DIVERSIFICATI NELLE DIVERSE SPECIE PER RISPONDERE A SPECIFICHE NECESSITÀ E RELAZIONARSI ALL'AMBIENTE;**
- 2) SONO IN FRUTTO DI UN LUNGO PROCESSO EVOLUTIVO CHE HA MODIFICATO GLI ORGANISMI SIA A LIVELLO MACROMORFOLOGICO , SIA MOLECOLARE.**
- 3) I SISTEMI FUNZIONALI HANNO NUMEROSI PROCESSI DI CONTROLLO E REGOLAZIONE, SONO DOTATI DI MECCANISMI DI RIPARAZIONE E SOSTITUZIONE CHE SONO MOLTO DIFFICILI DA RIPRODURRE ARTIFICIALMENTE.**

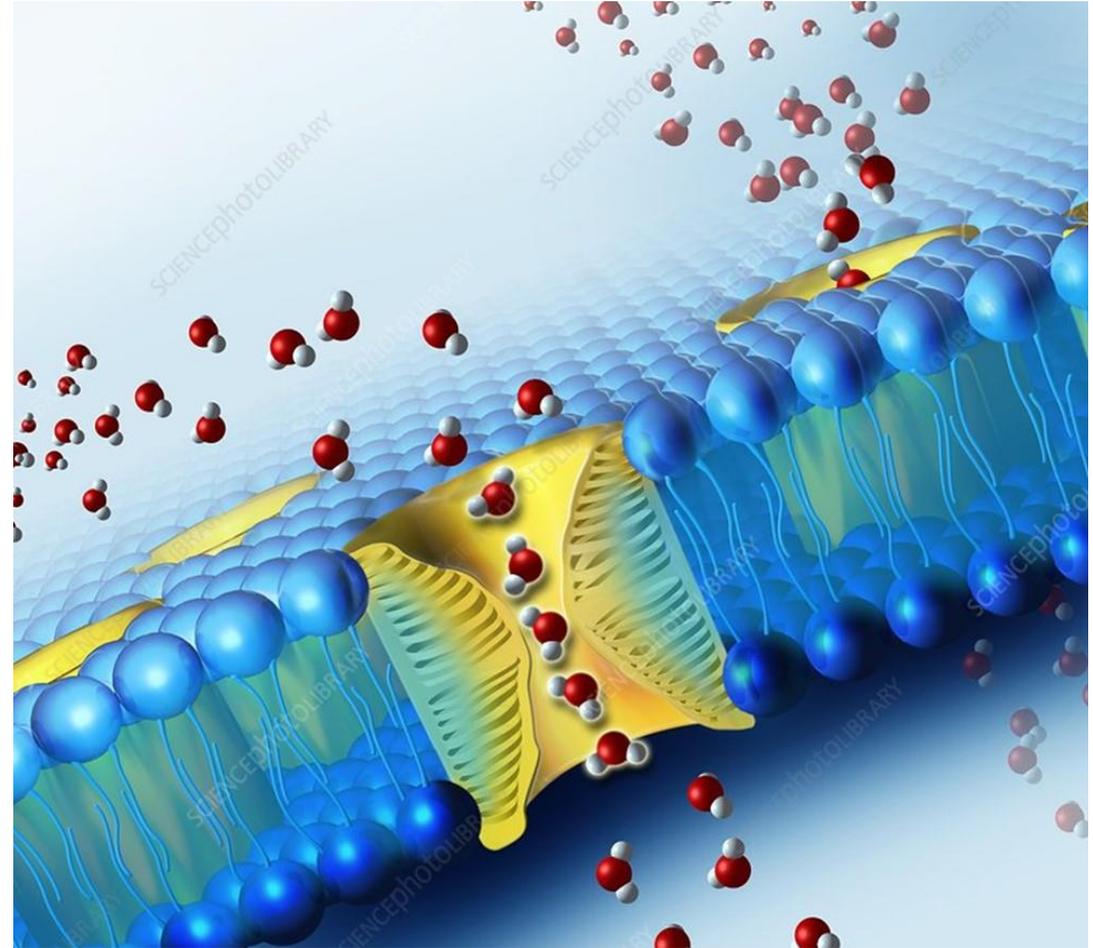
La SFIDA: la sfida più ardua non è replicare la morfologia o il processo fisiologico del vivente ma riprogrammarlo e adattarlo ad una esigenza reale per aumentare la resa e la sostenibilità rispetto all'attuale sistema in essere.

ISPIRAZIONI FUNZIONALI

A livello fisiologico una delle funzioni di maggiore ispirazione del mondo vegetale riguarda la relazione con l'acqua. Un processo che ha sicuramente attirato l'attenzione degli studiosi sono i meccanismi di 'filtrazione' e di ingresso selettività dell'acqua. L'idea di realizzare delle membrane 'attive' e semipermeabili magari con prodotti di origine naturale e non di sintesi chimica è molto interessante e sfidante. Questo potrebbe aumentare le rese, la selettività e rispondere alla domanda di sostenibilità del mercato.

Alcuni gruppi di ricerca si sono per esempio interessati alle **ACQUAPORINE** vegetali e le hanno inserite in membrane polimeriche artificiali per migliorare il flusso d'acqua e bloccare ioni e molecole indesiderate.

Il meccanismo da sfruttare è la 'forma' delle acquaporine; una struttura a clessidra che riduce lo spazio di passaggio tra la membrana a molecole molto piccole come l'acqua. Inoltre le acquaporine sono dotate di vestiboli extracellulari e intracellulari selettivi e distinti a ciascuna estremità. Questi vestiboli selettivi sono capaci per esempio di riconoscere molecole cariche! Insieme alla forma a clessidra, i vestiboli sono gli elementi di base della selezione senza impedire però la forza motrice: vi è quindi l'esclusione delle specie ioniche ma anche il rapido passaggio dell'acqua.



I dettagli molecolari sono fondamentali per poter creare 'nuove acquaporine' con diverse selettività! Indagini biochimiche e strutturali hanno permesso di sapere che la dimensione e la selettività di carica nelle acquaporine è legata ad alcune catene laterali sporgenti di fenilalanina, istidina e arginina. Analisi biofisiche hanno suggerito che il centro della forma a clessidra, che costituisce la costrizione del canale, ha un diametro di circa 0,28 nm e che questo è modificabile alterando la sequenza primaria della proteina.

L'arginina vicina al punto centrale del canale è carica positivamente e crea una barriera energetica che impedisce la permeazione di ioni e molecole cariche. Anche in questo caso sarebbe possibile regolare questo fattore modificando l'aminoacido.

Tratto da: L Sen Gupta, R., Padmavathy, N., & Bose, S. (2021). The Journey of Water Remediation through Biomimetic Strategies: A Mechanistic Insight. *Advanced Sustainable Systems*, 5(12), 2100213.

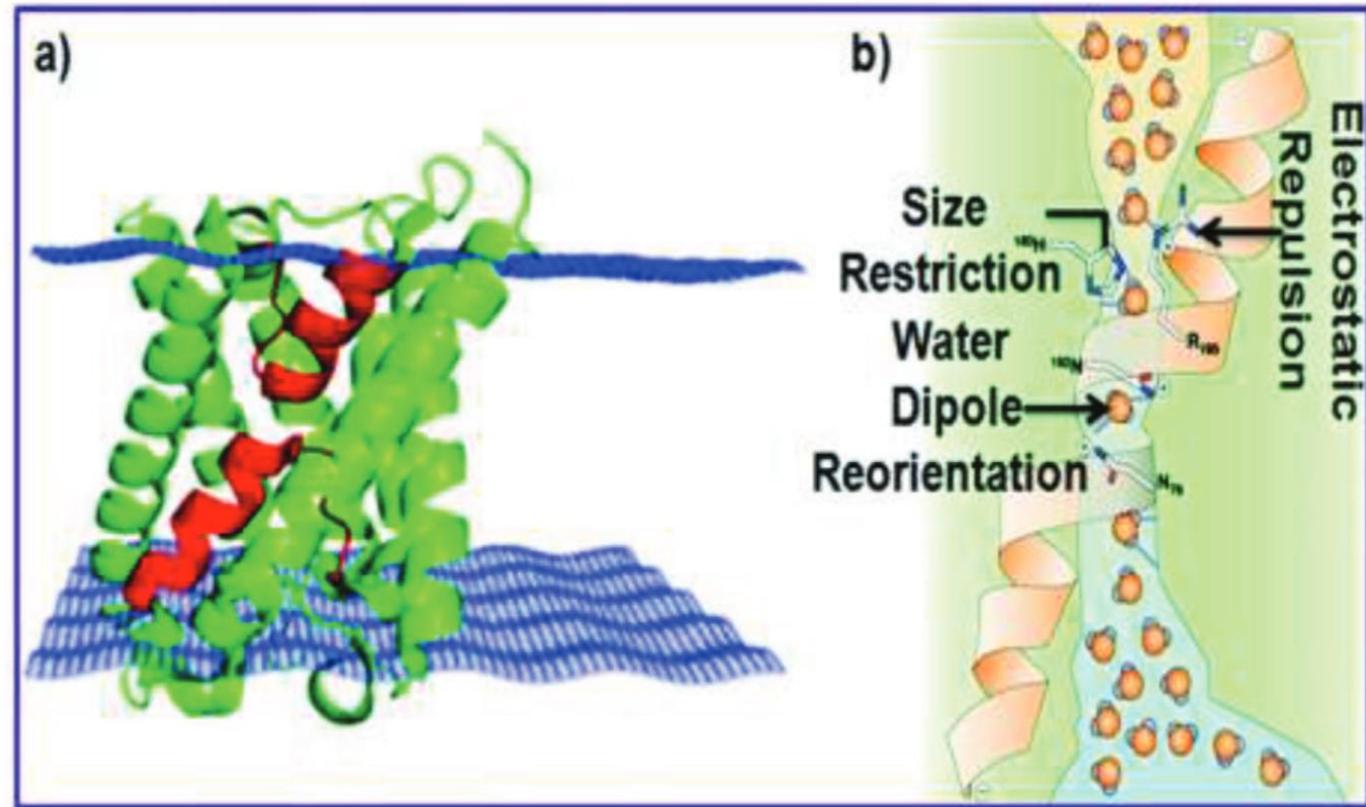
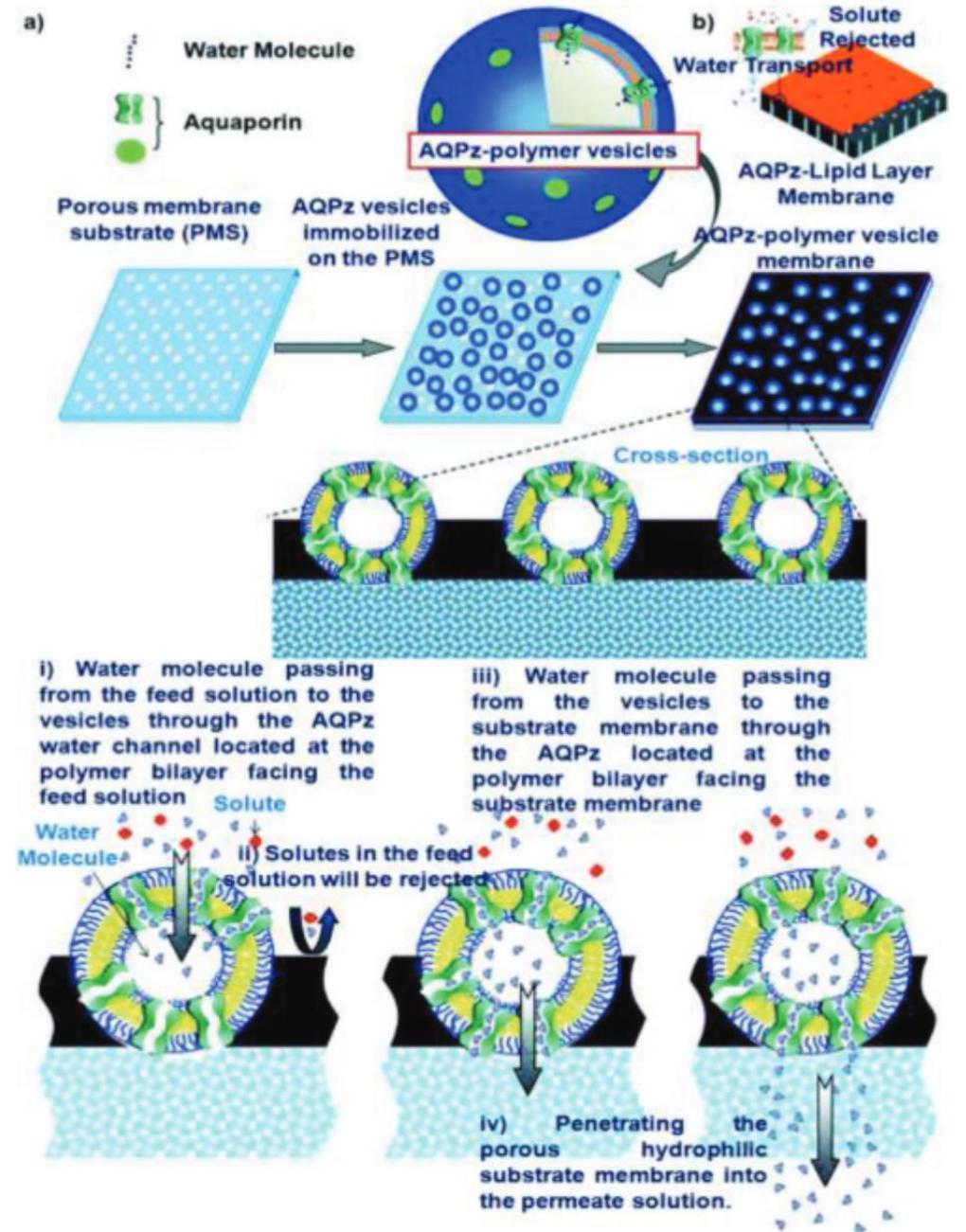
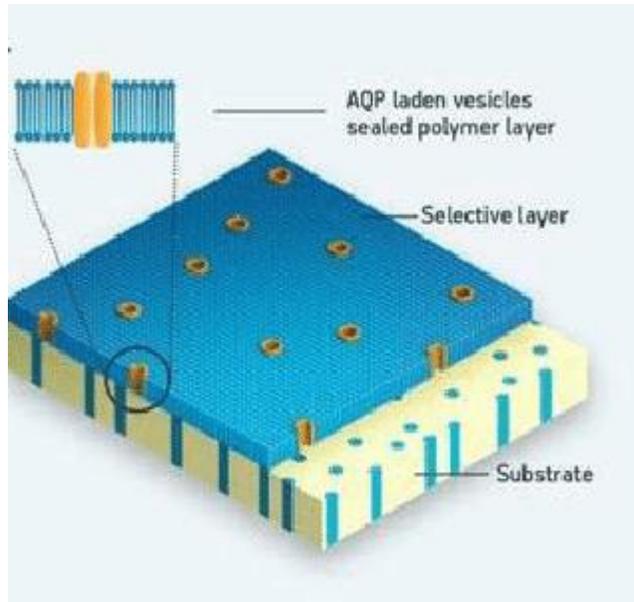


Figure 1. a) AQPz (*E. coli*) secondary structure. The re-entrant region is marked with red. The blue meshes are representative of the membrane borders, and b) the longitudinal section of the AQP1 water channel. Reproduced with permission.^[25] Copyright 2017, Royal Society of Chemistry.

Membrane artificiali contenenti acquaporine sono state realizzate. Queste proteine sono state inglobate in liposomi o in polimerosoni artificiali. Queste sfere contenenti acquaporine sono state poi adagate su superfici membranose. Sono state valutate diverse tecnologie per tenere insieme i liposomi in modo che l'acqua NON potesse passare esternamente ad essi.

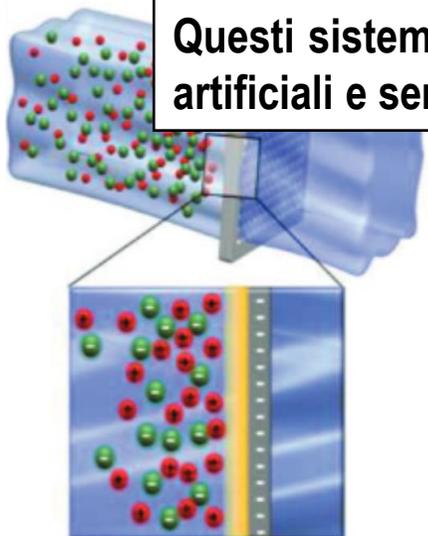
Diversi gruppi di ricerca hanno puntato su questa tecnologia ed hanno dimostrato che il sistema è molto selettivo per esempio nei confronti delle grosse molecole come gli zuccheri. Questo processo permette quindi di lasciarli fuori!

Una linea di attività molto rilevante intende sfruttare questi sistemi per dissalare l'acqua proprio per la selettività verso molecole cariche. Alcuni test hanno dimostrato un'efficacia superiore al 50% nell'eliminazione del sale dall'acqua di mare!



Mangrovie che lasciano fuori il sale

Rhizophora stylosa, una specie di mangrovie (Bruguiera) sfrutta un meccanismo particolare per NON assorbire il sale. L'analisi della radice ha dimostrato che vi sono tre strati diversi di porzione corticale: uno esterno più permeabile, uno interno più lasso ed il secondo che invece ha una struttura microporosa simile a una membrana con diametro in regime nanometrico. Questo è l'elemento centrale di selezione. Studi molecolari hanno evidenziato che questo strato è capace di escludere ioni sodio e cloro! Sotto il modello sintetico.



Questi sistemi potrebbero essere alla base di dissalatori artificiali e semiartificiali

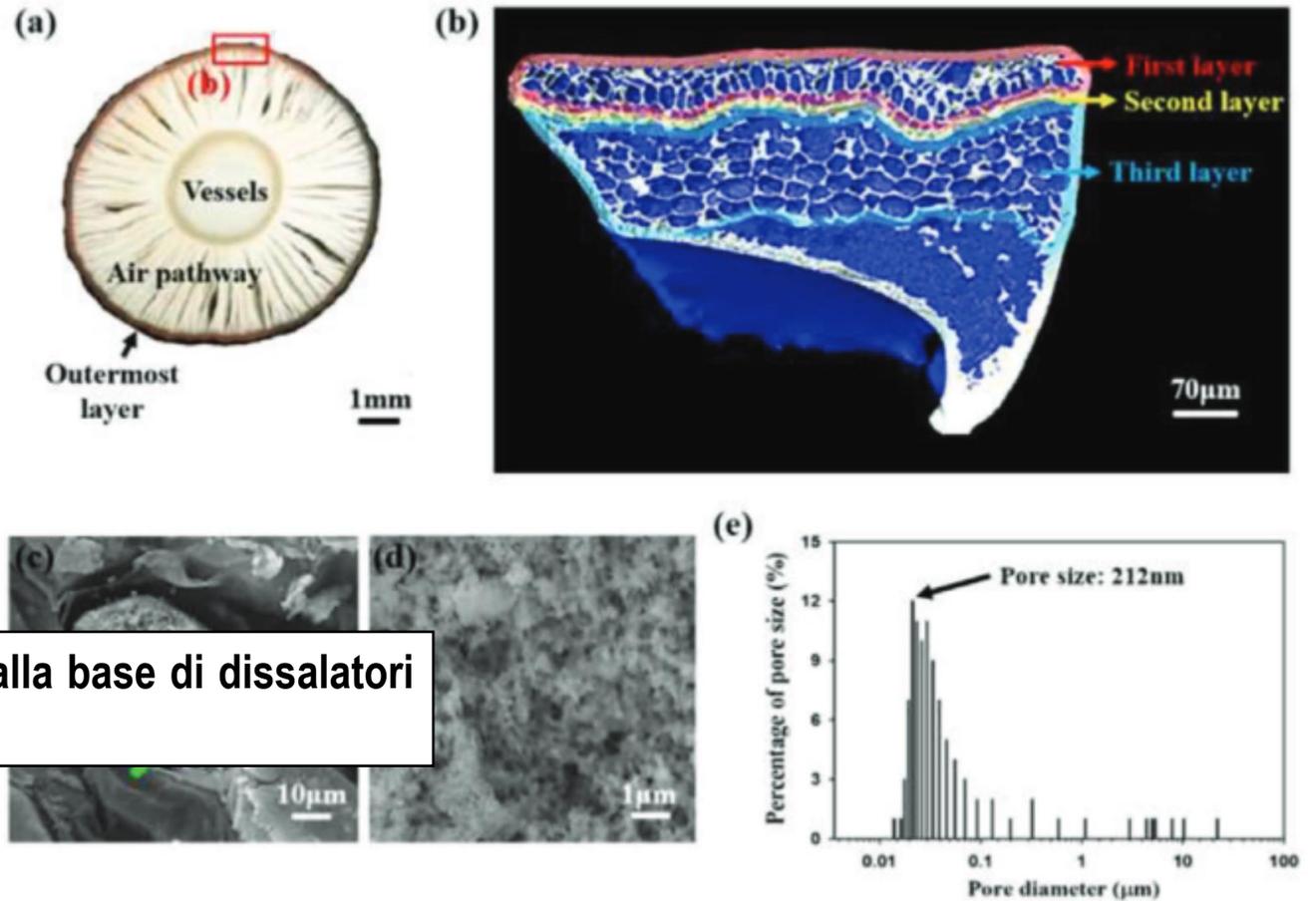


Figure 4. Three-layered structure of mangrove roots. a) Cross-sectional image, exhibiting all the three parts. b) Recreated X-ray image showing the internal morphologies. c) A porous membrane is contained in the second layer with a nanometric pore size distribution. d) Amplified view of a selected portion of the membrane (green arrow). e) Percentage pore size distribution, calculated from mercury porosimetry. Reproduced with permission.^[52] Copyright 2016, Springer Nature.

RECUPERARE ACQUA DALL'ARIA

Osservando i cactus nei deserti è stato possibile sia comprendere come fanno a ridurre evapotraspirazione (ad esempio trasformando foglie in spine!), sia capire come riescono a raccogliere e trasporta l'acqua attraverso microcapillari. Per esempio *Opuntia microdasys* L. sarebbe in grado di raccolta acqua nell'atmosfera grazie a piccole barbe su spine di forma conica. Inizialmente, la raccolta di goccioline d'acqua avviene sulle piccole punte e man mano che le goccioline crescono, si spostano nella parte centrale. Qui ci sono dei tricomi che favoriscono l'assorbimento di acqua nel mesofillo.

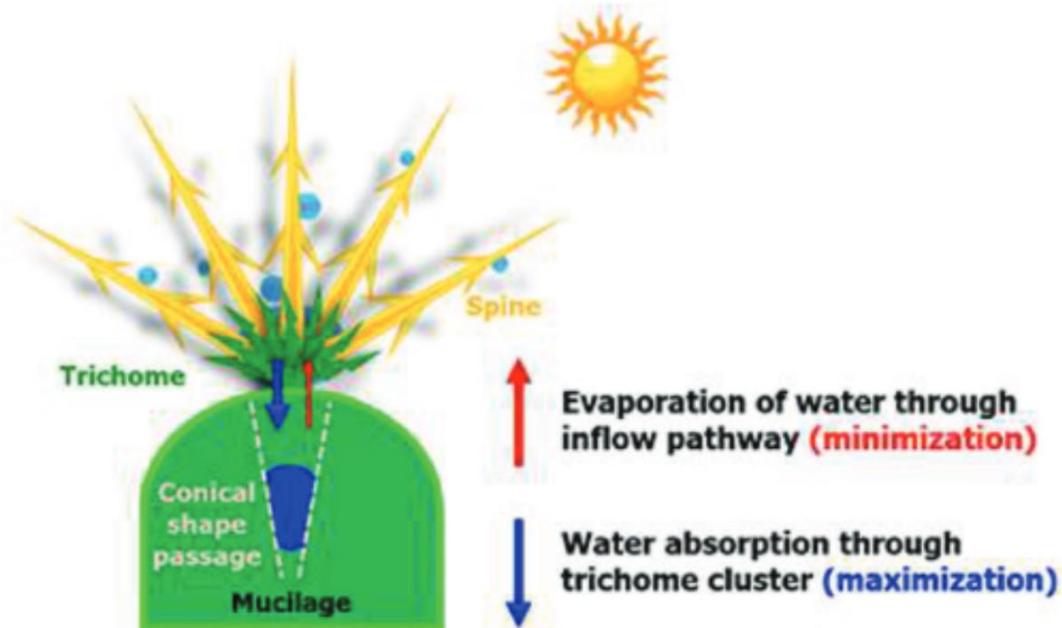


Figure 6. Schematics depicting the water-absorbing mechanism of the cactus. Reproduced with permission.^[69] Copyright 2017, Frontiers.

I ricercatori hanno progettato e realizzato un sistema che imita il cactus. Si tratta di una serie di fili zinco corti collegati a fili più grandi. Le strutture coniche sono state formate da questi fili impilandoli in modo tale che i diametri alla fine aumentassero dalla punta alla radice. Questo gradiente di diametro ha indotto una forza capillare che ha spinto le goccioline di acqua condensata dalla punta del filo alla radice. L'efficienza di raccolta dell'acqua di queste strutture artificiali è risultata migliore di quelle dei cactus!

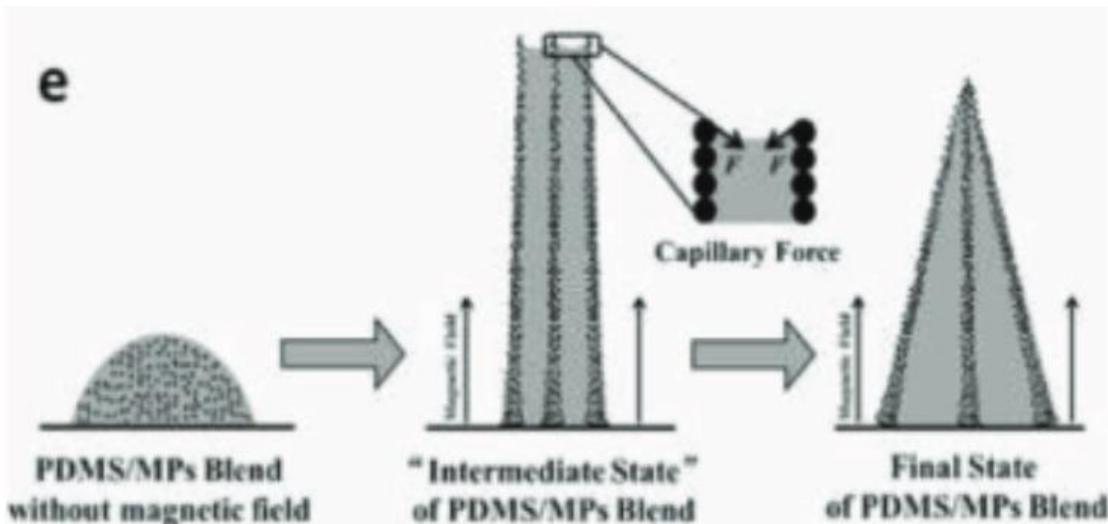
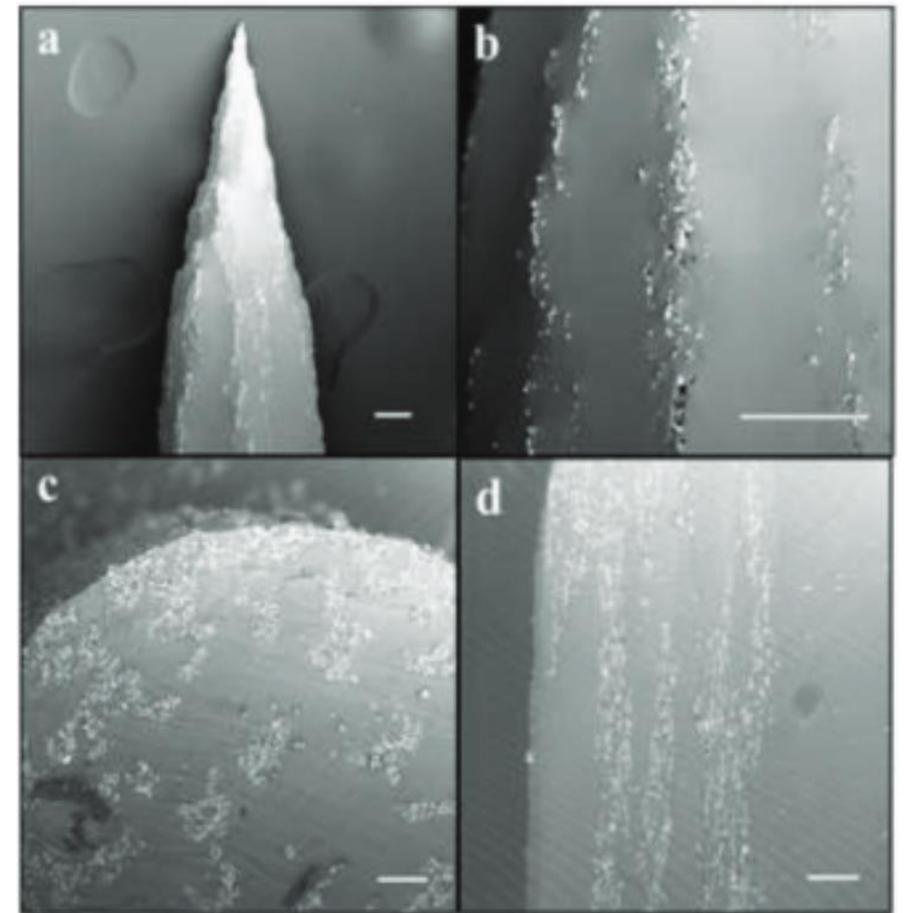


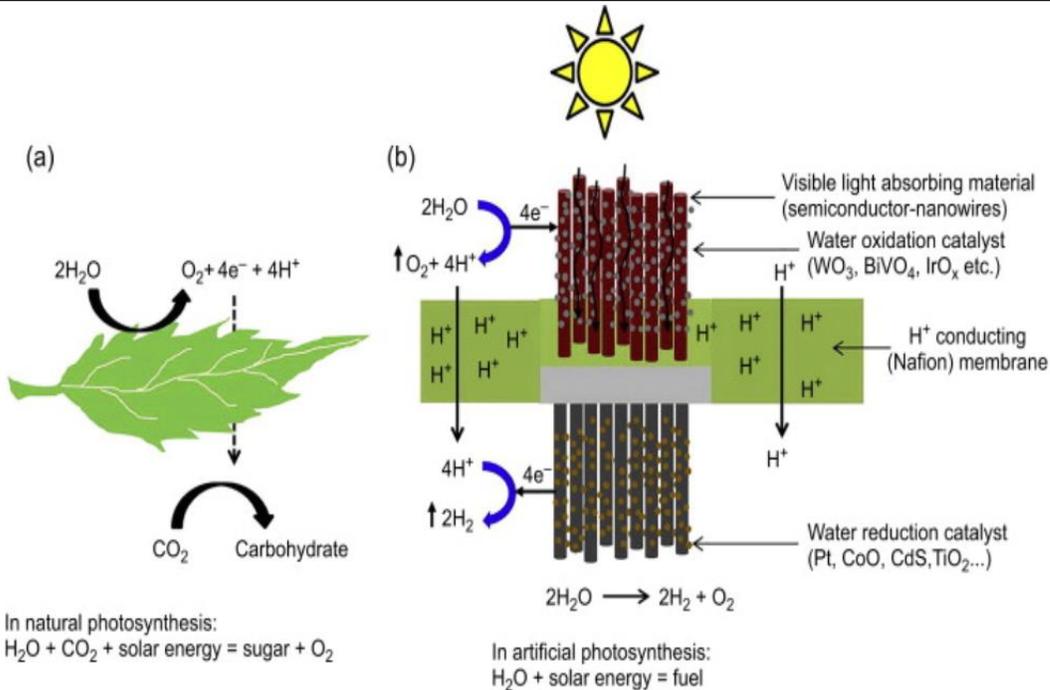
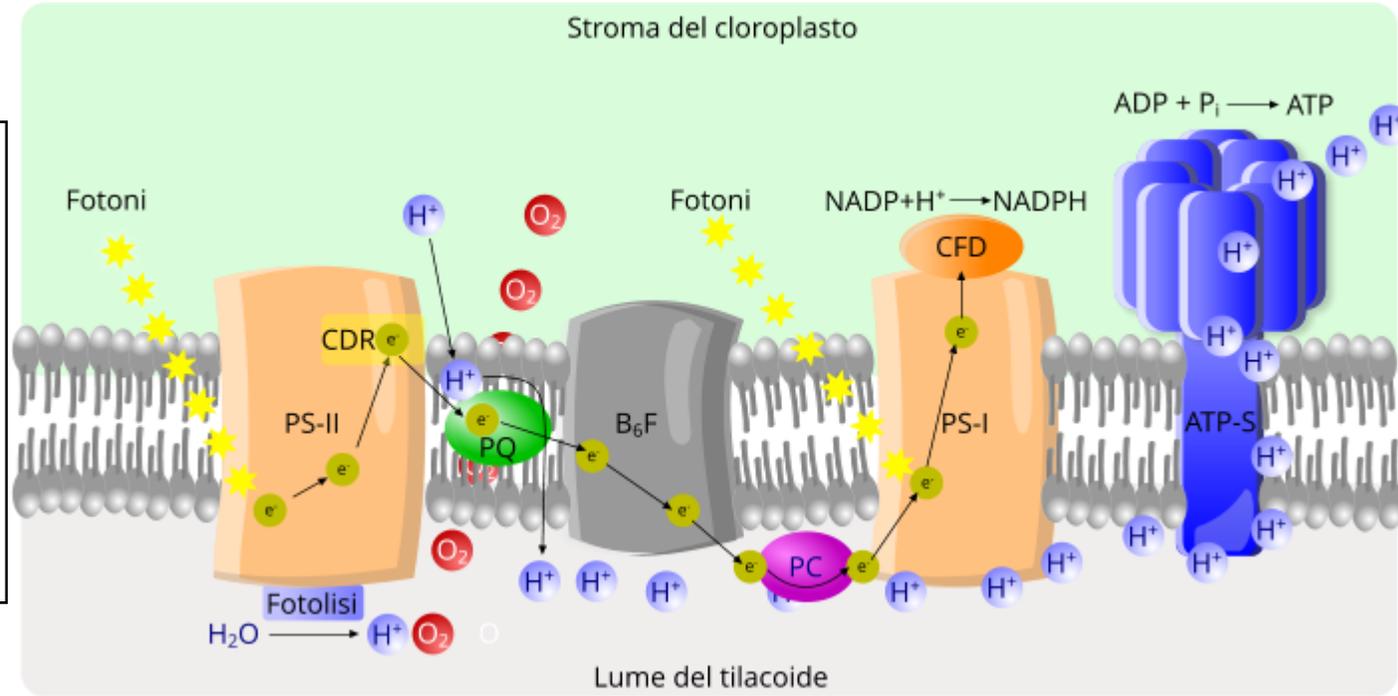
Figure 7. Schematics showing the mechanism adopted by the resultant micro-tip and the ESEM images. a) Tip-site morphology and b) micro-tip showing "ridge-structure." c) Cross-section and d) the longitudinal section of the micro-tip.^[6] Copyright 2014, Wiley-VCH GmbH.



Strutture analoghe sono state realizzate anche con materiali polimerici come una miscela di polidimetilsilossano (PDMS) e particelle magnetiche (MP). Applicando campi magnetici esterni si riescono a modellare le forme dei materiali finali. Anche in questo caso le punte funzionavano bene ed in collettore di acqua alla base raccogliere l'acqua atmosferica.

La fotosintesi sintetica!

La fotosintesi è forse il processo più studiato e imitato! Punto chiave della fotosintesi oltre all'efficienza delle strutture (cattura, trasporto degli elettroni e sintesi del glucosio) è la **SINTONIZZAZIONE** tra questi processi. Dal punto di vista strutturale il trasferimento direzionale degli elettroni e la separazione stabilizzata della carica alle sequenze di reazione secondarie sono punti centrali che l'evoluzione ha ottimizzato in milioni di anni.



Il primo punto di modifica tra la fotosintesi 'naturale' e quella artificiale è l'uso dell'energia di ossidazione per generare energia elettrica o comunque potenziale sfruttabili da trasformare in energia immagazzinabile. Le tecnologie si sono concentrati su realizzare nanofili capaci di trasportare elettroni e protoni derivati dalla fotolisi.

Nell'ultimo decennio sono state sviluppate molte ricerche per progettare sistemi artificiali, naturali o ibridi nano-bioibridi capaci di ottimizzare i processi di cattura dell'energia solare e trasformazione in energia chimica o fisica utilizzabile dall'uomo.

Tra i componenti biologici utilizzati per creare un sistema nano-bioibrido vi sono biomolecole purificate come proteine, DNA e RNA e addirittura intere cellule, tessuti e organismi semplici. D'altra parte, i componenti sintetici utilizzati sono materiali inorganici (ad es. ossido di ferro, carbonato di calcio, materiali di carbonio, biossido di silicio o quarzo e oro), materiali organici come derivati polimerici di lipidi e affini o materiali ibridi come reti metallo-fenoliche (MPN) e strutture metallo-organiche (MOF)

PERCHE' È COSÌ IMPORTANTE

- 1) I PANNELLI SOLARI PIÙ EVOLUTI SONO IN GRADO DI TRASFORMARE LA LUCE SOLARE IN ENERGIA ELETTRICA CON UN SUCCESSO DI CIRCA IL 20%. LE PIANTE CON LA FOTOSINTESI RAGGIUNGONO UNA COVNERSIONE DEL 60%.**
- 2) LA FOTOSINTESI CONSENTE DI REALIZZARE PRODOTTI DI VARIA NATURA E SOPRATUTTO DI CONVERTIRE CO₂ CHE È UNA SFIDA GLOBALE: ENERGIA PULITA!**

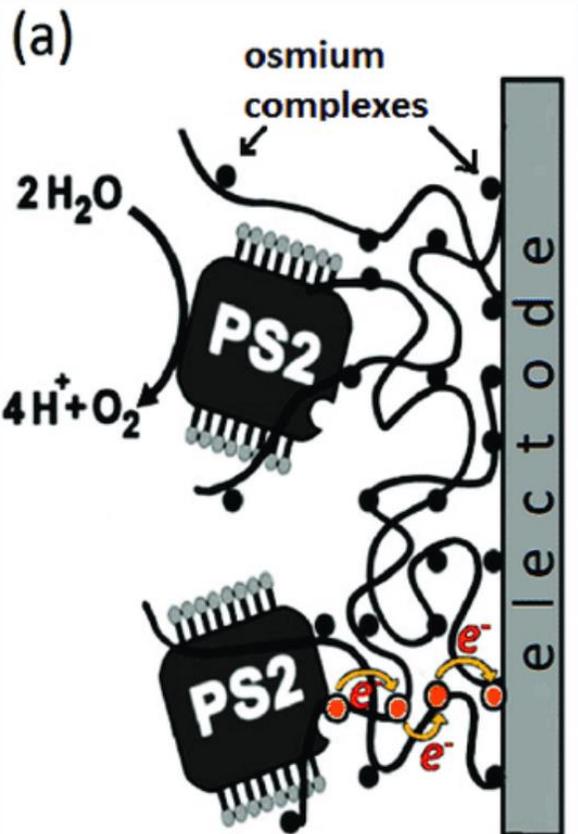
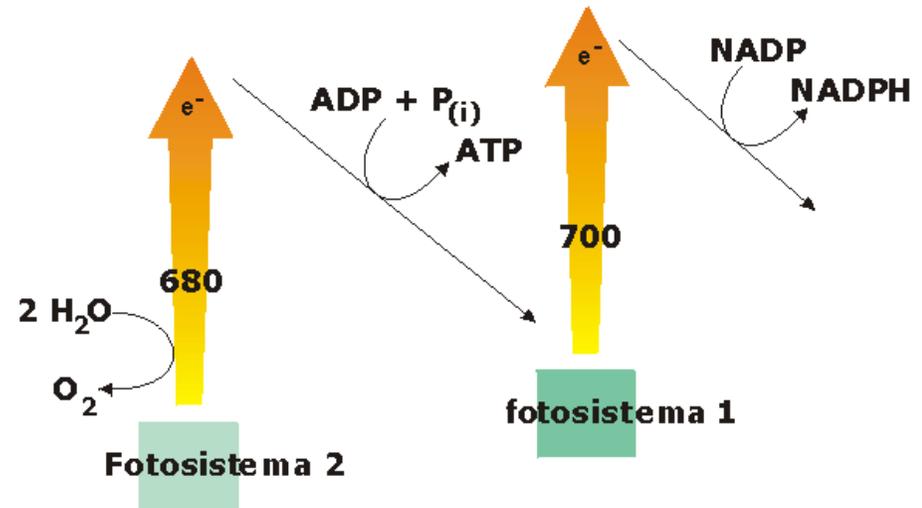


COME SELEZIONARE IL SISTEMA MIGLIORE?

La fotosintesi artificiale (AP) richiede la progettazione di un sistema in grado di assorbire prontamente ed efficacemente la luce, trasportare e separare le cariche elettriche e infine catalizzare la reazione per produrre carburante. L'intero processo deve funzionare in modo sincrono in modo da non perdere energia e convogliarla in un sistema di raccolta efficiente.

Potere ossidante del fotosistema II

Il fotosistema II (PSII) è uno dei complessi più studiati in quanto oltre alla raccolta della luce e capace di scindere l'acqua per rilasciare O_2 , protoni ed elettroni. Il PSII ha quindi un potere ossidante molto elevato pari a circa 100 molecole d'acqua al secondo in piena luce solare. Questi valori sono molto più alto dei tassi di ossidazione dei catalizzatori di sintesi prodotti dall'uomo.



Negli ultimi 30 anni sono state portate avanti numerose ricerche per riprodurre questo fotosistema. In generale i processi si basano sul introdurre materiali sintetici che accoppiati con le proteine del fotosistema consentendo la distribuzione della sua proprietà fotocatalitica e dei prodotti per la conversione della luce in energia chimica e la generazione di fotocorrente. Nella fase iniziale della ricerca, il PSII era "cablato" alla superficie dell'elettrodo delle celle fotoelettrochimiche (PEC) tramite intrappolamento in una matrice fatta di polimero redox modificato con osmio per fungere da donatore di elettroni o fotocatalizzatore.

Nel tempo c'è stata una evoluzione: dalla due dimensioni (2D) a tre dimensioni (3D). L'obiettivo è stato massimizzare l'area di assorbimento della luce e offrire un'elevata resa. Sono state realizzate diverse sistemi bionici come strutture di membrane, liposomi e polimeri di varia natura.

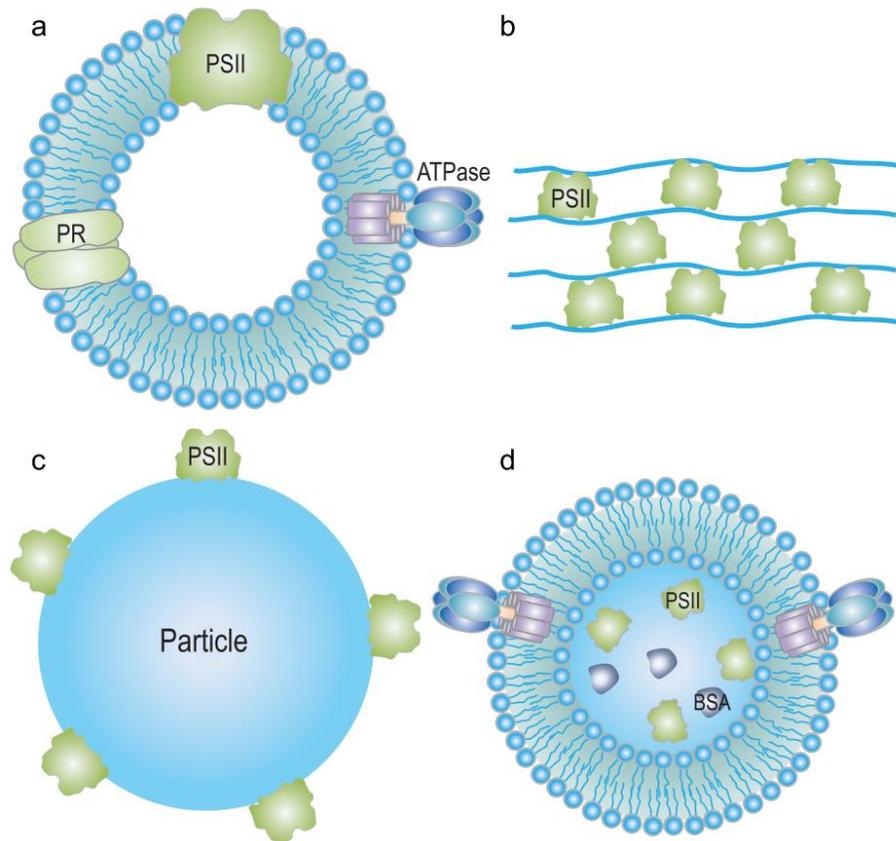


Figure 2. PSII-based biomimetic structures. (a) PSII couples with ATPase and proteorhodopsin (PR) into the membrane of a lipid vesicle. (b) PSII assembles in the polymeric multilayer films via a layer-by-layer assembly process. (c) The PSII-particle conjugates: PSII anchors on the surface of the particle. (d) The PSII-enriched particle with an ATPase-lipid coating.

Le membrane lipidiche offrono una piattaforma ideale per realizzare un sistema chiuso e sono supporti ad elevata biocompatibilità: stabilizzano le biomolecole ospiti e sono in grado di promuovere una successione di elementi. Sono anche in grado di regolare le proprietà fisico-chimiche richieste dai componenti biologici. Generalmente, le membrane lipidiche ancorano il PSII attraverso un processo di fusione della membrana e sono già stati realizzati prototipi di vescicole lipidiche giganti con PSII, proteorodopsina (PR) e ATPasi, che forma un organello fotosintetico per la sintesi di ATP (Fig. 2a)

In generale le membrane lipidiche sono sistemi artificiali in cui i componenti sono rigorosamente costituiti da composti anfifilici. Si possono usare anche proteine e stabilizzanti per aumentare l'efficienza. Per esempio l'inserimento del colesterolo si è dimostrato efficace nel facilitare lo stato di ordine dei fosfolipidi ed è anche utile nella regolazione delle prestazioni elastiche e delle proprietà viscosse della struttura.

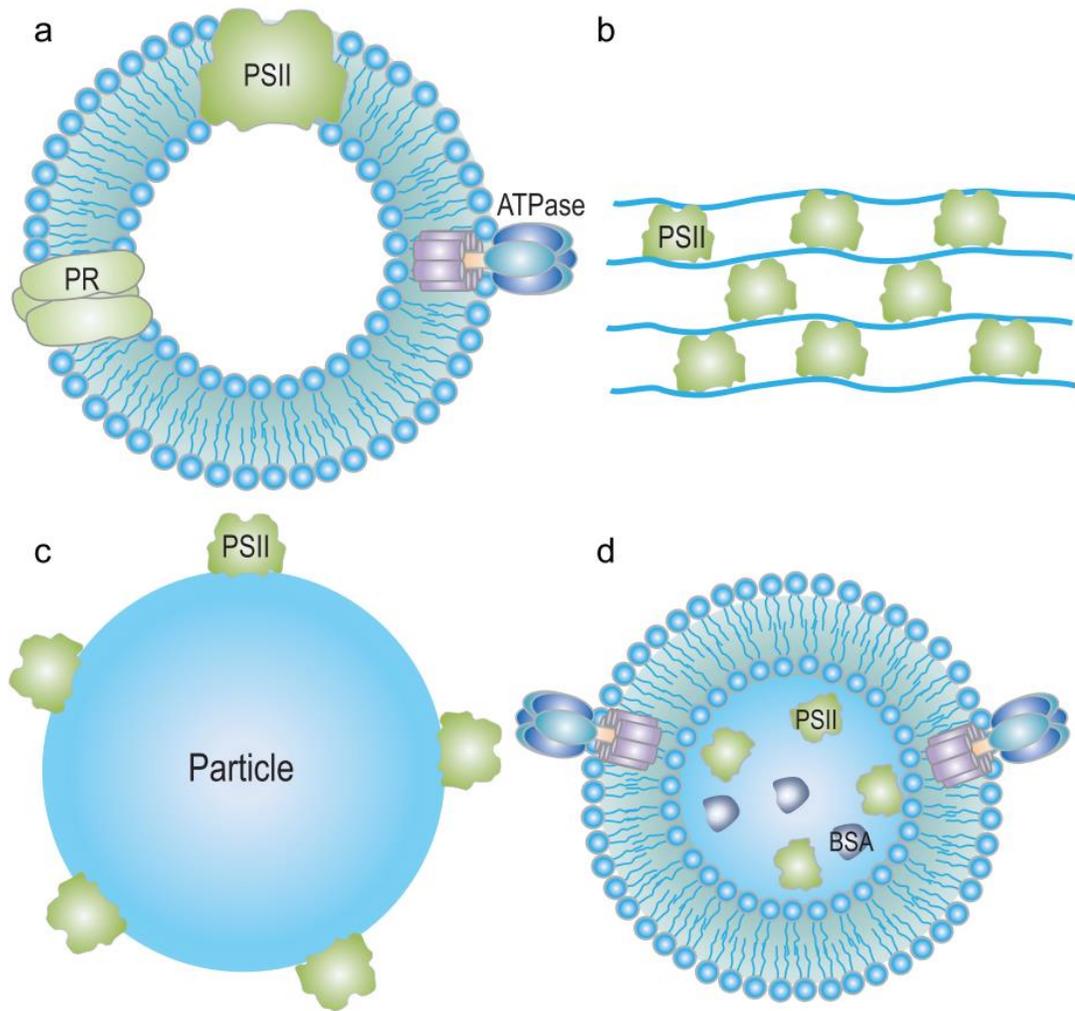


Figure 2. PSII-based biomimetic structures. (a) PSII couples with ATPase and proteorhodopsin (PR) into the membrane of a lipid vesicle. (b) PSII assembles in the polymeric multilayer films via a layer-by-layer assembly process. (c) The PSII-particle conjugates: PSII anchors on the surface of the particle. (d) The PSII-enriched particle with an ATPase-lipid coating.

Sono stati condotti anche numerosi studi sulla stabilizzazione del PSII sfruttando nanoparticelle. In generale, le nanoparticelle hanno un'area superficiale elevata e superfici progettate in modo flessibile, che sono attraenti piattaforme per il legame con le proteine. Sono stati realizzati legami stabili tra il PSII e nanoparticelle d'oro e di platino e questo ha permesso una maggiore durata del sistema artificiale rispetto a PSII libero.

Un sistema innovativo prevede di operare dentro questi sistemi lipidici modificando le relazioni tra le strutture. Per esempio in (Fig 2d) nella membrana lipidica oltre al PSII è stata incorporata una ATPasi per coniugare la scissione dell'acqua e la sintesi di ATP. Rispetto ai sistemi precedenti che si concentravano solo sul monetizzare il potere ossidante per esempio prendendo H^+ dell'acqua e producendo H_2 , in questo caso si ottiene ATP, una molecola ad elevata energia.

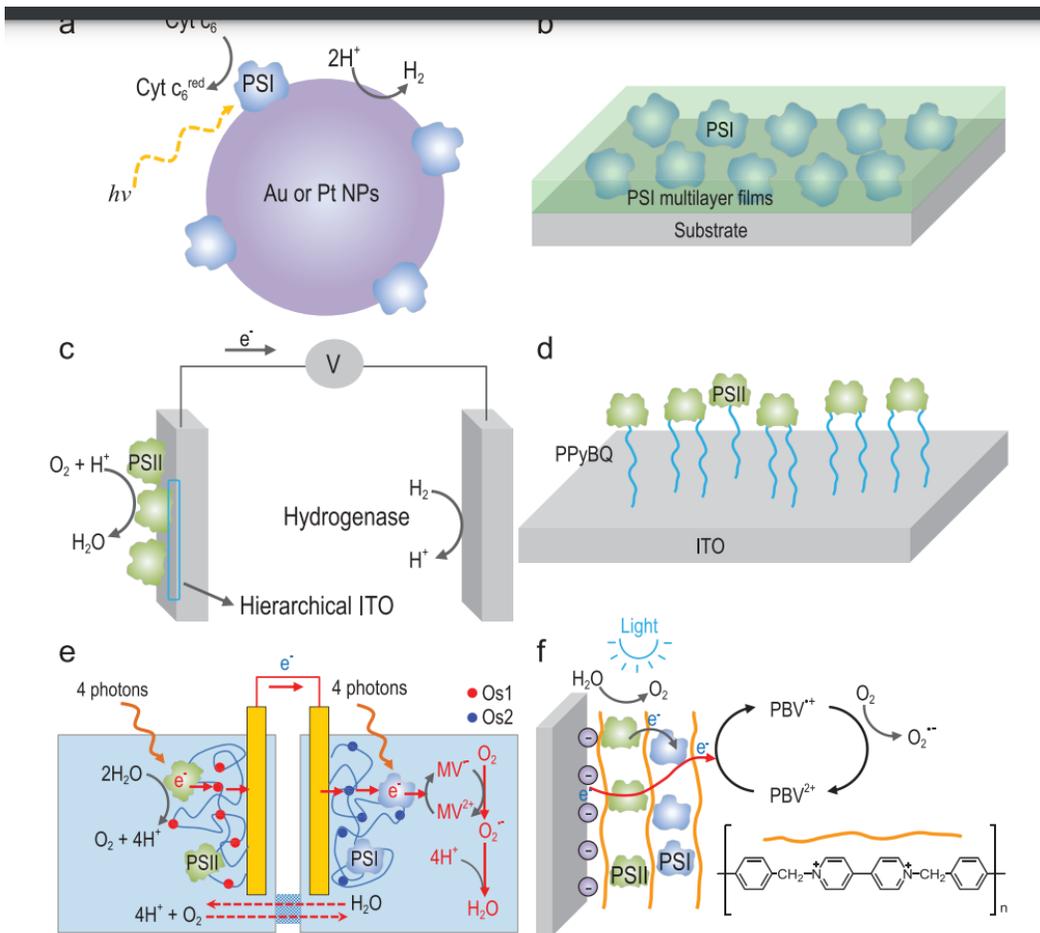


Figure 3. Electron transfer systems based on photosystem proteins range from PSI, PSII to PSI-PSII. (a) PSI-anchored Au or Pt nanoparticles for hydrogen production. (b) PSI-enriched multilayer films for photocurrent production. (c) PSII pairs with hydrogenase for photoelectrochemical water splitting. (d) PPyBQ nanowire-supported PSII-enriched membrane as a photoanode to generate photocurrent. (e) Full Z-scheme mimetic strategy using PSI-based photocathode and a PSII-based photoanode to generate electrical energy. Reprinted with permission from Ref. [78], Copyright 2015, Wiley-VCH. (f) Bias-free water splitting system comprises multilayered PSII/PSI as $PBV^{2+}/PSI/PBQ/PSII$. Reprinted with permission from Ref. [79], Copyright 2013, Wiley-VCH.

In ambito fotosintetico e fotoenergetico i maggiori investimenti tecnologici riguardano da un lato i materiali con particolare riferimento ai nanomateriali e dall'altro l'organizzazione. Un punto chiave è la stratificazione preciso e l'assemblaggio degli elementi per garantire un flusso efficiente e direzionato di energia.

Ad esempio, in figura 3a si possono osservare sistemi di nanoparticelle tramite platinizzazione auto-organizzata o modifica della superficie su nanoparticelle nobili per condurre la produzione di idrogeno. In fig 3b si vede un possibile assemblaggio del 3a su una superficie che potrebbe essere vetro in cui si stratificano i diversi PSI combinati con nanoparticella per ottimizzare le rese.

Il PSII viene più sfruttato per le sue proprietà di scindere l'acqua (3C) è questo genera elettroni quindi corrente. In questo ambito le ricerche sono state rivolte a materiali conduttori e accumulatori capaci di conservare e trasferire questa energia come l'ossido di titanio o il grafene.

Le sfide future (3e ed f) riguardano la capacità di accoppiare i due fotosistemi in modi differenti per ottimizzare il recupero di energia, ridurre stati di stress ossidativo e aumentare la durata nel tempo.

NON SOLO PARTE LUMINOSA: Ciclo di Calvin per cambiamento climatico

ACS
Sustainable
Chemistry & Engineering

pubs.acs.org/journal/ascecg

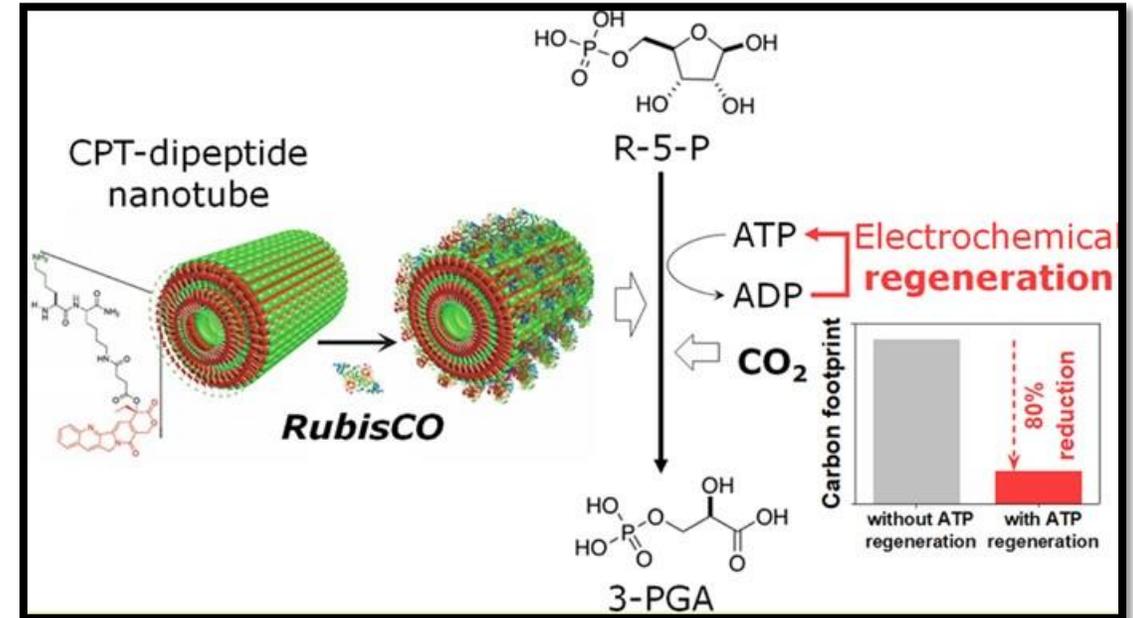
Research Article

Carbon Footprint of Biomimetic Carbon Fixation by Immobilizing Nature's CO₂-sequestering Enzyme and Regenerating Its Energy Carrier

Kyuha Lee, J. Parker Evans, Sriram Satagopan, Yuan Sun, Jon R. Parquette, Vishnu Baba Sundaresan, F. Robert Tabita, and Bhavik R. Bakshi*

Cite This: *ACS Sustainable Chem. Eng.* 2020, 8, 16833–16841

Read Online



Il ciclo di Calvin della fotosintesi ha come enzima centrale, la Rubisco che catalizza la conversione del ribulosio 1,5-bisfosfato in acido 3-fosfoglicerico (3-PGA) mentre incorpora la CO₂ atmosferica in una molecola organica. L'uomo si è ispirato alla Rubisco come enzima capace di sequestrare la CO₂ fissandola in strutture stabili.

L'idea di questo lavoro è stata quella di immobilizzare Rubisco in nanostrutture per formare complessi funzionali di 3-PGA. Da questa molecola si possono ottenere anche composti diversi dal glucosio come alcuni aminoacidi.

Il lavoro ha considerato sia varianti di supporto come nanostrutture e nanofibre diverse, sia la trasformazione del 3-PGA in serina come molecola ad elevato valore aggiunto. La serina può infatti essere sintetizzata con un processo consequenziale: un primo enzima, 3-deidrogenasi (PGDH; serA) catalizza l'ossidazione del 3-PGA in 3-fosfo-idrossipiruvato (3-PHP). Quindi, il 3-PHP viene convertito in 3-fosfo-serina (3-PS) utilizzando un enzima fosfo-serina transaminasi (PSAT; serC) e L-glutammato. Infine, 3-PS viene idrolizzato a L-serina utilizzando un enzima fosfo-serina fosfatasi (PSP; serB) e acqua.

USO DELLE PIANTE COME SUBSTRATO E COME MOLECOLE FUNZIONALI

Trends in Biotechnology

Special issue: Biomass as a path to sustainability

Review

Design of biomass-based renewable materials for environmental remediation

Wan Zhang,^{1,2,4} Peng Zhang,^{1,2,4} Huaimin Wang,^{1,2,4} Jinghao Li,³ and Susie Y. Dai^{1,2,*}

Various materials have been used to remove environmental contaminants for decades and have been an effective strategy for environmental cleanups. The current nonrenewable materials used for this purpose could impose secondary hazards and challenges in further downstream treatments. Biomass-based materials present viable, renewable, and sustainable solutions for environmental remediation. Recent biotechnology advances have developed biomaterials with new capacities, such as highly efficient biodegradation and treatment train integration. This review systemically discusses how biotechnology has empowered biomass-derived and bioinspired materials for environmental remediation sustainably and cost-effectively.

Highlights

Traditional biobased adsorbents heavily rely on biomass carbonization and aim at high adsorption capacity and recyclability.

Chemical or biological modifications of lignocellulosic biomass enable diversified remediation material designs. Integrating biomolecules such as enzymes or microbes with lignocellulosic biomass facilitates contaminant removal and degradation in the same space.

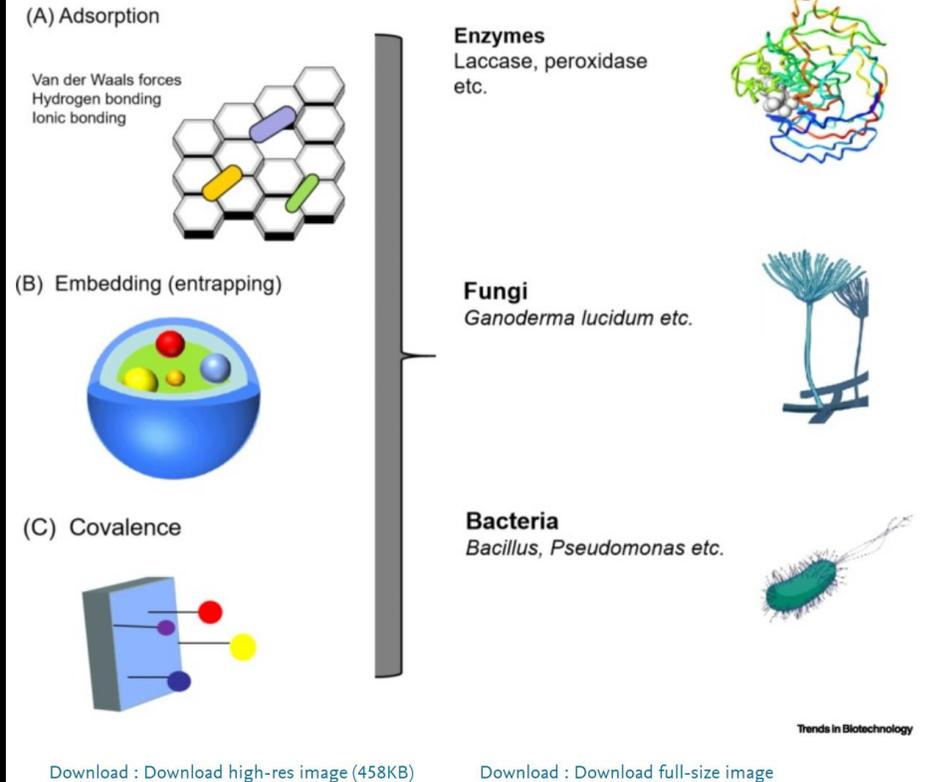


Figure 1. Immobilization technologies for biobased adsorption materials.

Le biotecnologie producono innovazioni di processo che guardano sempre più verso la sostenibilità per questo cercano di combinare materiali di scarto come scarti lignino-cellulosici e componenti attive come enzimi, vie metaboliche o organelli.

Un esempio sono le biomasse funzionalizzate con nanoparticelle o catalizzatori. Per esempio la lignina è stata amminata per rimuovere coloranti a base azotata dalle soluzioni acquose. Allo stesso modo lignina basica è stata caricata con particelle di idrossido di lantanio su scala nanometrica che viene impiegato per rimuovere il fosfato dalle acque reflue. I microcristalli di cellulosa sono stati funzionalizzati con polietilenammina per rimuovere le sostanze alchiliche poli e perfluorate (PFAS) dall'acqua.

Main component from biomass	Biomass material type	Contaminant	Primary mechanism for removal of contaminants
Biomass-derived powder/particles			
Lignin	Aminated CELF lignin-derived powder	Azo dye	Electrostatic interaction, hydrogen bonding and π - π stacking
Alkali lignin	PEI-graft-alkali lignin with nanoscale lanthanum hydroxide	Phosphate	Surface precipitation and ligand exchange
Cellulose	PEI-modified cellulose microcrystals	PFAS	Electrostatic interaction and physical adsorption

3D porous material foam			
Nanocellulose	Nanocellulose-based foams	Oil	Physical adsorption, such as hydrophobic reaction
Nanocellulose	Nanocellulose aerogels	Cation dye	Electrostatic attraction
Nanocellulose	Cellulose and MOF aerogels	Organic dyes	Intraparticle diffusion
Spent coffee	Spent coffee bioelastomeric foam	Pb ²⁺ and Hg ²⁺	Electrostatic attraction
Loofah plant	3D functionalized carbon/tin(IV) sulfide biofoam	Cr ⁶⁺	Physical adsorption and photocatalytic

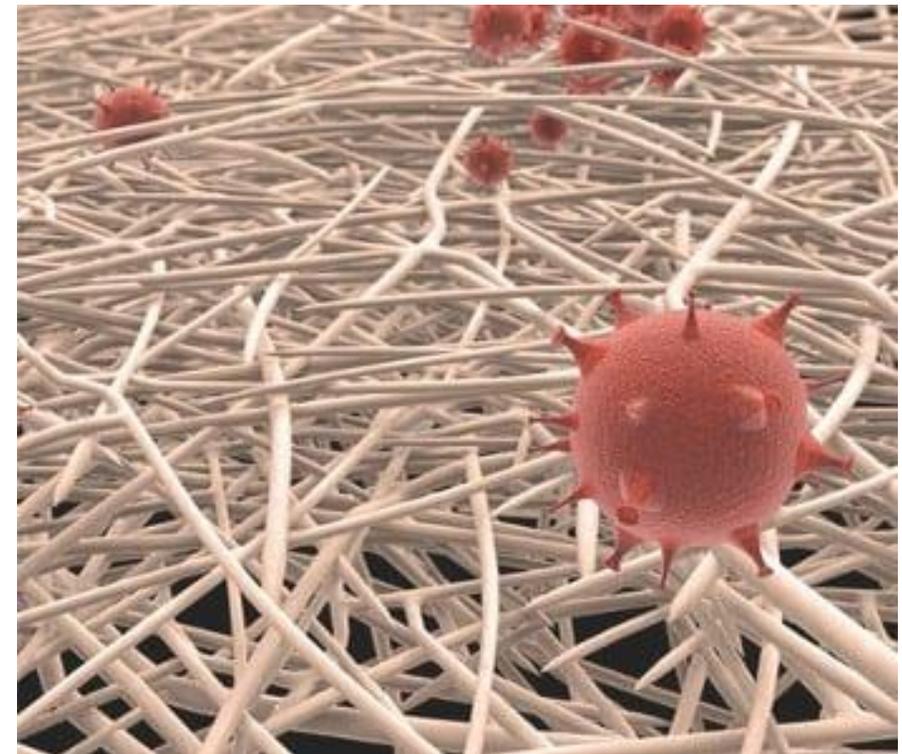
I polimeri di biomassa a basso costo come la cellulosa, l'alginato di sodio e la gomma di guar sono stati usati come precursori per produrre schiume ecocompatibili per il risanamento ambientale.

Le schiume a base di nanocellulosa sono state sviluppate come un promettente modello poroso 3D per la separazione olio/acqua. I recenti progressi della biotecnologia hanno lavorato per ottimizzare le strutture 3D di questi polimeri ed aumentarne l'efficienza funzionale. Ad esempio sono state realizzate aerogel di nanocellulosa capaci di rimuovere coloranti cationici.

Il caffè esaurito è stato utilizzato per preparare un composito in una schiuma bioelastomerica per rimuovere Pb²⁺ e Hg²⁺ dall'acqua, con elevate capacità di adsorbimento

Biopolymer processed nanofibers			
Nanocellulose	Cellulose nanofibers	Cd ²⁺	Electrostatic interaction
Cellulose	Esterified cellulose nanofibers	Ciprofloxacin and ofloxacin	Electrostatic interaction, π-π interactions, and hydrogen bonding
Cellulose	Cellulose nanofibers	Cationic and anionic dyes	Electrostatic interaction
Cellulose	2,2,6,6-Tetramethylpiperidine-1-oxyl radical-mediated oxidized cellulose nanofibers	Cu ²⁺	Electrostatic interaction
Cellulose	2,2,6,6-Tetramethylpiperidine-1-oxyl radical-mediated oxidized cellulose nanofibers	Methylene blue dye	Electrostatic interaction

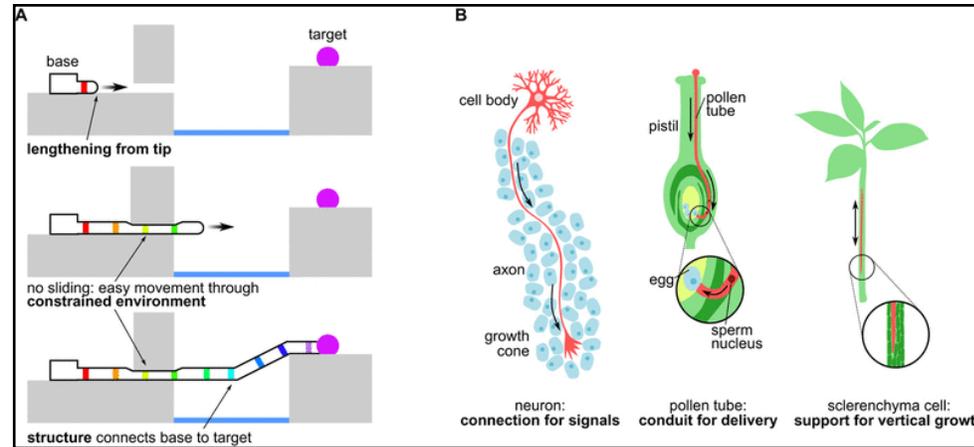
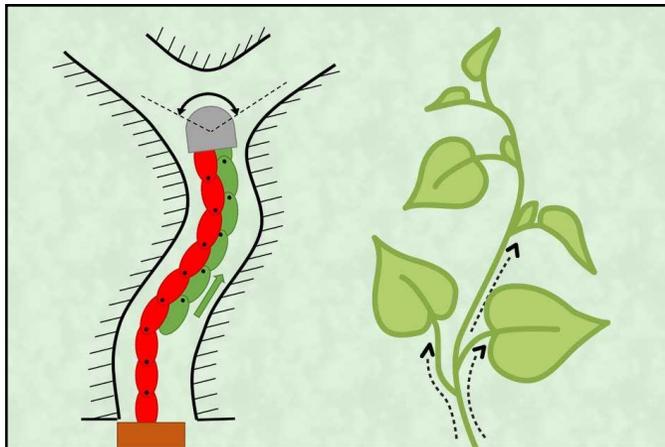
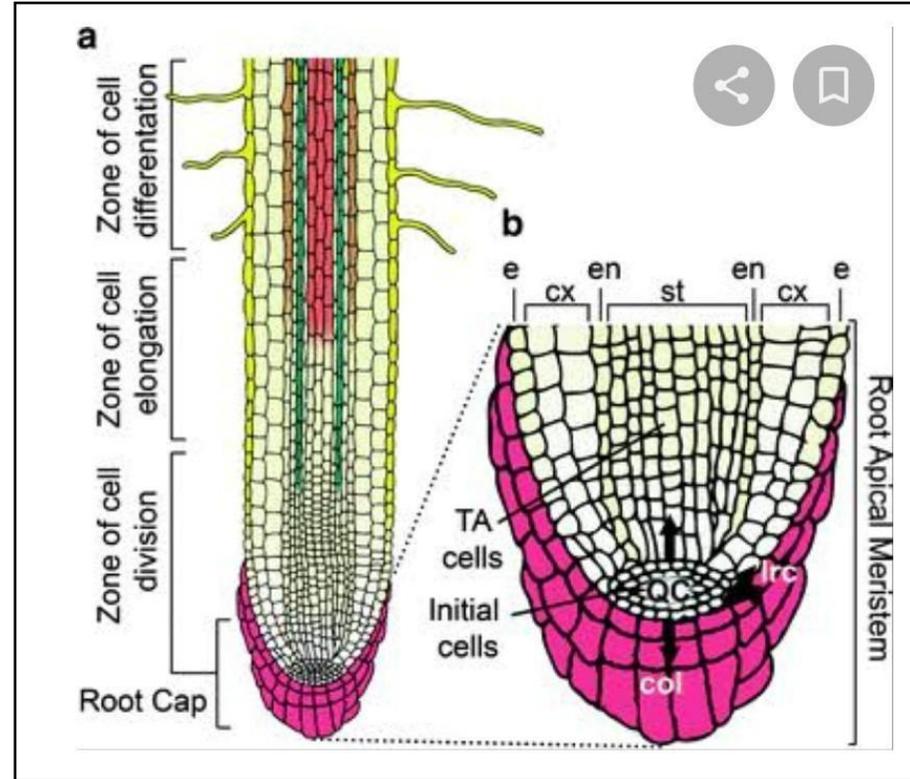
La tecnologia attuale permette anche la creazione di nanofibre che offrono maggiori superfici assorbenti e possono creare anche tessiture a diverso grado di porosità. Sono per esempio state realizzate nanocellulosa capaci di rimuovere metalli pesanti dall'acqua. La grande e rapida capacità di rimozione è dovuta alle interazioni tra i gruppi carbossilati sulla superficie della nanocellulosa e gli ioni di alcuni metalli come Cd²⁺. Nanofibre di cellulosa esterificate sono state assemblate con ossido di grafene funzionalizzato per trattare rifiuti farmaceutici in acqua con ottime prestazioni.



LA CRESCITA DELLE PIANTE ISPIRA LA ROBOTICA MODERNA

La crescita ed il differenziamento delle piante sono indubbiamente gli elementi che più hanno ispirato la robotica moderna. La soluzione è la robotica modulare: si tratta del principale approccio utilizzato dagli ingegneri per tradurre l'evoluzione morfologica degli organismi biologici in sistemi artificiali.

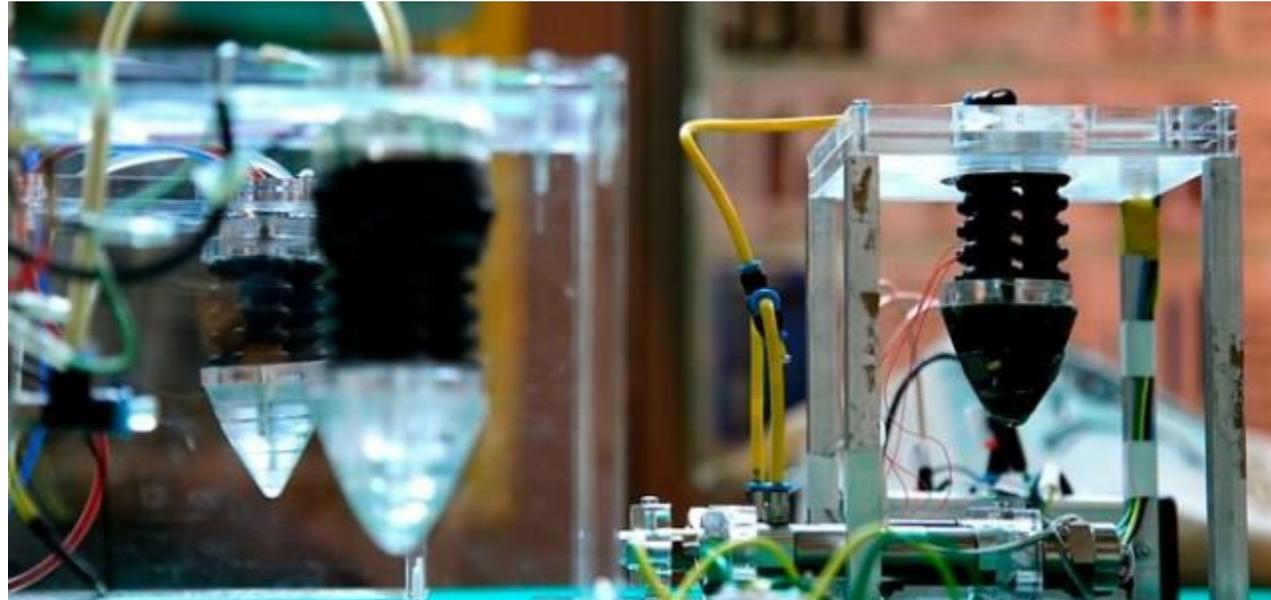
OBIETTIVO: Sviluppare robot capaci di evolversi e crescere ma soprattutto in grado di adattarsi. Questo aprirebbe l'opportunità di usare i robot in ambiente non strutturati, dove i vincoli non sono ben noti a priori e dove l'accesso è limitato o sconsigliato per l'uomo (ad esempio, dopo un terremoto), o per localizzare oggetti difficili da raggiungere ad esempio in un pozzo. E' necessario realizzare quindi robot in grado di adattare rapidamente la propria locomozione, morfologia e la loro funzionalità in base all'ambiente e al compito che devono svolgere.



LA RIVOLUZIONE DELLA BIOROBOTICA MODERNA

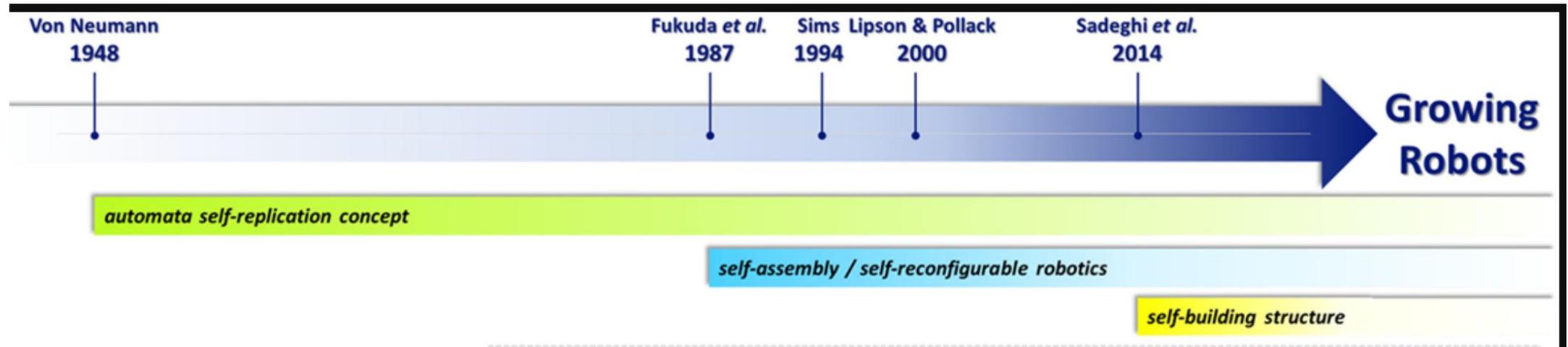
Le tappe che hanno permesso di realizzare robot funzionali capaci di crescere e modificare la propria forma sono state: La scomposizione dell'organismo. A metà del XX secolo si comprese che il concetto di robot non poteva essere una singola unità ma per 'imitare' funzioni complesse doveva diventare un sistema robotico distribuito composto da unità separate autonome ed eterogenee, esattamente come le cellule.

Queste celle robotiche possono essere funzionalizzate e comunicare tra loro, avvicinarsi, connettersi e disconnettersi automaticamente. La composizione delle cellule forma un unico modulo, come un tessuto; più moduli vengono assemblati per realizzare un unico robot strutturato. Il sistema può adattare la sua struttura all'ambiente ed eseguire un compito mediante una diversa combinazione di moduli. Un tale sistema potrebbe anche avere capacità di autoriparazione e tolleranza ai guasti ed essere in grado di continuare a funzionare anche quando si verifica un guasto.



LA RIVOLUZIONE DELLA BIOROBOTICA MODERNA

Semplificazione: Ogni componente deve avere ruoli chiari e definiti. Le cellule robotiche sono poi controllate in modo decentralizzato da un centro di comando: l'intelligenza del robot emerge dall'interazione tra cellule. I moduli cellulari sono principalmente celle mecatroniche prefabbricate il cui assemblaggio e combinazione costituiscono un singolo individuo (un robot cellulare). L'obiettivo finale è il ri-assemblare i componenti in base alle esigenze.



Autocostruzione: la frontiera della ricerca guarda con attenzione a robot capaci di 'autocostruirsi' o meglio di generare nuove strutture per rispondere alle esigenze stimulate dall'ambiente esterno. L'idea si ispira per esempio alla capacità di alcuni animali di cambiare pelle o delle cellule della cuffia che si sfaldano e il centro meristema ne produce delle nuove!

ROBOTICA VEGETALE

Le piante presentano strategie di crescita, sviluppo e risposta agli stimoli che possono essere di ispirazione per l'innovazione tecnologica.

Le aree di maggiore interesse per la robotica ispirata alle piante riguardano le risposte agli agenti esterni e le capacità di crescita, attuazione, autonomia, efficienza energetica e sostenibilità.

Gli elementi chiave per la robotica sono:

- La definizione delle funzione di interesse principale.
- L'individuazione dell'organo/organi a cui ci si vuole ispirare
- La simulazione della funzione che deve essere il più prossima possibile a quella della pianta

Va precisato che la finalità di queste innovazione NON è quella di sostituire la pianta ma di sfruttare le caratteristiche per obiettivi mirati utili all'uomo; per esempio una radice artificiale può permettere la perlustrazione di un suolo in modo più efficace di una sistema basato su trivellazione.

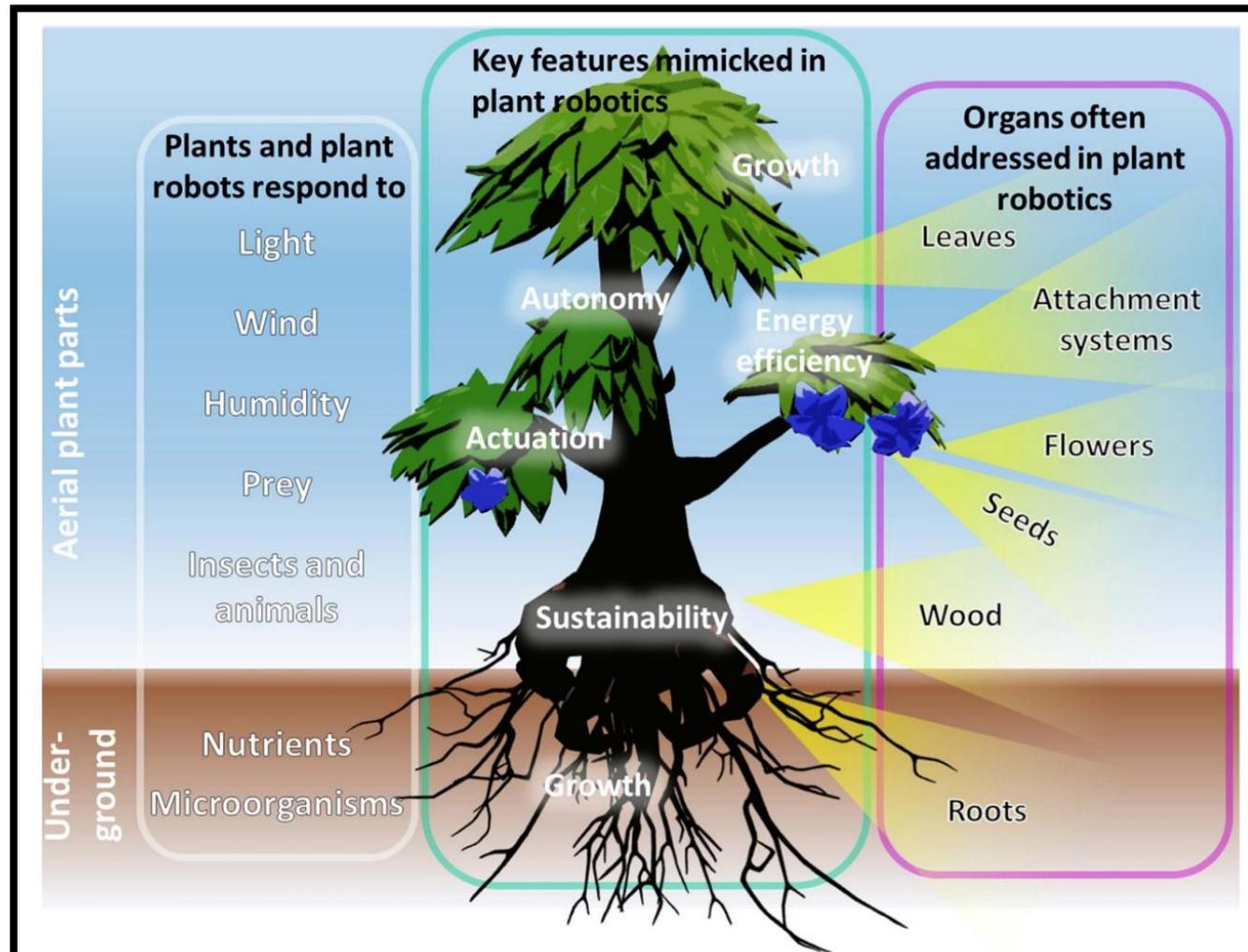


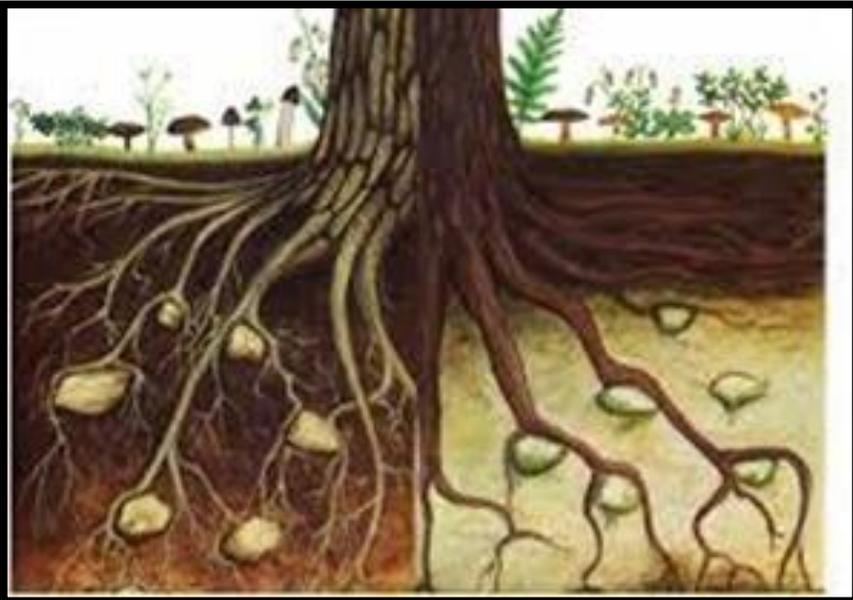
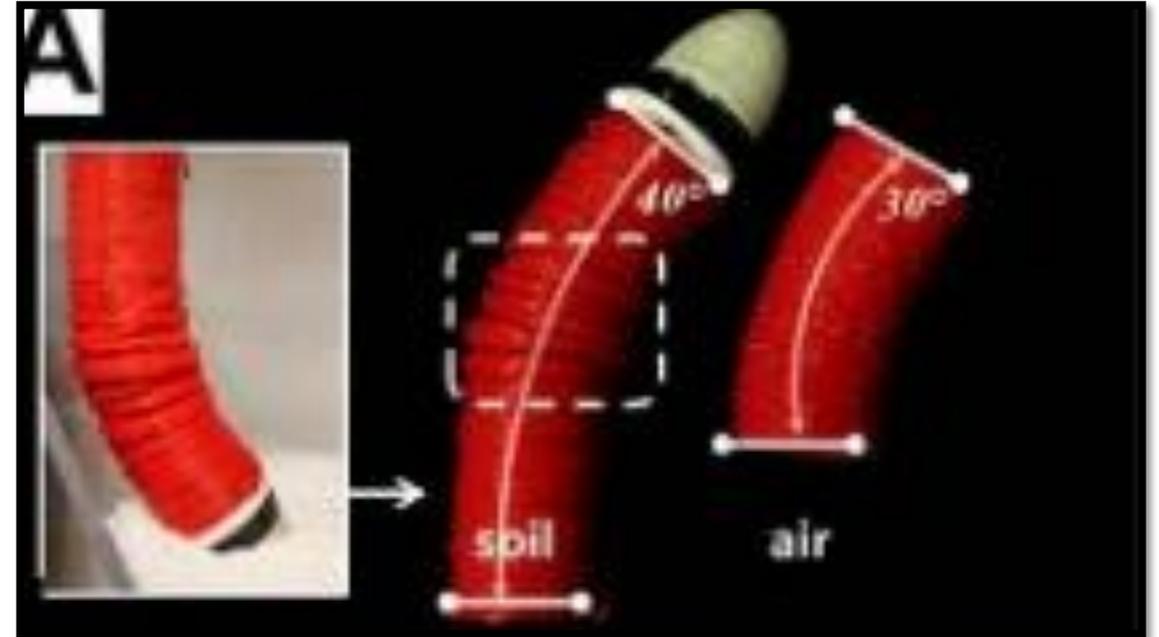
Figure 1. Overview of various plant features robotics and technology is already and could be inspired from: plants have aerial and underground parts, they respond to multiple stimulants through adaptation, materials, actuation. Several plant organs differing structurally from species to species are inspiration for bioinspired and biohybrid technology. Key features for inspiration are growth, autonomy, actuation, energy efficiency, and their intrinsic sustainability.

Tratto da: Meder, F., Baytekin, B., Del Dottore, E., Meroz, Y., Tauber, F., Walker, I., & Mazzolai, B. (2022). A perspective on plant robotics: from bioinspiration to hybrid systems. *Bioinspiration & Biomimetics*.

LA CRESCITA COME PRINCIPIO DI ISPIRAZIONE

Le piante hanno modelli di crescita molto differenti ma soprattutto crescono per tutta la loro vita! In generale vi è un accrescimento per divisione cellulare ad opera degli apici meristematici e dei cambi e una fase di allungamento e distensione cellulare che determina l'aumento delle dimensioni delle cellule grazie ai vacuoli.

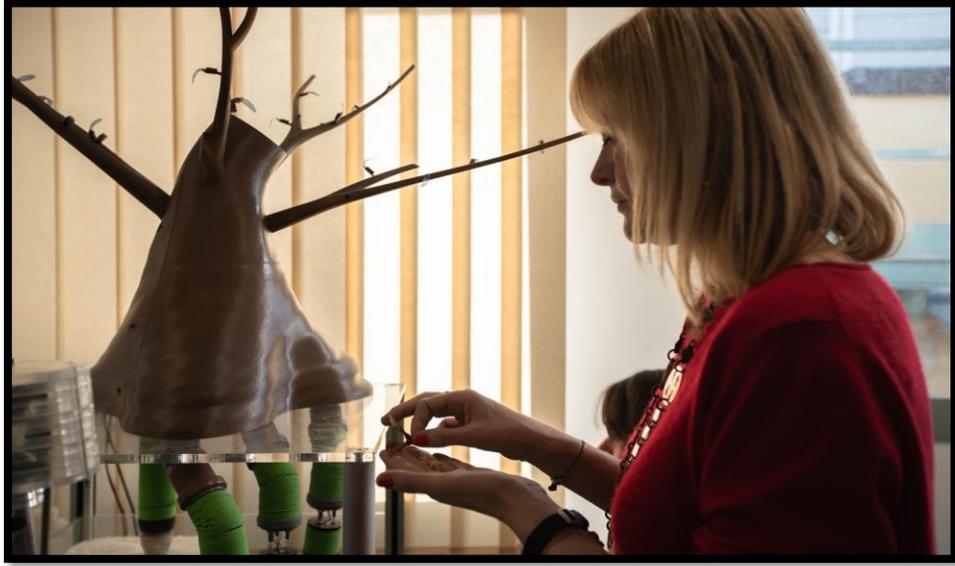
Questo meccanismo è di grande ispirazione perché permette di creare processi di propagazione e di espansione.



Un secondo aspetto di interesse è la capacità delle piante di modificare la direzione di crescita ed espansioni in caso di ostacoli. Questo sistema ispira lo sviluppo di modelli robotici più adattativi e capaci di rispondere a 'ostacoli' esterni.



I PLANTOIDI ISPIRATI ALLA CRESCITA



Barbata Mazzolai dell'IT è una ricercatrice che ha ideato i plantoidi. Si tratta di robot che sono per esempio capaci di simulare delle radici e di crescere nel terreno muovendosi tra gli anfratti dell'ambiente in cui si trova grazie a dei sensori sulla loro punta.

Obiettivo di queste strutture è lo studio del suolo dove le pressioni e gli attriti sono elevati già dopo pochi centimetri di profondità e spesso si fa uso di strumenti invasivi che alterano anche la tessitura del suolo stesso. Questi robot si muovono secondo vie alternative ovvero spingere la punta nel suolo e continuano a crescere solo nella parte apicale come fanno le radici. In questo modo c'è meno attrito e la pressione viene generata solo localmente.

Il robot realizzato è molto più grande di una radice e sulla punta presenta un 'meristema' che è una stampante 3D miniaturizzata con un motore che tira un rocchetto di filo di materiale termoplastico che viene usato per apporre nuovo materiale sulla "testa" del robot.

Ogni nuovo strato di filo viene quindi scaldato, diventa appiccicoso e si attacca allo strato precedente. In questo modo, il robot crea il suo corpo strato dopo strato.

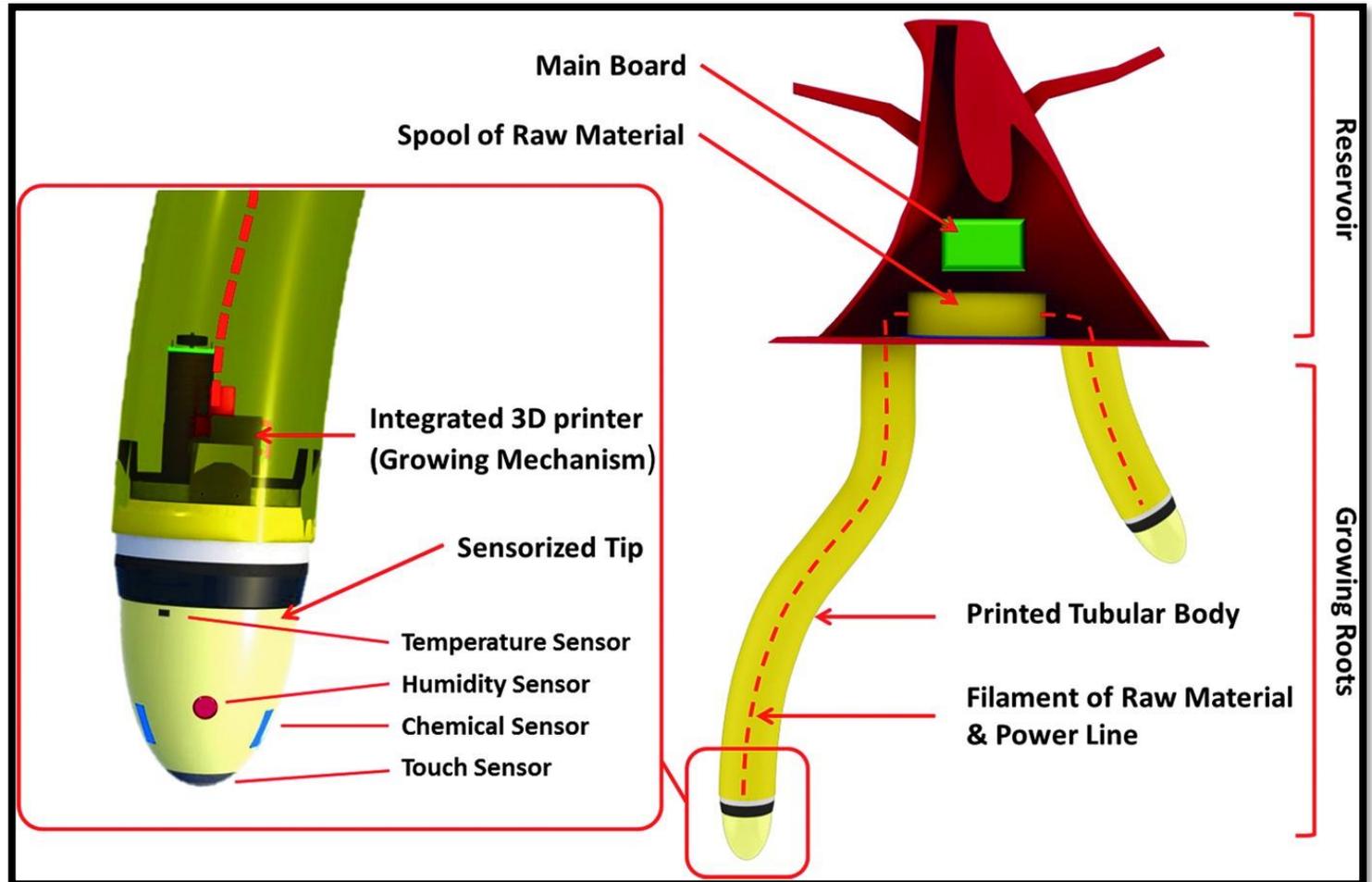


LA CRESCITA COME PRINCIPIO DI ISPIRAZIONE

Non sempre si riesce ad imitare la pianta ma a volte si può anche far meglio! Per esempio spesso la crescita degli apici radicali richiede un certo tempo mentre l'attività di una stampante 3D può essere molto veloce ed efficace. Lo svantaggio è che il materiale di stampa deve essere trasportato alla punta del robot mentre nel caso della pianta ci pensano i sistemi vascolari a nutrire le cellule meristematiche attive.

Una sfida aperta è l'adattabilità che nelle piante è molto elevata. Le radici che si muovono nel terreno ma sanno anche arrampicarsi su superfici ruvide, irregolari e aggirare barriere non strutturate. Si adattano a molti diversi segnali chimici e fisici dall'esterno. In risposta, mostrano una serie di movimenti guidati dalla crescita e strategie decisionali la cui traduzione ingegneristica non sempre è semplice.

Nel caso dei robot servirebbero sistemi multisensoriali, capacità di integrazione le informazioni e in grado di scegliere la 'risposta' più adeguata. Non è semplice.



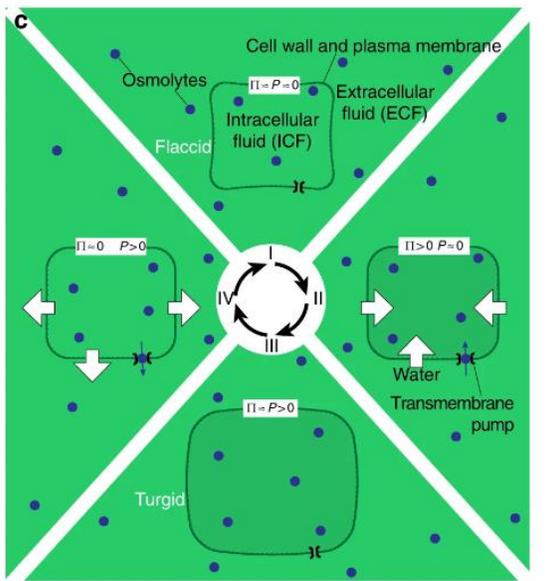
I VITICCI

ARRAMPICAMENTO: una seconda proprietà interessante delle piante è la capacità di attaccarsi stabilmente alle superfici come muri, altre piante, pali, ecc. Dal punto di vista fisico vi è l'interesse di capire come si supporta questo fenomeno (punti di forza) e come non spendere molte energie per arrampicarsi.

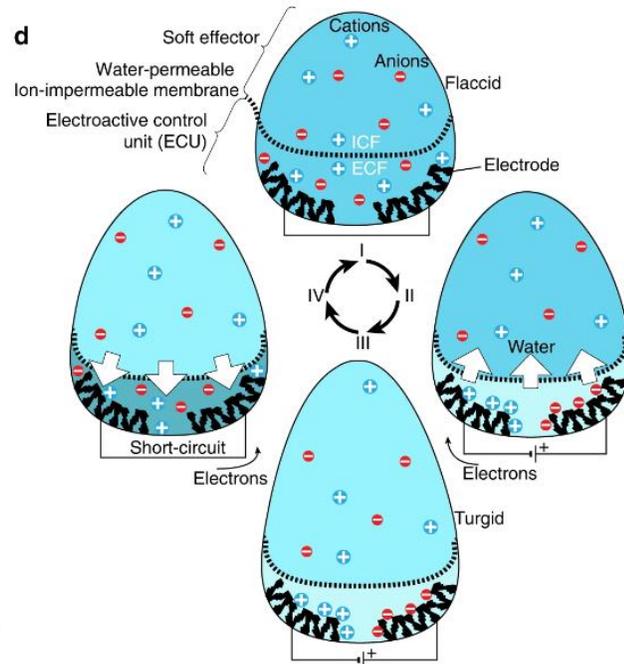
I viticci sono una strategia adottata da diverse famiglie....dalle viti ai legumi. I fisiologi vegetali hanno studiato quanta ATP si spende per crescere, per arrampicarsi, per attaccarsi ecc. I viticci sono molto 'costosi' ma sono più stabili! L'appoggio richiede meno energia ma è meno efficace.



Sono stati sviluppati robot capaci di avvolgere un supporto e sfruttare lo stesso per sorreggersi. Questo richiede poca energia e permette una buona presa e flessibilità. I ricercatori hanno realizzato delle strutture molto sottili di PET all'interno del quale è presente un liquido che presenta una soluzione di Sali ionizzabili. Utilizzando una batteria da pochi volt si possono attirare gli ioni da una direzione o respingerli verso un'altra parte. Se si utilizzano elettrodi flessibili si può orientare il movimento del tubo in PET. Utilizzando membrane semipermeabili è possibile anche sfruttare principi osmotici che spostando liquidi orientano il tubo.

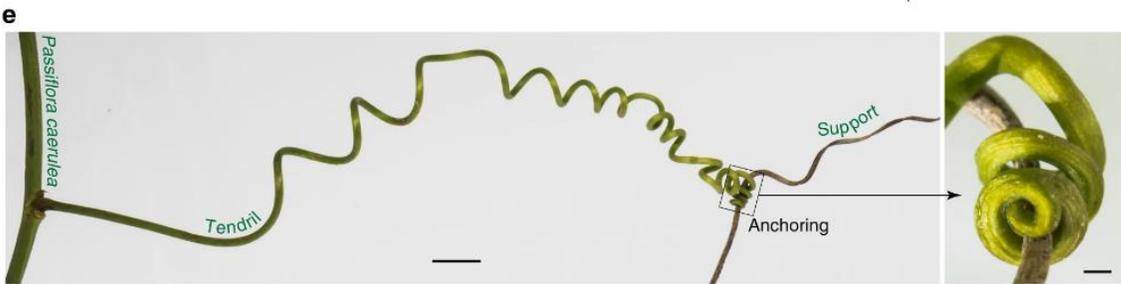


π: Osmotic pressure difference P : (Hydrostatic) pressure difference

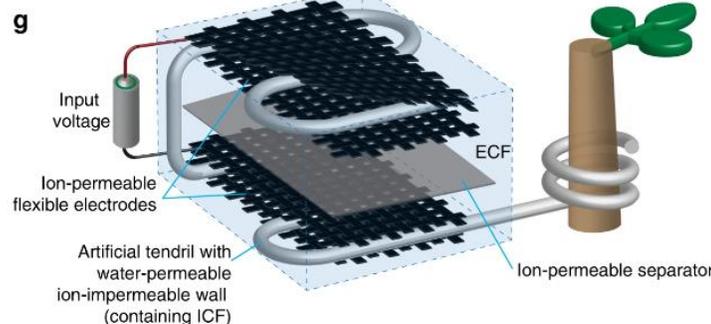
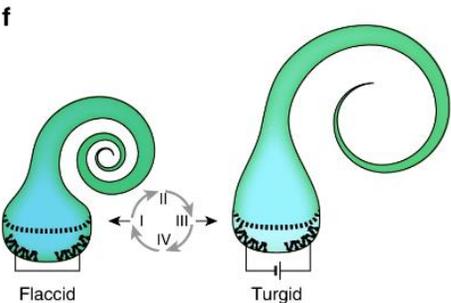


La figura C evidenzia i diversi stati osmotici della pianta (ad esempio di uno stoma). In D è stato ricostruito questo modello in un robot usando come sistema una soluzione di ioni disciolti in acqua separati da una membrana semipermeabili. Per regolare lo stato ionico viene sfruttato un elettrodo esterno che può essere 'attivato' o 'disattivato' al bisogno.

La modulazione della concentrazione ionica guida il flusso d'acqua come nelle cellule vegetali e modula la rigidità del tubo in PET.



In f e g si dimostra come sfruttando vari passaggi di stato osmotico si possa rendere più morbido o rigido il sistema.



Tratto da: Must, I., Sinibaldi, E., & Mazzolai, B. (2019). A variable-stiffness tendril-like soft robot based on reversible osmotic actuation. Nature communications, 10(1), 1-8.

MOVIMENTI ATTIVI E PASSIVI

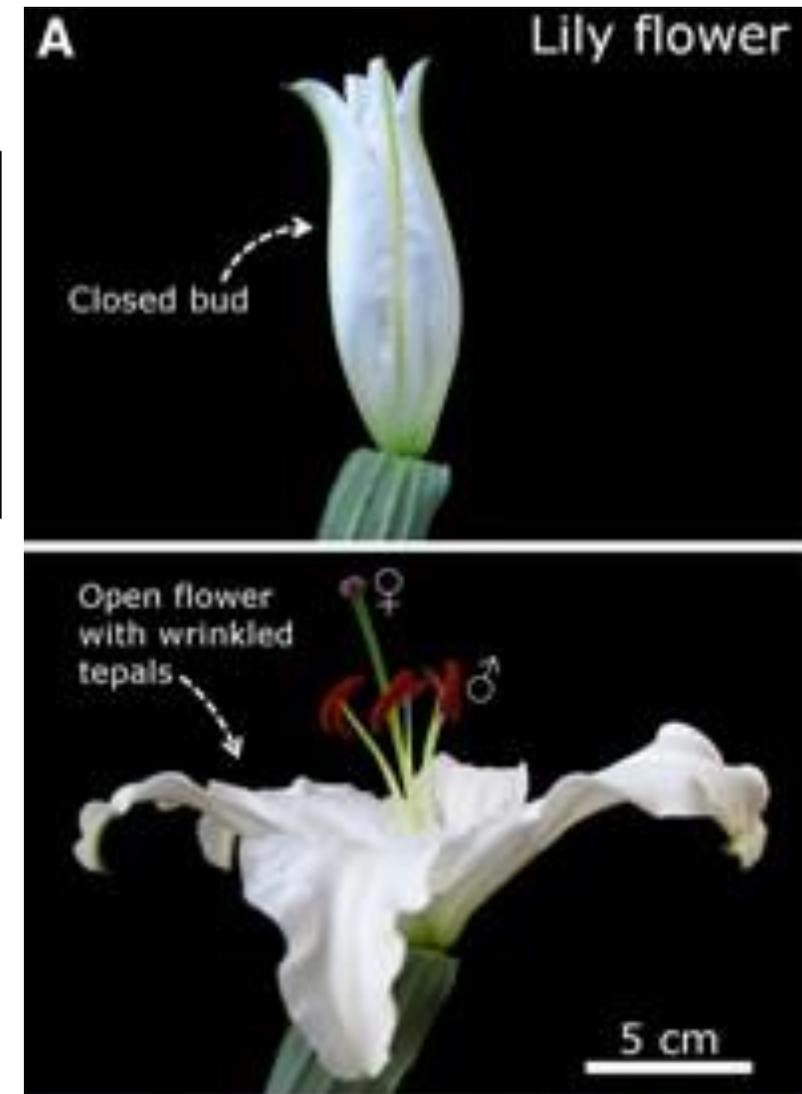
Nonostante si dica che siano sessili sappiamo bene che le piante sono capaci di fare movimenti attivi e passivi. I movimenti auto-azionati sono spesso guidati da principi di osmosi attiva o passiva (attivi se chiedono ATP, passivi se vanno verso gradiente) o dal rilascio di precompressione interna come nelle piante carnivore.

Vi sono poi movimenti che si originano grazie a forze esterne guidati per esempio dall'applicazione di forza meccanica generati da impollinatori o da vento e pioggia.



I fiori spesso si aprono grazie a processi di crescita differenziale. Nei lili i margini dei petali crescono maggiormente delle porzioni centrali....questo determina una modificazione della curvatura del petalo che determina una pressione che causa l'apertura.

Nel caso delle pigne il movimento di apertura non è attivo ma si basa su processi passivi legati per esempio alla temperatura e tenore di umidità esterna.



FORZA ELASTICA

Sia nel caso di sistemi attivi, sia passivi la velocità di movimento si basa sulla scala temporale del trasporto di acqua attraverso i rispettivi tessuti e, quindi, sulle loro dimensioni. Talvolta le piante per aumentare la velocità di movimento superano questo processo temporale generando instabilità elastiche come nel caso della crescita differenziale dei fiori di lillium che agiscono sull'energia elastica complessiva del petalo.

I meccanismi che sfruttano l'instabilità idraulica nelle piante sono molti e riguardano la diffusione di semi o di spore fino ai più affascinanti meccanismi che utilizzano le piante carnivore.

La *Dionaea muscipula* è un esempio che sfrutta i meccanismi osmotici ma li rende più veloci grazie a un cambiamento geometrico dei suoi lobi a scatto da concavo (visto dall'esterno) a convesso che agiscono appunto sulla instabilità elastica



Prendendo spunto dalla *Dionaea muscipula* sono stati realizzati dei supporti di microgel 3D che è capace di deformarsi usando instabilità elastica. Questo dispositivo ha una straordinaria capacità di cambiare forma e adattarsi velocemente alle superfici.

ADVANCED MATERIALS

Communication

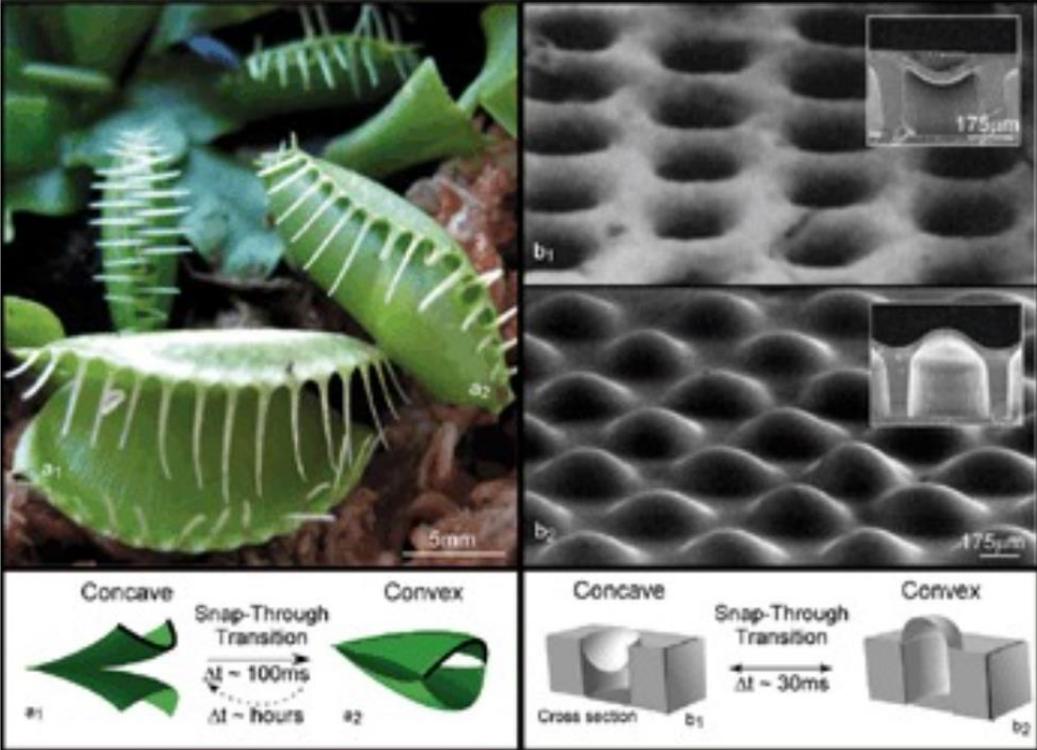
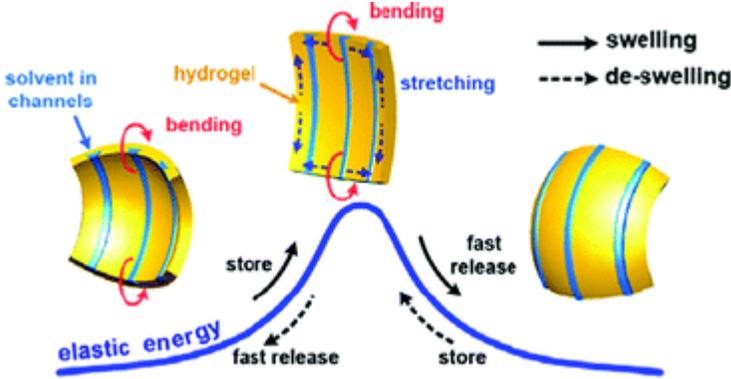
Snapping Surfaces†

D. P. Holmes, A.J. Crosby✉

First published: 05 November 2007 | <https://doi.org/10.1002/adma.200700584> | Citations: 169

† Funding for this work was provided by the Army Research Office Young Investigator Program. The authors thank Edwin P. Chan and Kyriaki Kalaitzidou for insightful discussions, and acknowledge NSF-MRSEC Central Facilities for use of their SEM, as well as Professor McCarthy's group for use of their oxygen-plasma cleaner.

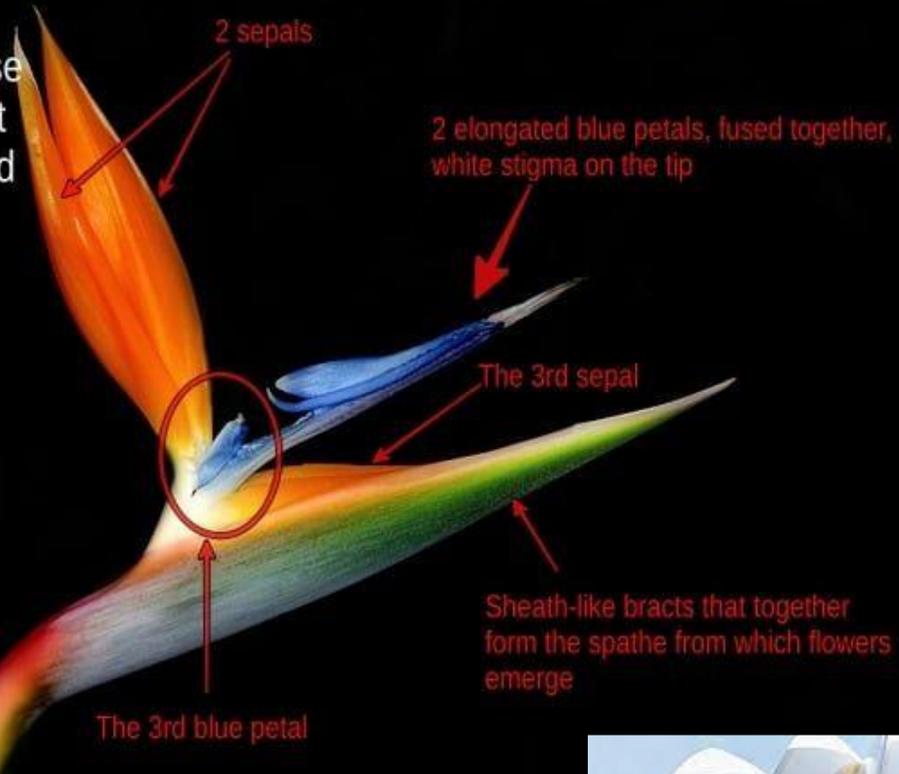
Holmes e Crosby hanno generato una superficie caratterizzata da instabilità elastiche che può essere controllata da una serie di microlenti azionabili. La 'reazione' è data da molti fattori che vanno dalla geometria, dalle dimensioni, dalle proprietà dei materiali, dal tempo di transizione e ovviamente dai meccanismi e sensibilità dei fattori di attivazione.



MOVIMENTI COLLEGATI A IMPOLLINAZIONE

Bird of Paradise Flower Anatomy

Bird of paradise flowers consist of 3 sepals and 3 petals. The 3rd petal conceals the nectar. Flowers emerge from the spathe, formed by bracts.



Il meccanismo di impollinazione dell'uccello del paradiso (*Strelitzia reginae*) si basa sulla proprietà dell'uccello (*Nectarinia afra*) che appoggiandosi al fiore alla ricerca del nettare determina instabilità torsionale e cambia la flessibilità dei petali-sepali.

Questo sistema ha ispirato nuovi materiali per realizzare facciata biomimetica continuamente regolabile utilizzabili come elemento ombreggiante. Materiale noto come FLECTOFIN





Un'altra pianta carnivora ha ispirato materiali per creare ombreggiamento mobile. Nello specifico la trappola a scatto della pianta carnivora della ruota idraulica (*Aldrovanda vesiculosa*), che sono azionati dall'idraulica attiva e dal rilascio del precompressore (Poppinga e Joyeux 2011; Westermeier et al. 2018). L'amplificazione della piegatura curva della trappola Aldrovanda è stata trasferita in un elemento di ombreggiamento cinetico della facciata (Flectofold, Koerner et al. 2018; Fig. 2B).



IL FUTURO SARÀ IBRIDO?

La crescita delle piante è un processo auto-organizzato che incorpora il rilevamento distribuito, la comunicazione interna e le dinamiche morfologiche.

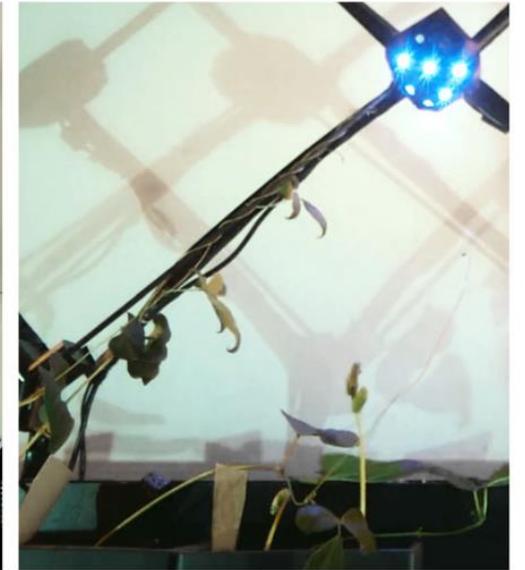
Se da un lato c'è l'esigenza di sviluppare robot capaci di crescere come una pianta parallelamente si stanno sviluppando sistemi meccatronici capaci di interagire con le piante rampicanti naturali, guidando i loro comportamenti per far crescere forme e modelli definiti dall'utente.

Questi sistemi bio-ibridi sono molto sfidanti anche se risulta ancora molto difficile l'allineamento tra i sistemi di rilevamento e l'attuazione di tipo ingegneristico con quelli naturali.

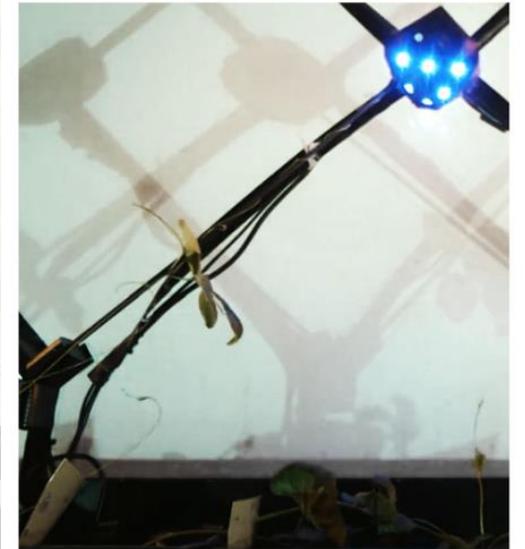
Al momento si stanno testando stimoli luminosi per stimolare la crescita utilizzando nodi meccatronici statici per far crescere piante rampicanti in uno schema definito dall'utente su un piano bidimensionale.



(g)



(h)



HOUSE PLANT THERAPY GROUP

