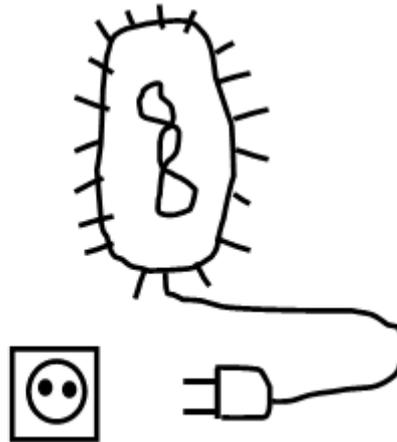


# APRES EDF, BDF BACTERIES DE FRANCE



Dans le cadre de l'Atelier Scientifique et Technique  
du lycée Jay de Beaufort à PERIGUEUX (24)

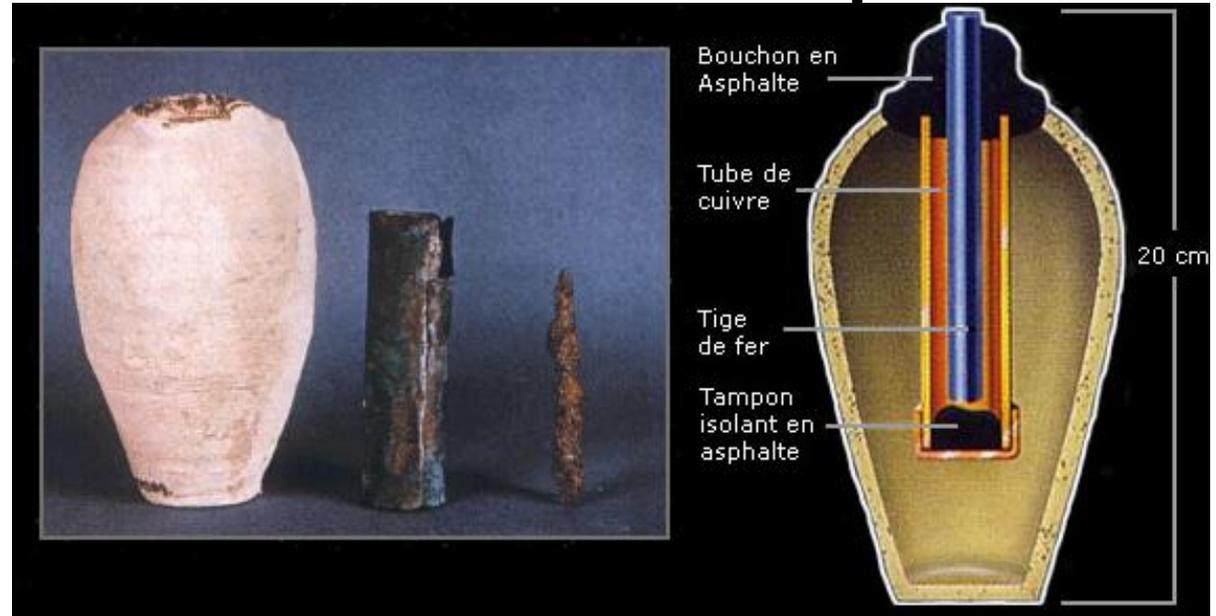
# Après EDF, BDF repense l'énergie de demain



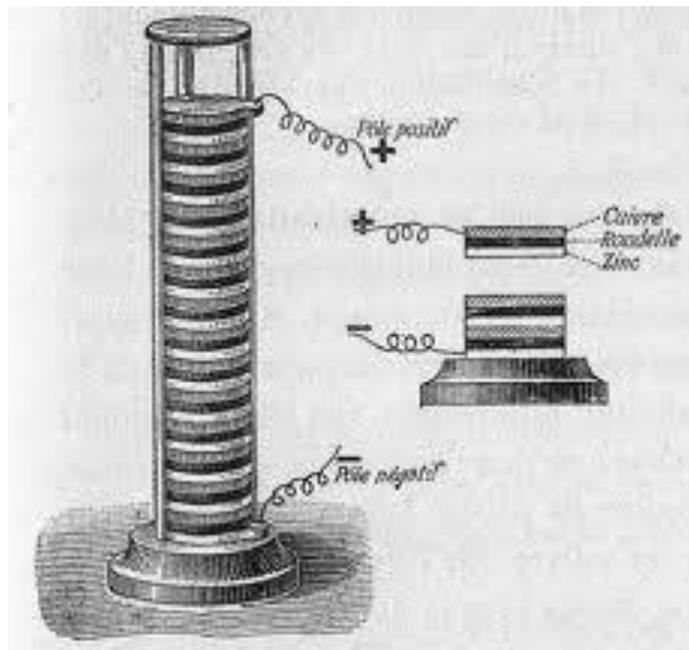
Le futur réseau BDF s'invite au concours c'génial avec son projet innovant sur les biopiles.

# Les piles à travers le temps !!

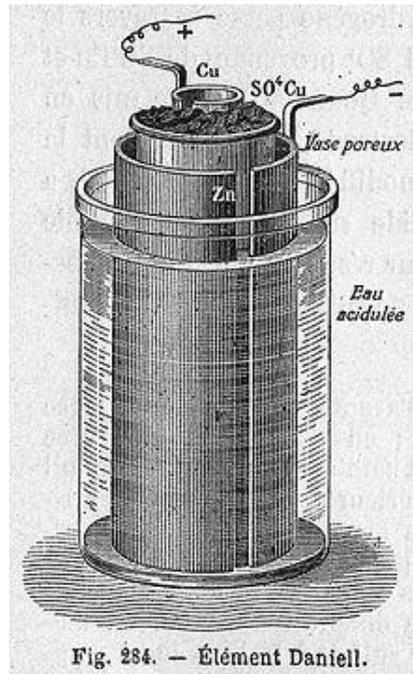
Il y a 2000 ans ?  
Piles de Bagdad ?



1800  
Pile de Volta



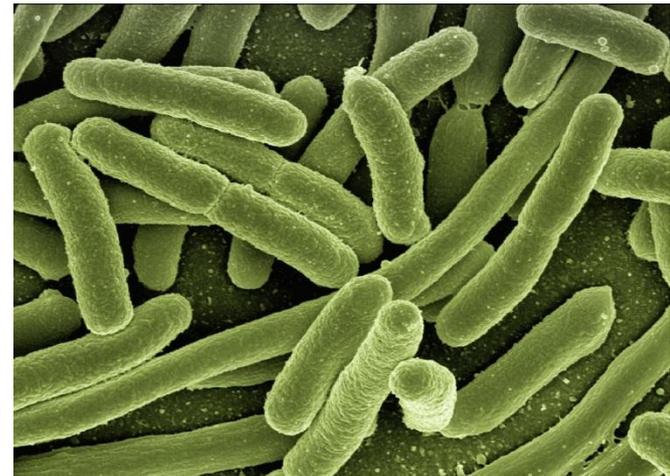
1836  
Pile Daniell



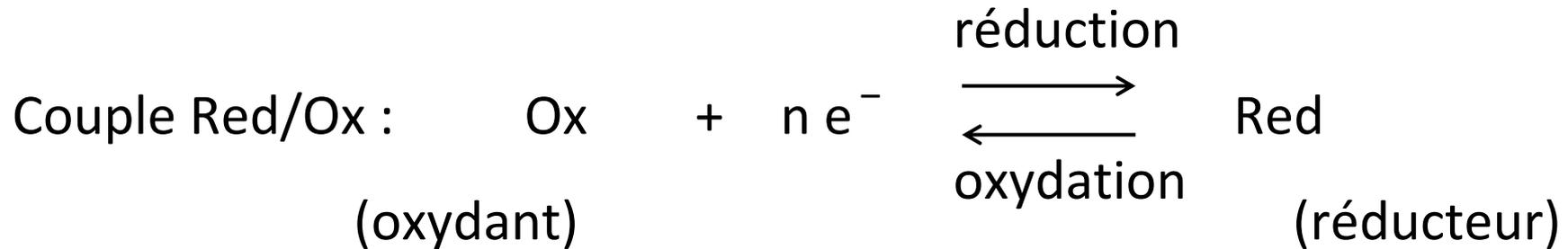
1888  
Carl Gassner  
Pile saline



1911 MC POTTER  
Production d'électricité à  
partir d'*E.coli*



# Notions d'oxydo-réduction

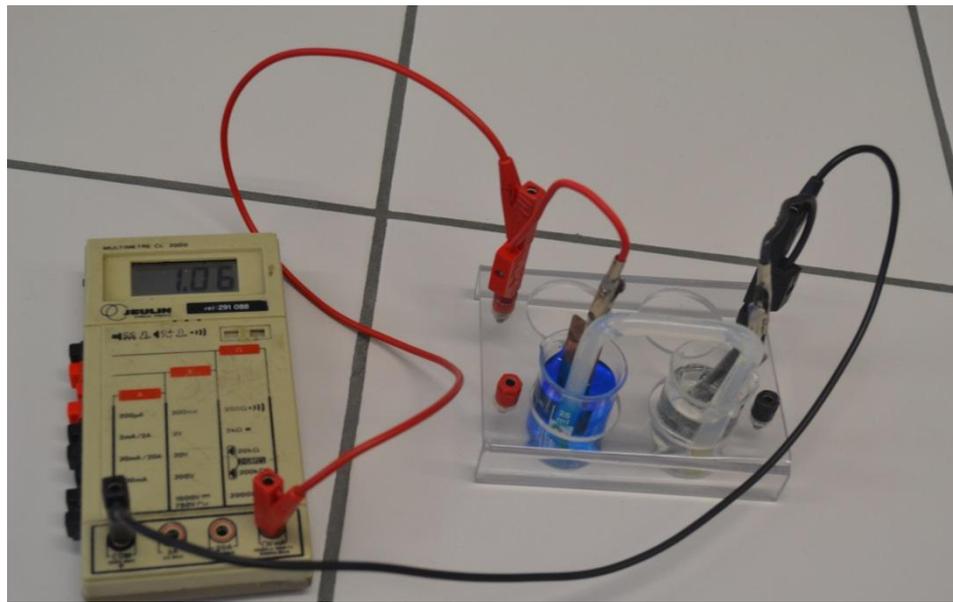


**LEO** The Lion Goes **GER**

Loose **E**lectrons, **O**xidize

Gain **E**lectrons, **R**educe

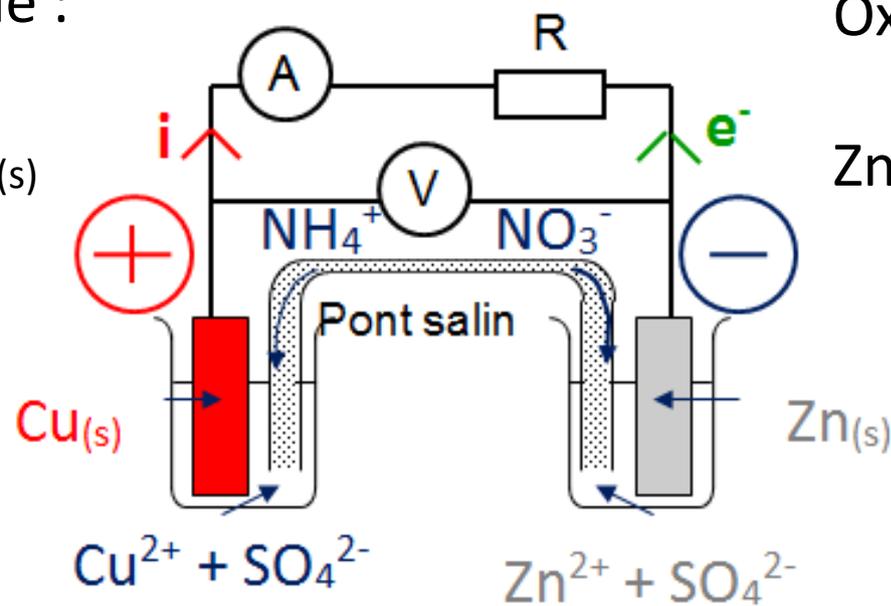
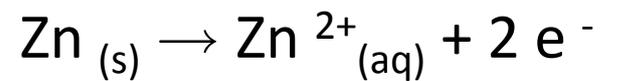




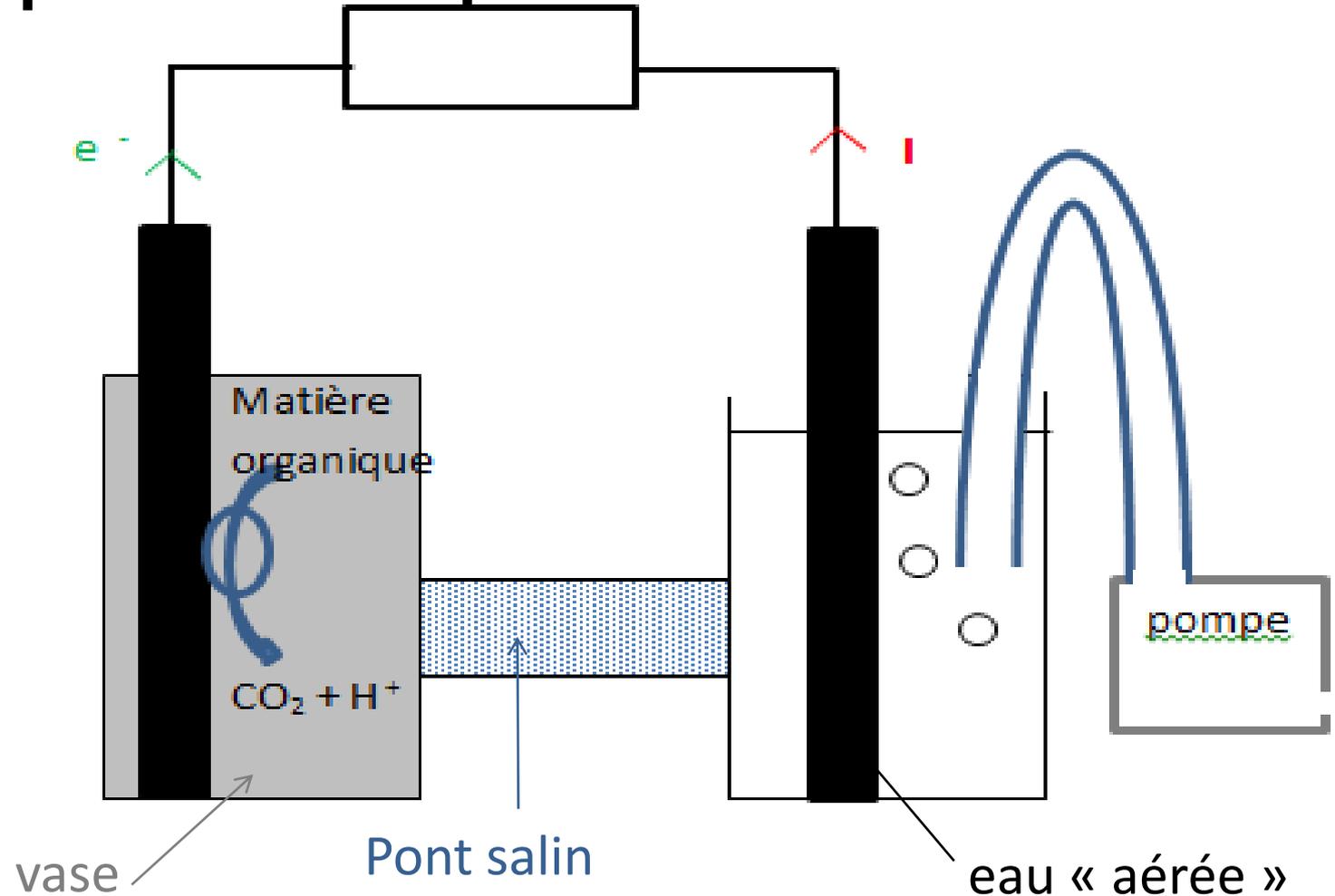
Réduction cathodique :



Oxydation anodique :



# Principe d'une pile microbienne



	ANODE anaérobie	CATHODE aérobie
conditions :		
	oxydation de matières organiques par les microorganismes	réduction du dioxygène $O_2 + 4 H^+ + 4 e^- \rightarrow 2 H_2O$

# Paramètres principaux d'une pile microbienne

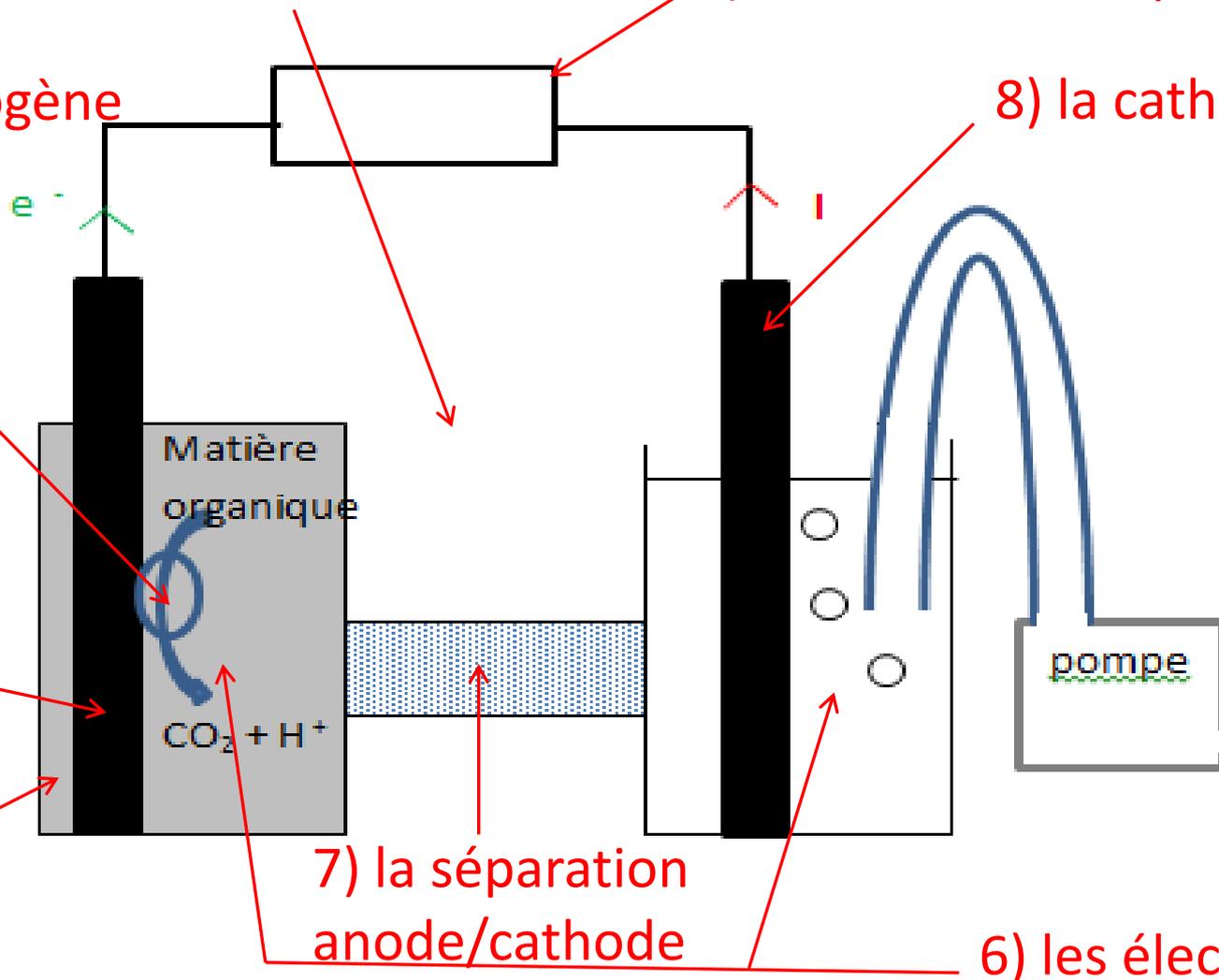
2) l'architecture de la pile

1) le circuit électrique externe

3) la flore électrogène

8) la cathode

4) l'anode



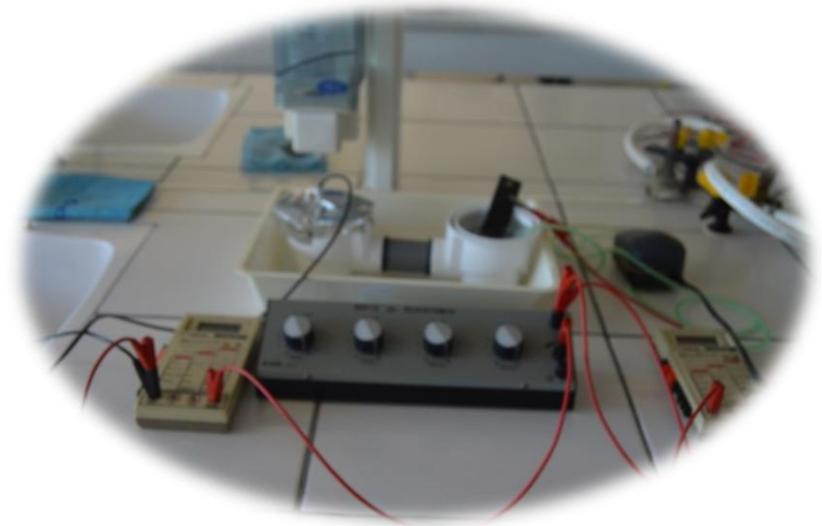
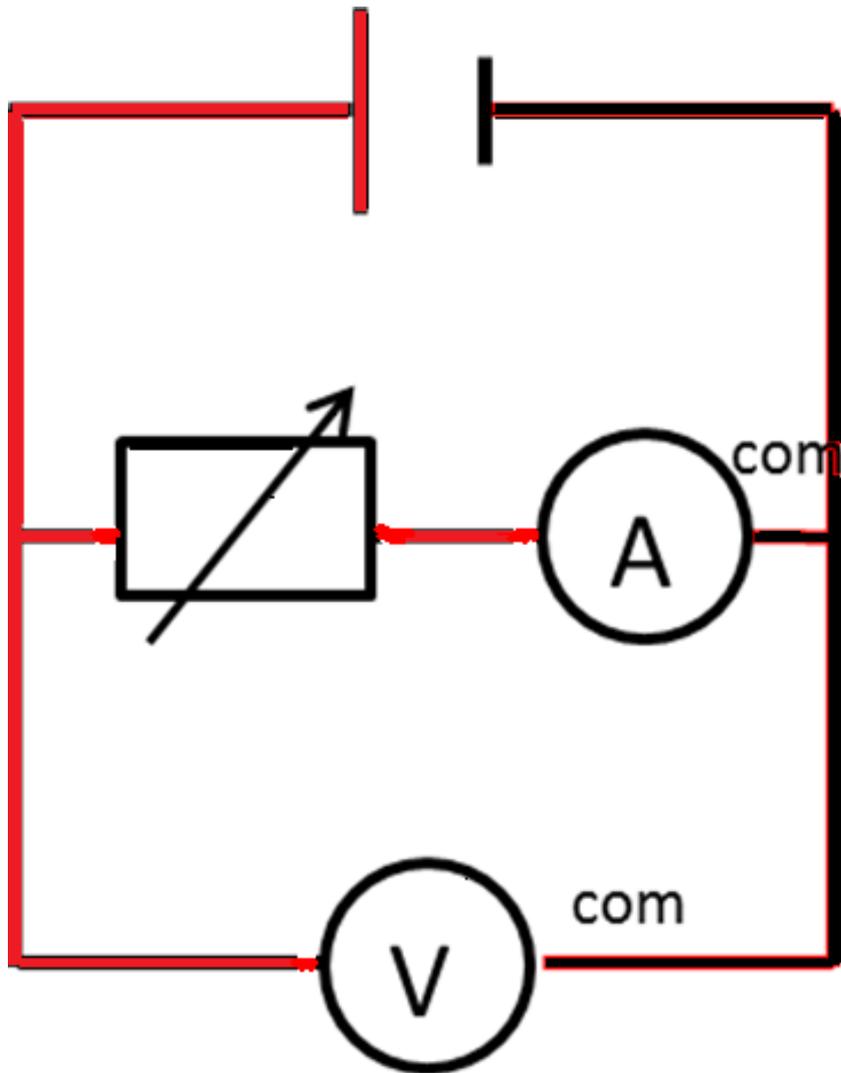
5) le substrat

7) la séparation  
anode/cathode

6) les électrolytes

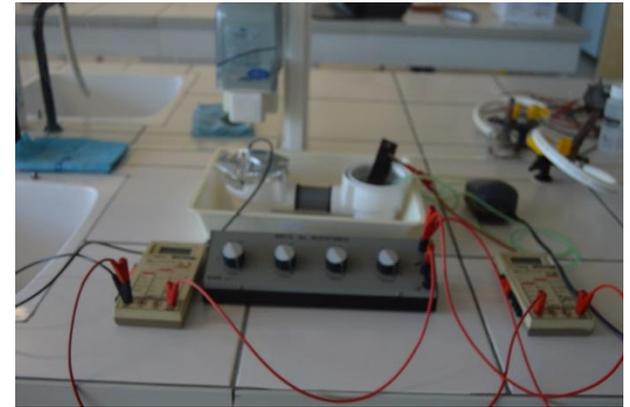
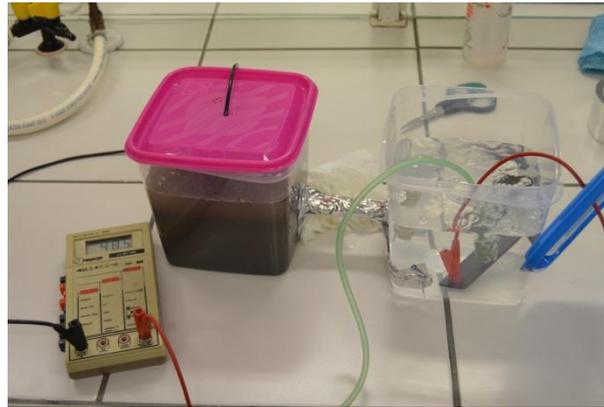
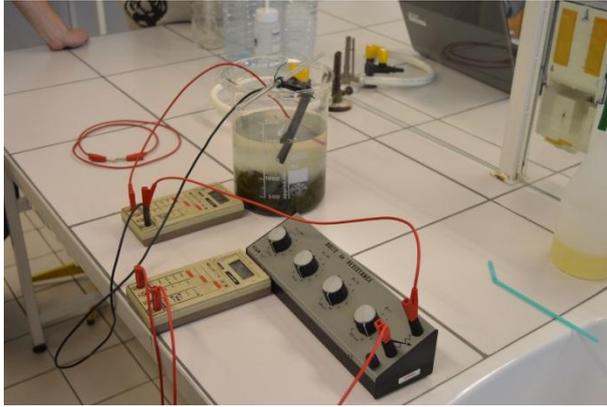
D'après la thèse de G. LEPAGE « caractérisation et optimisation d'une pile microbienne »

# Etude électrique de nos biopiles



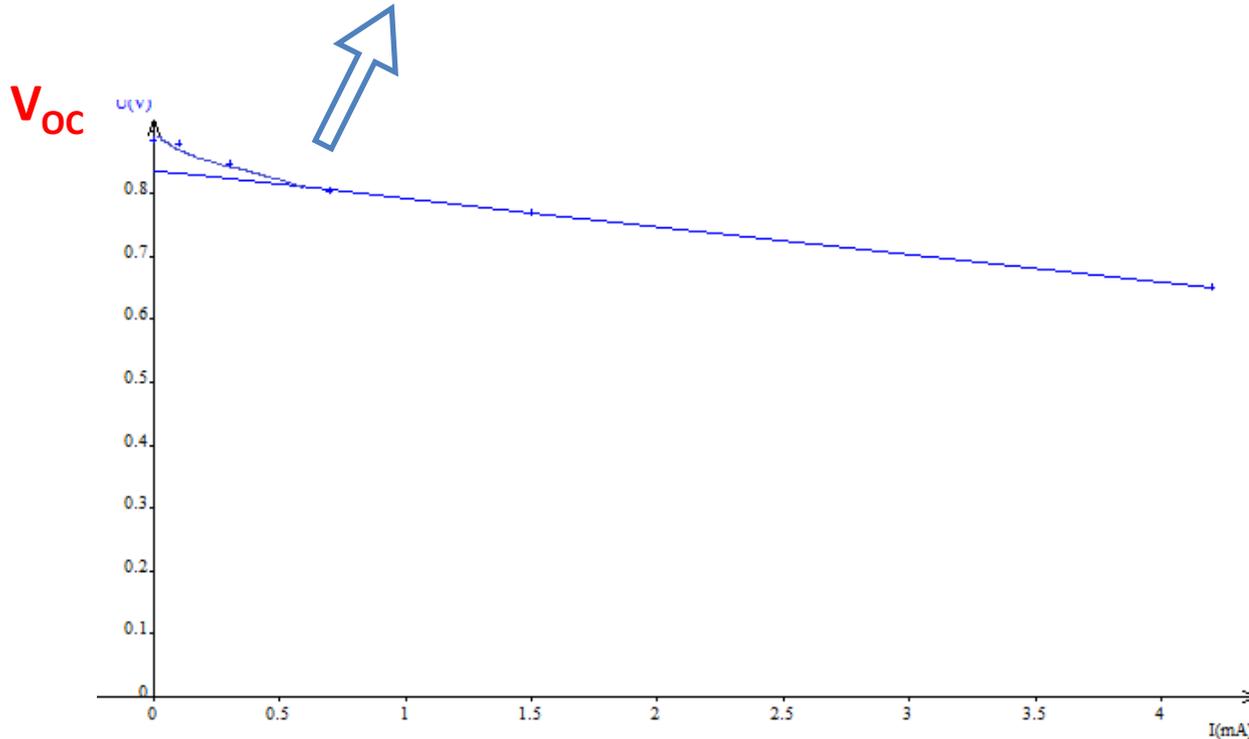
Le circuit utilisé

# Nos différentes piles



# Paramètres électriques de nos biopiles

- Tension en circuit ouvert  $V_{OC}$  (en V ou mV)
- Résistance interne  $r$  (en  $\Omega$ )



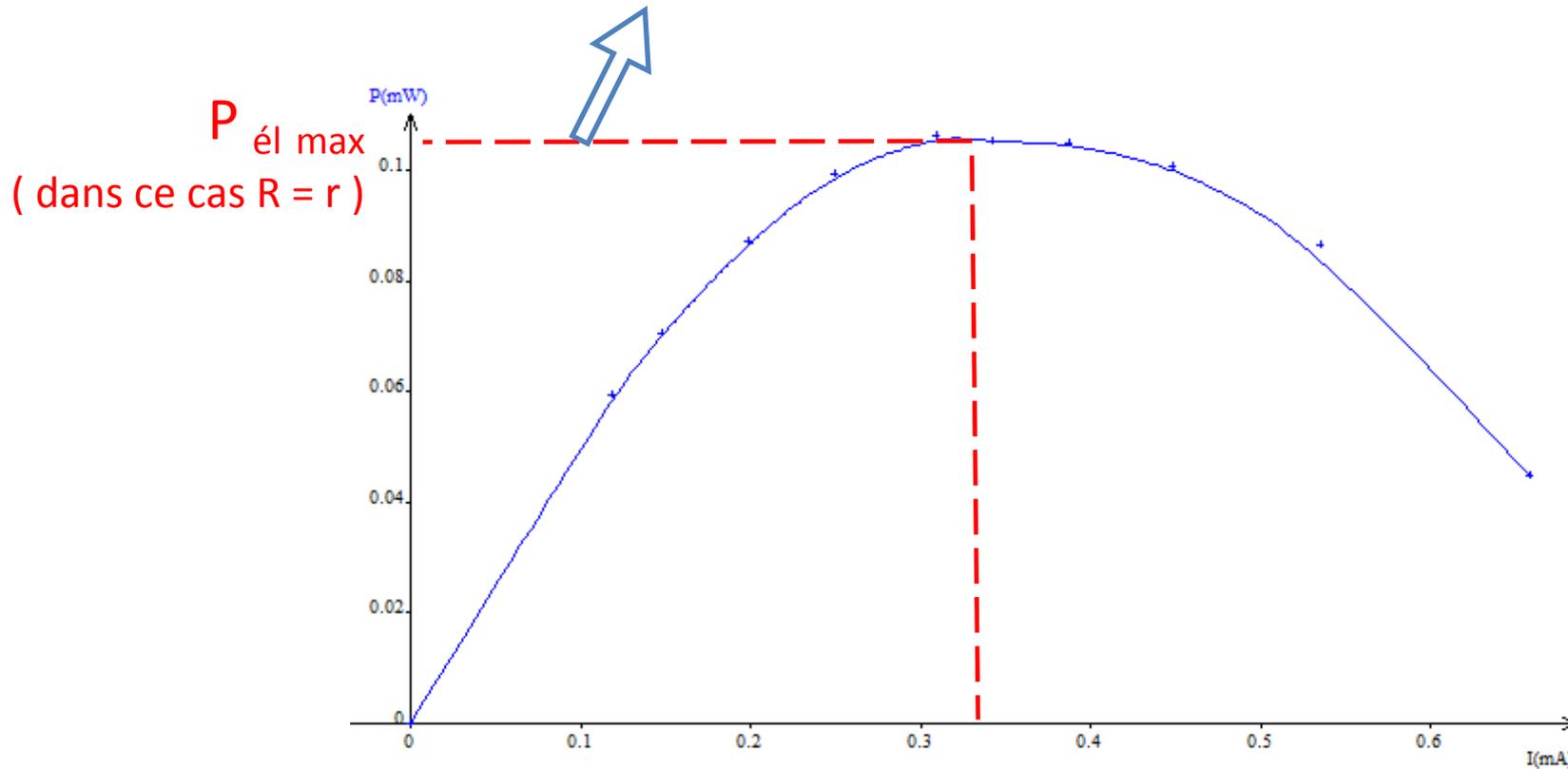
Traitement avec le logiciel Regressi :

linéarisation

$$U = E - r \times I$$

Caractéristique de la biopile : tension  $U$  (en V) en fonction de l'intensité  $I$  (en mA)

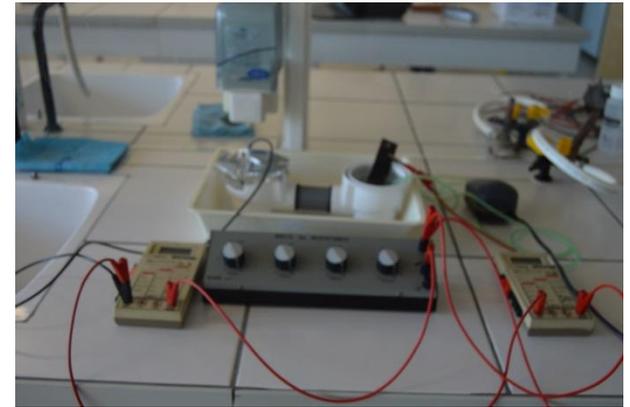
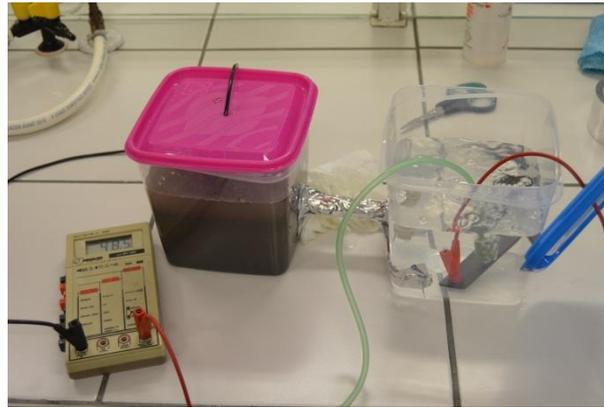
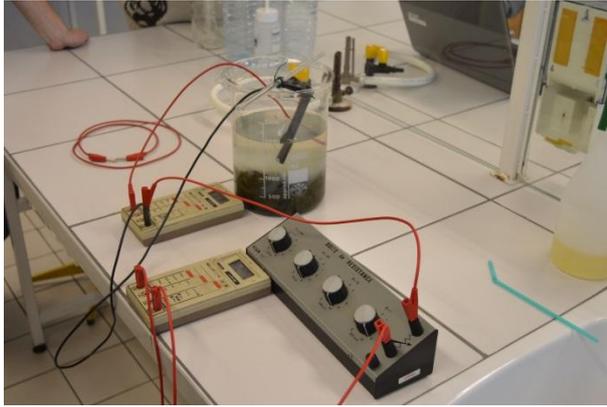
- Puissance électrique maximale  $P_{\max}$  (en mW ou  $\mu\text{W}$ )



Puissance électrique délivrée par la pile  $P$  (mW) =  $U \times I$  en fonction de l'intensité  $I$  (en mA)

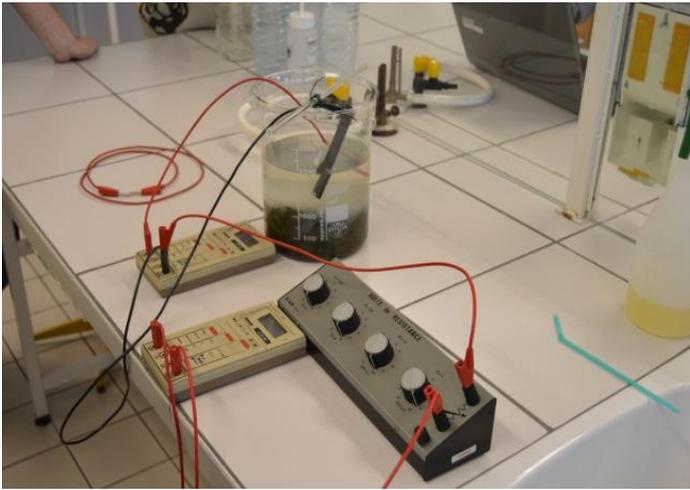
- Puissance électrique maximale surfacique ou volumique (en  $\text{mW}/\text{cm}_c^2$  ou  $\text{cm}_c^3$ )

# Nos différentes piles



# Résultats obtenus

Résultats obtenus au bout de plusieurs jours, pompe d'aquarium qui aère l'eau à la cathode, pont salin (agar-agar et solution de chlorure de potassium à la limite de la saturation), température de 18°C.



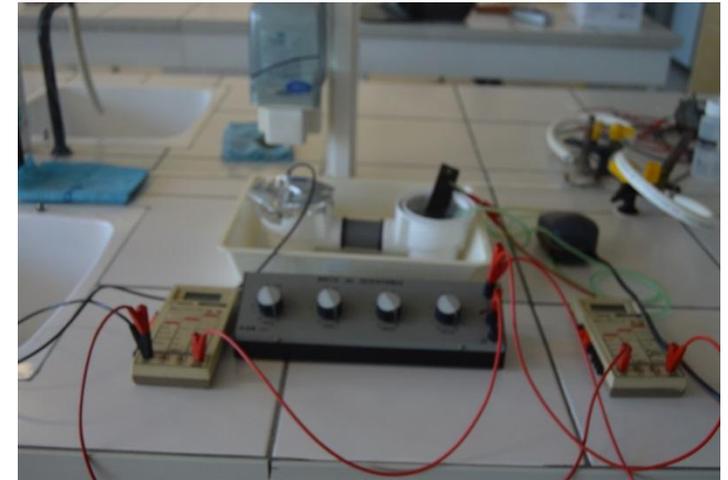
① anode : tressage métallique  
cathode : lame de carbone

$$V_{OC} = 0,45 \text{ V} \quad r = 26 \Omega$$

$$P_{max} = 1,9 \text{ mW}$$

Densité surfacique de puissance

$$P_{max} = 35 \mu\text{W}/\text{cm}_c^2$$



② anode : cylindre de carbone  
cathode : cylindre de carbone

$$V_{OC} = 1,04 \text{ V} \quad r = 503 \Omega$$

$$P_{max} = 0,54 \text{ mW}$$

Densité surfacique de puissance

$$P_{max} = 47 \mu\text{W}/\text{cm}_c^2$$



③ anode : cylindre de carbone  
cathode : cylindre de carbone

$$V_{OC} = 0,35 \text{ V} \quad r = 120 \Omega$$

$$P_{max} = 0,24 \text{ mW}$$

Densité surfacique de puissance

$$P_{max} = 23 \mu\text{W}/\text{cm}_c^2$$



④ anode : cylindre de carbone  
cathode : cylindre de carbone

$$V_{OC} = 0,16 \text{ V} \quad r = 250 \text{ k}\Omega$$

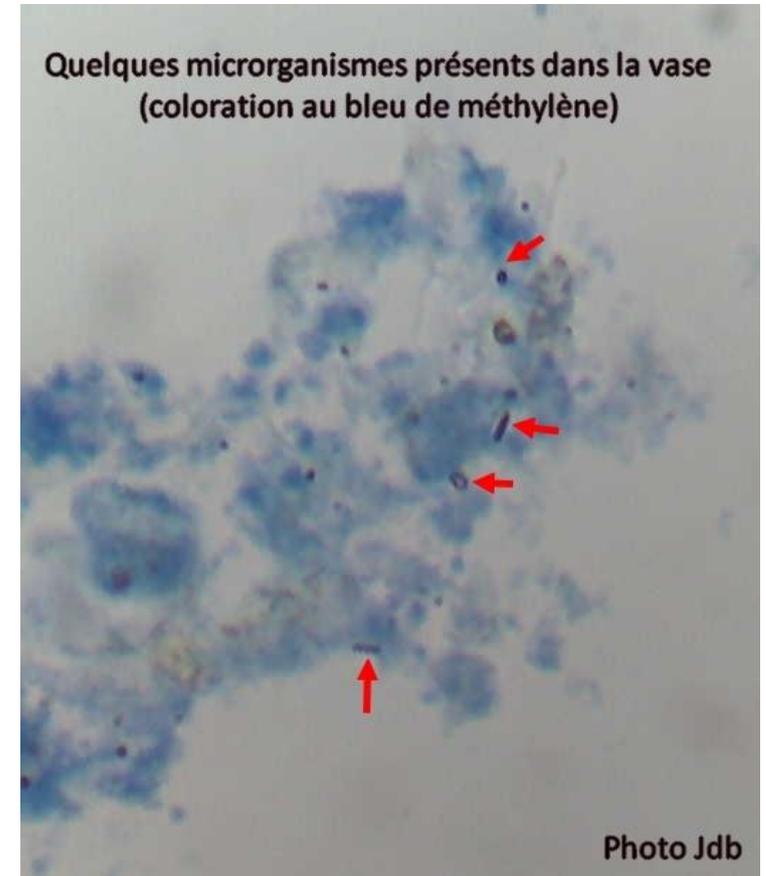
$$P_{max} = 0,025 \mu\text{W}$$

Densité surfacique de puissance

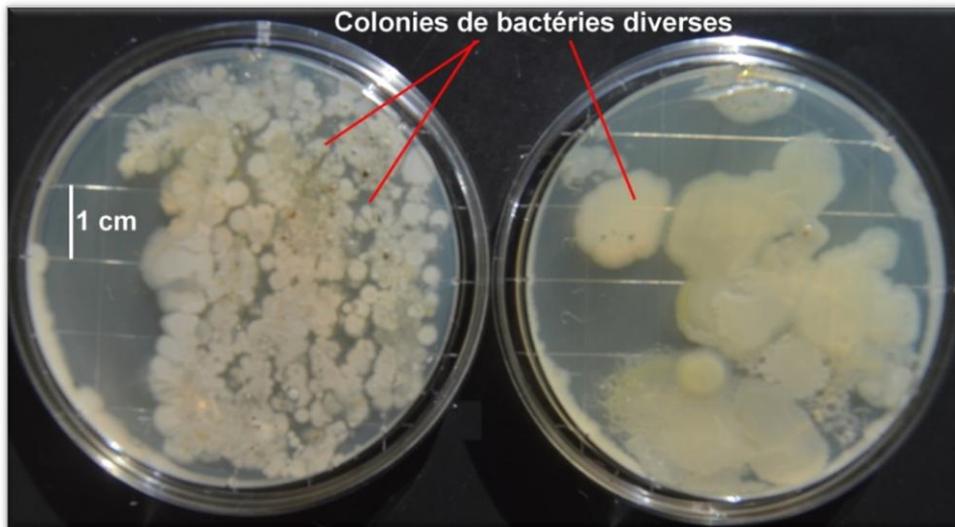
$$P_{max} = 0,0051 \mu\text{W}/\text{cm}_c^2$$

# Microorganismes dans nos piles microbiennes

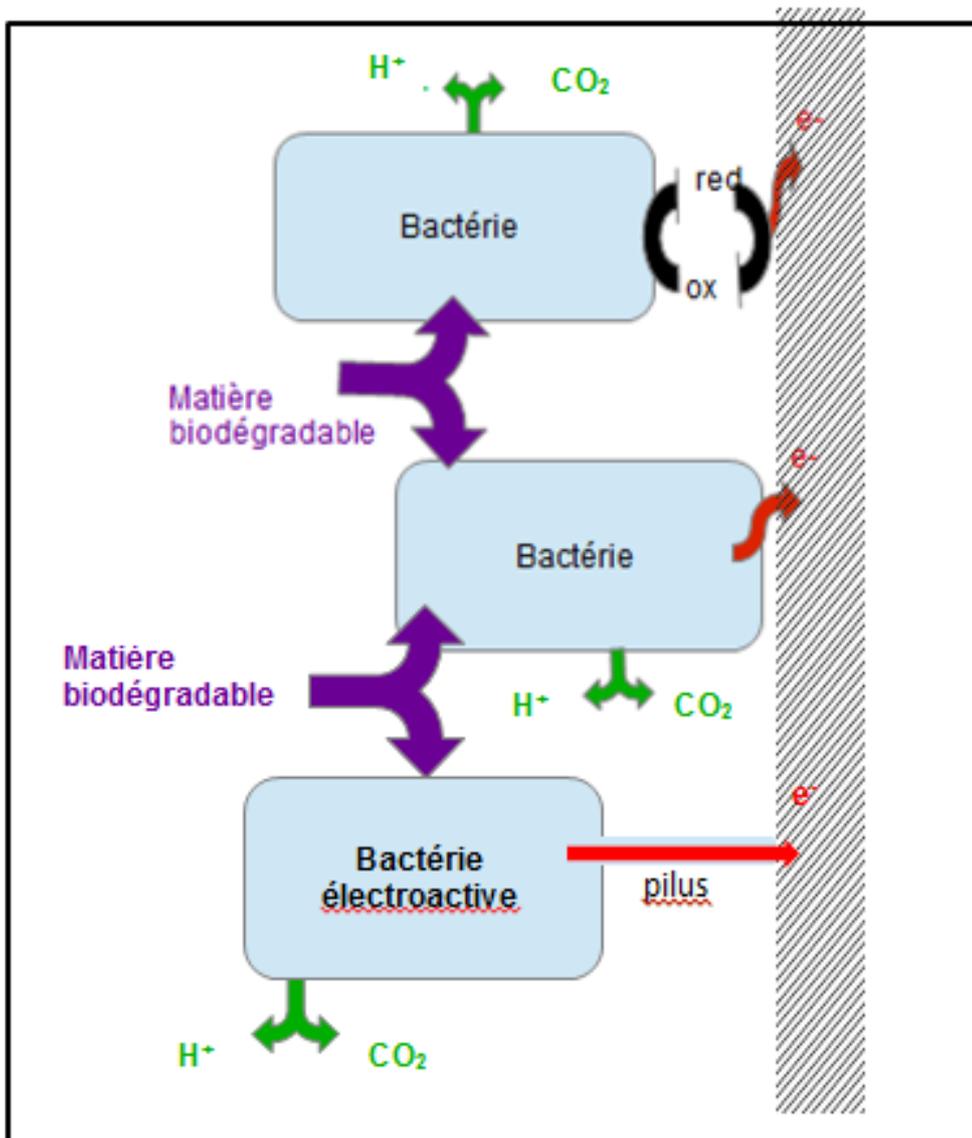
- dans notre vase :



- sur une anode :



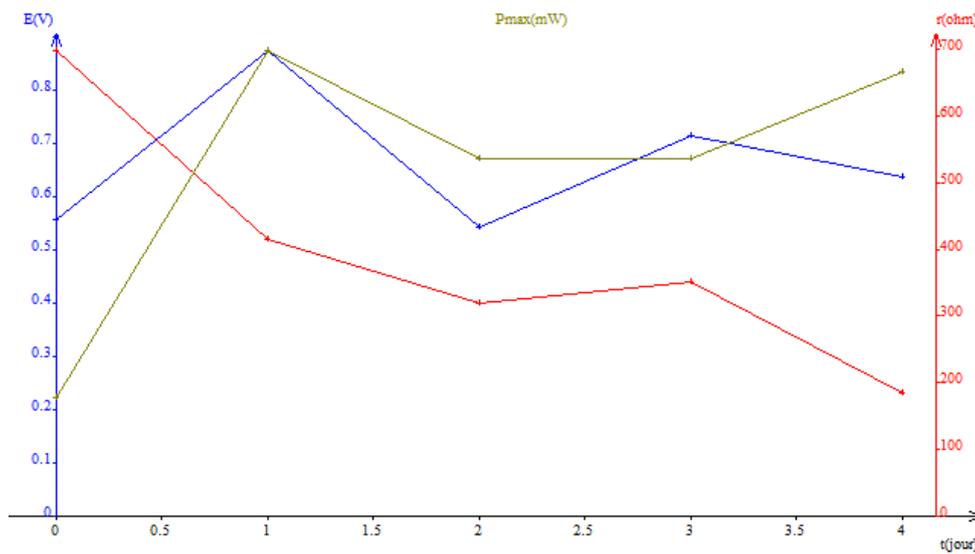
- transfert extracellulaire d'électrons :



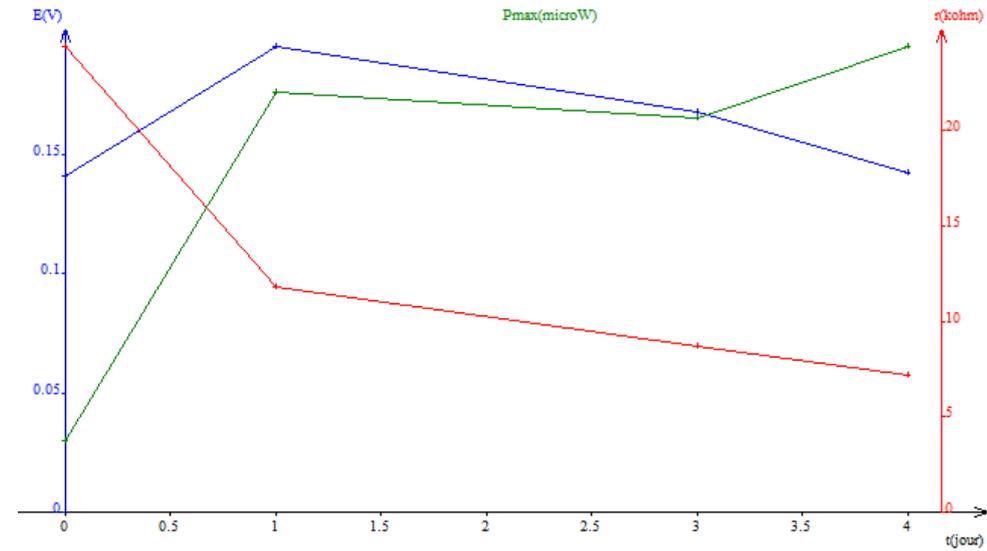
- transfert indirect :  
médiateur de transfert d'électron

- transfert direct :
  - par contact direct entre les bactéries (BIOFILM) et l'anode
  - par l'intermédiaire de pilis conducteurs (nanofils organiques conducteurs)

- comparaison vase – bouillon de culture d'*Escherichia coli* :



$$P_{\max(\text{vase})} = 0,41 \text{ mW}$$



$$P_{\max(E\ coli)} = 0,72 \text{ } \mu\text{W}$$

Avec la même pile de type 2 et dans les mêmes conditions, nous montrons qu'il faut plusieurs jours pour que la pile microbienne soit active mais la pile avec un bouillon de culture d'*Escherichia coli* à l'anode est beaucoup moins performante qu'avec de la vase.

# électrodes

- Matériau de la cathode : pile de type 2

Anode : lame de carbone – température 18 °C – même surface immergée (excepté pour le platine) - pompe d'aquarium

cathode :	plomb	cuivre	zinc	fil de platine	lame de carbone
$V_{OC}$ (V)	0,111	- 0,183	- 0,309	0,710	0,379
résistance interne $r$ ( $\Omega$ )	84	716	388	4600	1300
puissance maximale $P_{\text{élect max}}$ (mW)	0,038	0,012	0,057	0,013	0,029

- Structure des électrodes :

température 18 °C – même profondeur d’immersion de 8,0 cm –  
pompe d’aquarium

Nature des électrodes	$V_{OC}$ (V)	$r$ ( $\Omega$ )	$P_{\text{él max}}$ (mW)
2 lames de carbone	0,379	1300	0,029
cathode : lame de carbone anode : cylindre de carbone	0,558	697	0,11
cathode : cylindre de carbone anode : cylindre de carbone	1,04	503	0,54

Conclusions : - les électrodes cylindriques en carbone sont les plus performantes. Leur état de surface (porosité et degré d’oxydation) explique peut-être ce résultat ;

- c’est la cathode (« maillon faible ») qui limite les performances de la pile (la réduction de  $O_2$  est une réaction lente). C’est pour cela que les paramètres surfaciques et volumiques sont calculés par rapport à l’aire et au volume de la cathode.

# Electrolyte

conditions pile type 4	$V_{OC}$ (V)	$r$ (k $\Omega$ )	$P_{\text{él max}}$ ( $\mu$ W)
3 ponts salins, eau	0,33	28	0,96
3 ponts salins, solution salée [Na <sup>+</sup> ] = [Cl <sup>-</sup> ] = 0,7 mol/L	0,38	26	1,4
3 ponts salins, solution acide [H <sub>3</sub> O <sup>+</sup> ] = [Cl <sup>-</sup> ] = 10 <sup>-2</sup> mol/L	0,39	26	1,5
conditions pile type 1	$V_{OC}$ (V)	$r$ ( $\Omega$ )	$P_{\text{él max}}$ (mW)
eau	0,99	165	1,4
eau salée [Na <sup>+</sup> ] = [Cl <sup>-</sup> ] = 0,17 mol/L	0,90	48	4,4

Si le catholyte a une plus grande conductivité (solution acide ou solution aqueuse de chlorure de sodium) la résistance interne diminue et la puissance maximale augmente.

# Séparation anode/cathode

Nombre de ponts salins	$V_{OC}$ (V)	$r$ (k $\Omega$ )	$P_{\text{él max}}$ ( $\mu$ W)
1	0,33	93	0,28
2	0,33	41	0,60
3	0,33	28	0,96

Avec une pile de type 4, plus la surface de séparation augmente moins la résistance interne est grande et plus la puissance augmente.

## Température

température (°C)	18	37
Tension circuit ouvert $V_{OC}$ (V)	1,04	1,11
résistance interne $r$ ( $\Omega$ )	503	151
puissance maximale $P_{\text{élect max}}$ (mW)	0,54	1,88

divisée par 5

multipliée par 3,5

Avec une pile de type 2, nous montrons que la cinétique des réactions microbiennes dépend fortement de la température.

Nous tenons à remercier :

- pour leur accompagnement au cours de cet Atelier Scientifique :
  - M GALLET professeur de biotechnologies
  - M LAPEYRE professeur de physique/chimie
  
- pour leur aide matérielle :
  - le personnel des laboratoires du lycée Jay de Beaufort
  
- pour leurs relectures, leurs critiques, leur suggestions et leurs encouragements :
  - M Nicolas MANO chercheur CNRS au Centre de Recherche Paul Pascal à Bordeaux
  - M Alain BERGEL directeur de recherche CNRS au département BioSYM du Laboratoire de Génie Chimique de Toulouse
  - M Nicolas CHABERT étudiant en thèse sur les biopiles au CEA à Cadarache

# Quelques applications

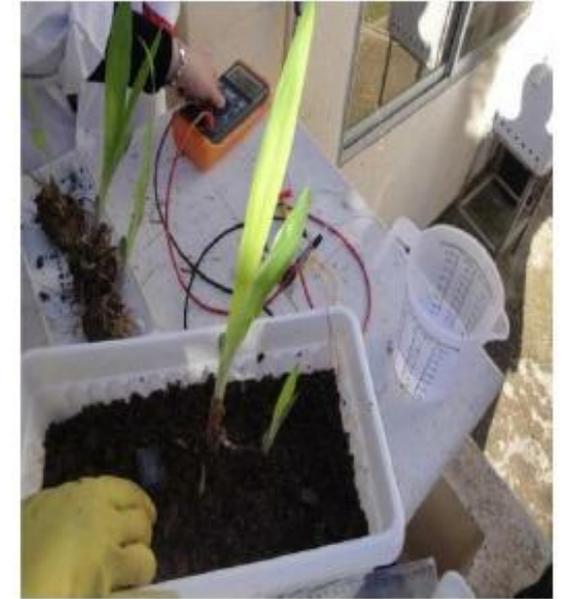
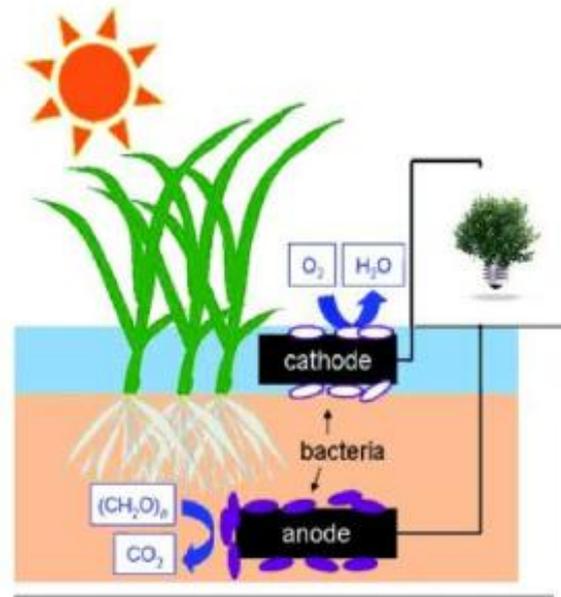
- traitement des eaux usées, des eaux de l'industrie papetière, à partir de déchets des filières agricoles et forestières, à partir d'urine .....



A l'université de Bristol, des chercheurs ont mis au point un WC dont l'électricité est générée par une pile microbienne alimentée par l'urine des personnes l'utilisant ! Quelques prototypes ont été installés dans des camps de réfugiés en Afrique.

- piles benthiques (sédiments marins + eau de mer) : alimentation de balises et d'instruments marins

- Plant Microbial Fuel Cell (PMFC)  
ou pile microbienne à plante  
<http://www.plant-e.com/>



projet LivingBox qui a reçu le prix ArtScience 2013 (4 étudiants chercheurs du Strate College et de Télécom ParisTech ont réussi à alimenter une box Internet à l'aide d'une plante verte)



Nous tenons à remercier :

- pour leur accompagnement au cours de cet Atelier Scientifique :
  - M GALLET professeur de biotechnologies
  - M LAPEYRE professeur de physique/chimie
  
- pour leur aide matérielle :
  - le personnel des laboratoires du lycée Jay de Beaufort
  
- pour leurs relectures, leurs critiques, leur suggestions et leurs encouragements :
  - M Nicolas MANO chercheur CNRS au Centre de Recherche Paul Pascal à Bordeaux
  - M Alain BERGEL directeur de recherche CNRS au département BioSYM du Laboratoire de Génie Chimique de Toulouse
  - M Nicolas CHABERT étudiant en thèse sur les biopiles au CEA à Cadarache