

## استهلاك المادة العضوية وتدفق الطاقة

### استرداد منظم للمعارف

#### تمرين 1

يعتبر التنفس والتخمير وسيلتين لتحويل الطاقة الكامنة في المواد العضوية المستهلكة من طرف الخلايا، إلى طاقة كامنة في جزيئة ATP.

• استعرض بإيجاز مراحل التنفس والتخمير مبرزاً المعادلة العامة مقارنة الحاصيلة والمرددية الطاقية لكل منهما.

### استثمار المعارف وتوظيف القدرات

#### تمرين 1

لدراسة كيفية استخلاص الطاقة من المادة العضوية نقترح التجارب والمعطيات التالية :

##### ■ التجربة 1 :

تم استخلاص المحتوى السيتوبلازمي (بدون عضيات) لخلايا الخميرة بواسطة تقنية النبذ؛ ثم وُضع في أنبوب اختبار به كليكوز وكشاف الأكسدة والإختزال : أزرق الميتيلين الذي يكون أزرقاً في حالة الأكسدة ويتحول إلى عديم اللون في حالة الإختزال.

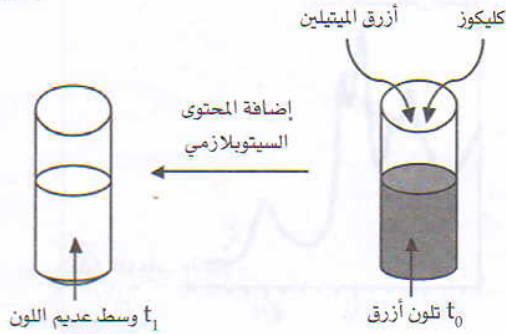
في نهاية التجربة اختفى الكليكوز كلياً مع ظهور حمض البيروفيك (الوثيقة 1).

##### ■ التجربة 2 :

تُصدر حشرات الحباب « luciole » إضاءة أثناء فترة الإستعراض الزوجي، وتعرف الظاهرة بالإضاءة الإحيائية وتنتج عن تفاعل مركب Luciférine - Luciférase مع جزيئة ATP.

تم تهييء وسط تجريبي يحتوي على المحتوى السيتوبلازمي للخميرة وعلى مركب Luciférine - Luciférase وتم تتبع تطور شدة التدفق الضوئي بواسطة مضيءاء. تترجم الوثيقة 2 النتائج

##### الوثيقة 1



##### الوثيقة 2



المحصلة لها هي النتائج التجريبتين 1 و 2 بين المرحلة الاستقلالية التي تم الكشف عنها والتفاعلات التي تتم خلالها.

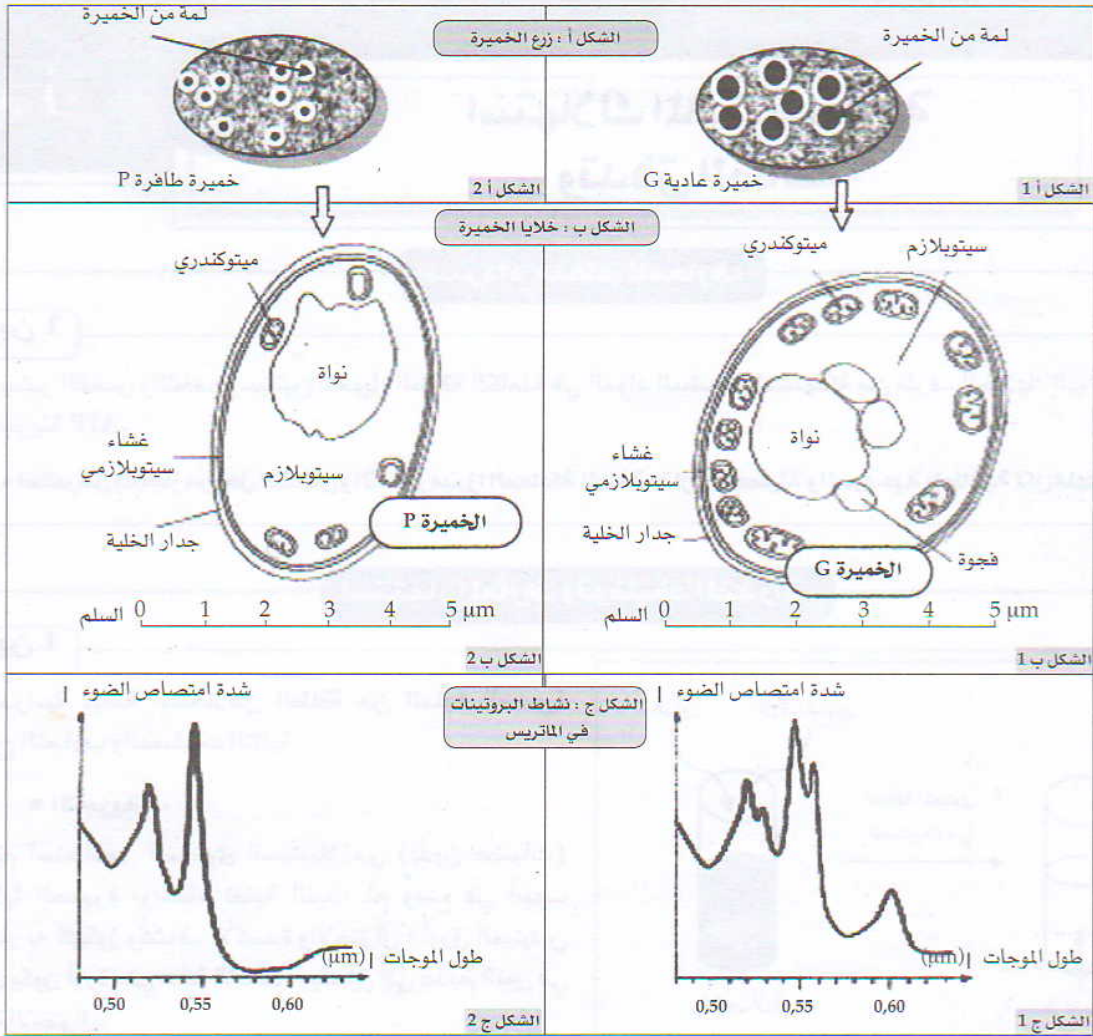
توجد سلالتان من الخميرة: سلالة G متوحشة وسلالة P طافرة، تتميز هذه الأخيرة بخلل على مستوى الميتوكوندري.

■ التجربة 3: تم زرع كل سلالة من الخميرة (P و G) في وسط زرع به كليكوز. يحتوي الوسطان على نفس كمية الكليكوز ويوجدان في نفس ظروف الزرع. أعطت نتيجة الزرع الشكلين 1 و 2 من الوثيقة 3. في نهاية هذه التجربة لوحظ اختفاء الكليكوز في أ 1 وظهور الإيثانول في أ 2.

كما أعطت ملاحظة عينة من كل سلالة بالمجهر الإلكتروني الشكلين ب 1 و ب 2.

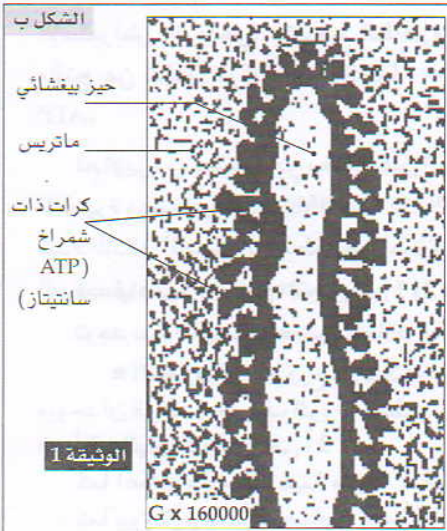
كما بين تتبع شدة امتصاص الضوء  $\lambda$  ب  $\mu\text{m}$  من طرف أنزيمات ماتريس الميتوكوندري لكل سلالة النتائج الواردة في الشكلين ج 1 و ج 2 من الوثيقة 3.



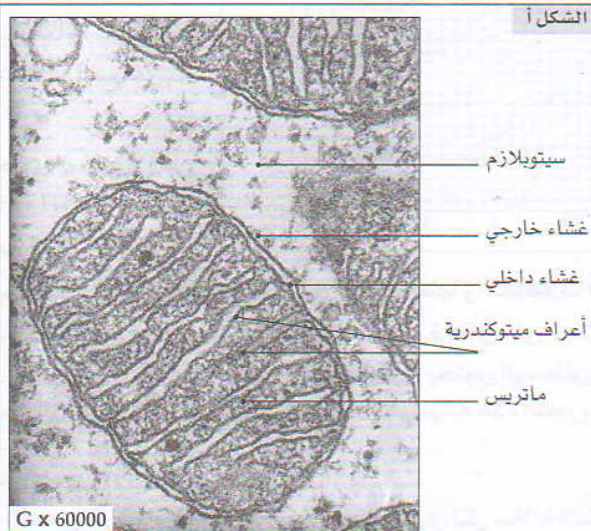


2- بعد تحليل النتائج الواردة في الوثيقة 3 استنتج المسلك الاستقلابي المعتمد لكل سلالة من الخميرة وعلاقته بحجم اللما.

## تمرين 2



ملاحظة إلكتروغرافية لأحد أعراف الميتوكوندري



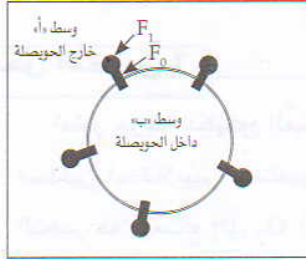
ملاحظة مجهرية للميتوكوندري

تستمد الخلايا الغير الذاتية التغذية الطاقة اللازمة لنشاطها من استغلال وتحويل الطاقة الكيميائية المتواجدة في المادة العضوية التي تحصل عليها من الوسط الذي تعيش فيه، تتوفر هذه الخلايا على ميتوكوندريات تتدخل في تفاعلات أكسدة - اختزال تمكن من استخلاص جزء هام من الطاقة من المادة العضوية وذلك بوجود  $O_2$ .

استهلاك المادة العضوية وتدفق الطاقة



- باستعمال الموجات فوق صوتية تمت تجزئة الميتوكوندري فتشكلت حويصلات للأغشية الداخلية بها كرات ذات شمراخ موجهة نحو الخارج، توضع هذه الحويصلات في أوساط مختلفة pH بوجود Pi و ADP وتم إنجاز التجارب التالية (الوثيقة 2):



التجربة	الوسط - أ -	الوسط - ب -	النتيجة الملاحظة
1	pH = 7	pH = 7	عدم تشكل ATP
2	pH = 7	pH = 4	تشكل ATP
3	Oligomycin pH = 7	pH = 4	عدم تشكل ATP
4	عينات pH = 7 Pi و ADP	pH = 4	عدم تشكل ATP
5	FCCP + pH = 7	pH = 4	عدم تشكل ATP

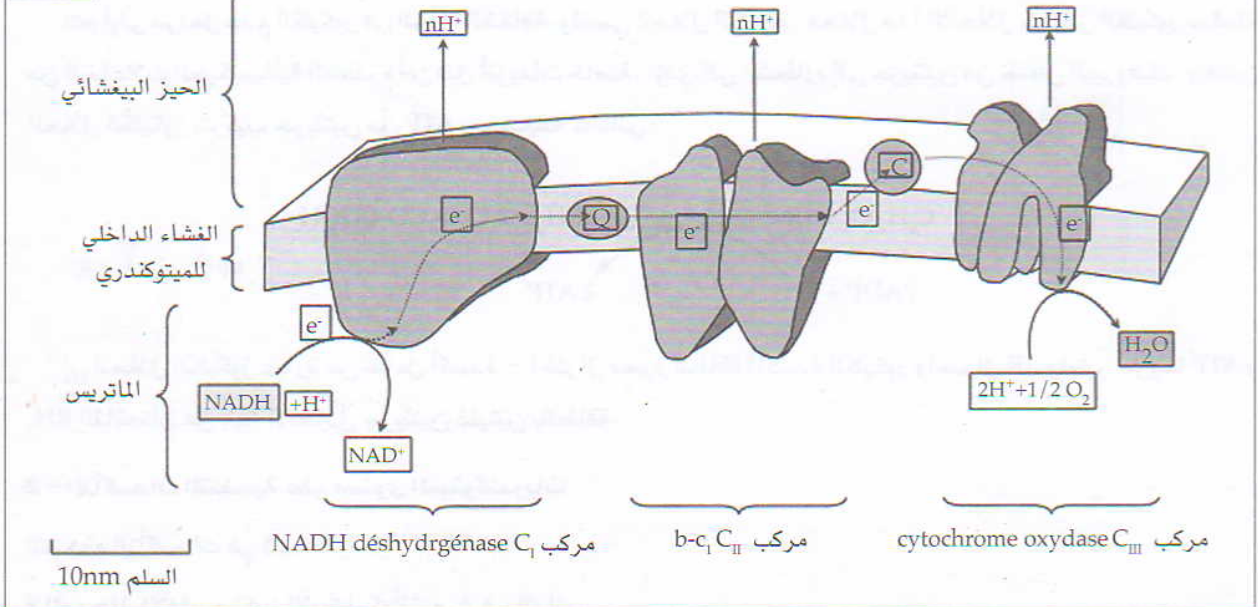
الشكل ب: حويصلة غشائية بها كرات ذات شمراخ

الشكل أ: Oligomycin : مادة تكبح نشاط المركب ATP سانتيتاز  
FCCP : مادة تجعل الغشاء نفوذاً للبروتونات H<sup>+</sup> من الحيز البيغشائي إلى الماتريس

### الوثيقة 2

- يحتوي الغشاء الداخلي للميتوكوندري على مركبات أنزيمية مختلفة C<sub>I</sub> و C<sub>II</sub> و C<sub>III</sub>، كما يحتوي على جزيئات متحركة (Cytochrome C و Ubiquinone Q) تنقل الإلكترونات بين المركبات الأنزيمية.

### الوثيقة 3



السلسلة التنفسية، انتقال الإلكترونات بين المركبات الأنزيمية

- سؤال : انطلاقاً من الاستغلال المنطقي والممنهج للوثائق 1، 2، و3 وبالإعتماد على معلوماتك بين كيف تنتج الخلايا ATP انطلاقاً من نواتج أكسدة المادة العضوية داخل الميتوكوندري.

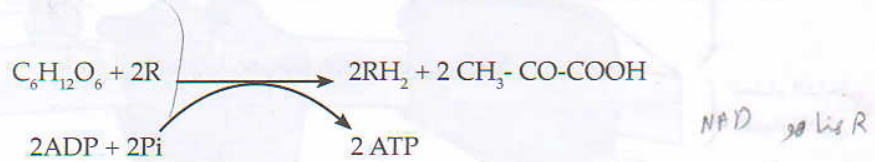
### حل التمرين 1

تعتبر جزيئة الكليكوذ المُستقلَب الطاقوي الرئيسي لجميع الخلايا التي تعمل على هدمه لاستخراج الطاقة الكامنة به حسب مسلكين استقلابيين مختلفين : التنفس والتخمير. يحدث التنفس في وسط يسود فيه الأوكسجين (وسط حي هوائي). أما التخمير فلا يحتاج إلى  $O_2$  (وسط حي لاهوائي). هناك أنواع عديدة من التخمرات أهمها : التخمر الكحولي الذي ينتج الإيثانول و  $CO_2$  والتخمير اللبني الذي يعطي الحمض اللبني.

#### 1 - انحلال الكليكوذ على مستوى الجبلة الشفافة : مرحلة مشتركة بين التنفس والتخمير

هو عبارة عن مجموعة من التفاعلات الكيميائية تتم على مستوى الجبلة الشفافة، وتتطلب أنزيمات نوعية. تتحول خلال هذه الظاهرة جزيئة من الكليكوذ فوسفات إلى جزيئتين من حمض البيروفيك.

تتم أولى مراحل هدم الكليكوذ في الجبلة الشفافة، وتسمى انحلال الكليكوذ. فخلال هذا الانحلال يتعرض الكليكوذ لسلسلة من التفاعلات الحيوكيميائية المحفزة من قبل أنزيمات خاصة، تؤدي إلى انشطاره إلى جزيئتين من حمض البيروفيك. ويقترن انحلال الكليكوذ بتركيب جزيئتين من ATP. وحصيلته كالتالي :



إن انحلال الكليكوذ عبارة عن تفاعل أكسدة - اختزال محرر للطاقة (أكسدة الكليكوذ واختزال R). وتعتبر جزيئة ATP و  $RH_2$  الناتجتان عن هذا الانحلال جزيئتين غنيتين بالطاقة.

#### 2 - التأكسيدات التنفسية على مستوى الميتوكوندريات

تتم هذه التأكسيدات في ثلاث مراحل :

##### ■ المرحلة الأولى : تكون الأستيل كوانزيم A في الماتريس.

يؤدي تأثير أنزيمات مُزيلة للهيدروجين وأنزيمات مُزيلة لثاني أوكسيد الكربون إلى انتزاع ذرة الهيدروجين وانتزاع جزيئة ثاني أوكسيد الكربون من حمض البيروفيك ( $CH_3 - CO - COOH$ )، ويرتبط الشق أستيل ( $CH_3 - CO$ ) المتبقي عن هذا التفكك بجزيئة صغيرة تدعى كوانزيم A ( $Co - A$ )، فيتكون أستيل كوانزيم A.

##### ■ المرحلة الثانية : دورة KREBS في الماتريس.

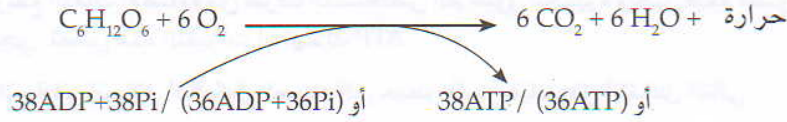
يثبت الشق أستيل على حمض أوكسالو أستيك ( $C_4$ ) فينتج عنه حمض الستريك ( $C_6$ ). أما الكوانزيم A فيتحرر قصد تثبيت شق أستيل جديد.

بمجرد تشكل حمض الستريك تنطلق دورة KREBS.



### ■ المرحلة الثالثة : اختزال الأوكسجين والتفسفر المؤكسد.

يتم على مستوى الغشاء الداخلي للميتوكوندري، إعادة أكسدة متقبلات الإلكترونات والبروتونات ( $\text{FADH}_2$  و  $\text{NADH}_2$ ) التي اختزلت خلال انحلال الكليكويز وتفكك حمض البيروفيك خلال دورة KREBS. تسترجع هذه المتقبلات حالتها المؤكسدة بتسليمها البروتونات والإلكترونات إلى سلسلة من جزيئات مرصعة في الغشاء الداخلي للميتوكوندري تسمى السلسلة التنفسية. تساهم السلسلة التنفسية في تفاعلات أكسدة واختزال وهي مسؤولة عن تدفق الإلكترونات والبروتونات انطلاقاً من المعطي الأولي : الزوج  $\text{NAD}^+ / \text{NADH}_2$  إلى المتقبل النهائي: الزوج  $\text{O}_2 / \text{H}_2\text{O}$ ، وتدعى عملية التدفق هذه الأوكسدة التنفسية. يمكن تمثيل المعادلة العامة للتنفس بالنسبة للكليكويز كنموذج على الشكل التالي :



### 3 - التخمر الكحولي

في غياب الأوكسجين يقوم حمض البيروفيك بدور المتقبل للهيدروجين، ينتج عن هذا التفاعل تكون الإيثانول وإعادة أكسدة  $\text{NADH}_2$ .



2 حمض البيروفيك  $\longrightarrow$  2 إيثانول

يحدث هذا التفاعل على مستوى الجبلة الشفافة

### 4 - مقارنة الحويلة الطاقية للتنفس والتخمر

التخمر	التنفس
- التنفس والتخمر طريقتان لهدم المستقلبات وتحويل جزء من الطاقة الكامنة في هذه الأخيرة إلى ATP ويحجز الجزء الآخر في الوسط على شكل حرارة. - التنفس والتخمر يبتدئان دائماً بمرحلة مشتركة تتم داخل الجبلة الشفافة وهي انحلال الكليكويز.	- التنفس والتخمر طريقتان لهدم المستقلبات وتحويل جزء من الطاقة الكامنة في هذه الأخيرة إلى ATP ويحجز الجزء الآخر في الوسط على شكل حرارة. - التنفس والتخمر يبتدئان دائماً بمرحلة مشتركة تتم داخل الجبلة الشفافة وهي انحلال الكليكويز.
- انطلاقاً من مول من الكليكويز تنتج الخلية 36 إلى 38 ATP : كمية الطاقة كبيرة.	- انطلاقاً من مول من الكليكويز تنتج الخلية 36 إلى 38 ATP : كمية الطاقة كبيرة.
- الطاقة المستخرجة من مول من الكليكويز خلال التخمر الكحولي.	- الطاقة الإجمالية التي يمكن استخراجها من مول من الكليكويز خلال التنفس.
$\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 \longrightarrow 2(\text{CH}_3 - \text{CH}_2\text{OH}) + 2\text{CO}_2$ [61kJ]	$\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6 \text{O}_2 \longrightarrow 6 \text{CO}_2 + 6 \text{H}_2\text{O} + [1098\text{kJ}]$
- هدم جزئي لجزيئة الكليكويز ناتج عن التخمر الكحولي، حيث أن الكحول الايثلي مازال يحتوي على طاقة.	- هدم كامل لجزيئة الكليكويز وتحرير كل الطاقة الكامنة فيها.
- استهلاك مول من الكليكويز يُنتج 61 kJ.	- علماً بأن مول من ATP تحرر 30,5 kJ، إذن استهلاك مول من الكليكويز ينتج 1098 kJ إلى 1160 kJ.
- المرودية الطاقية :	- المرودية الطاقية : 38,4% إلى 40,5%.
$\frac{61 \times 100}{2840} = 2,1\%$	$\frac{1098 \times 100}{2840} = 38,4\%$ ، $\frac{1159 \times 100}{2840} = 40,5\%$

ملحوظة : تُعطي الأوكسدة الكيميائية لمول من الكليكويز 2840 kJ.

## حل التمرين 1

1 - في التجربة 1: بعد إضافة الكليكوز للمحتوى السيتوبلازمي لخلايا الخميرة، يختفي هذا المستقلب ويظهر حمض البيروفيك، كما يتغير لون أزرق الميثيلين من أزرق إلى عديم اللون (اختزال أزرق الميثيلين).

يتعرض الكليكوز للأكسدة داخل المحتوى السيتوبلازمي.

في التجربة 2: يرتفع انبعاث الإضاءة من طرف المستخلص اللاخوي للخميرة ويصل قيمة قصوى بعد 2s ثم ينخفض انبعاث إضاءة بشكل تدريجي. تعكس هذه التغيرات استهلاك ATP.

تتمثل المرحلة الاستقلابية في انحلال الكليكوز وتحويله إلى حمض البيروفيك وفق التفاعل التالي:



تحدث هذه التفاعلات داخل الجبلة الشفافة.

2 - حجم اللامت كبير لدى سلالة الخميرة العادية G مقارنة مع سلالة الخميرة الطافرة P.

خلايا الخميرة من السلالة G لها حجم كبير (5µm) وتتوفر على ميتوكوندريات نامية وبأعداد كبيرة مقارنة مع خلايا السلالة P (3µm).

تبين تغيرات شدة امتصاص الضوء لدى بروتينات ماتريس ميتوكوندريات السلالة G عدة قيم وهو ما يعني تدخل عدة أنزيمات (خمسة) في نشاط الميتوكوندري لدى السلالة G، بينما تبين تغيرات شدة امتصاص الضوء لدى بروتينات ماتريس ميتوكوندريات السلالة P قمتان وهو ما يعني تدخل عدد قليل من الأنزيمات في نشاط الميتوكوندري لدى هذه السلالة.

كل سلالة تتخذ مسلكاً محدداً لاستخلاص الطاقة:

السلالة G: بوجود عدد كبير من الأنزيمات، تستطيع هدم حمض البيروفيك كلياً ضمن تفاعلات حلقة krebs والأكسدة التنفسية والتفسفر المؤكسد. هناك ربح كبير للطاقة يستعمل للنمو والتكاثر وهو ما يعكس خلايا خميرة نامية وبأعداد كبيرة (لمت كبيرة).

السلالة P: بوجود عدد قليل من الأنزيمات، لا تستطيع هذه الخلايا هدم حمض البيروفيك كلياً وتلجأ للتخمر الكحولي ويتحول حمض البيروفيك إلى حاتلة عضوية: الإيثانول. يتميز التخمر الكحولي بإنتاج ضئيل للطاقة يعكسه ضمور الميتوكوندريات وصغر حجم الخلايا وظهور لامت صغيرة.

## حل التمرين 2

### ■ الوثيقة 1 :

تحتوي الميتوكوندري على غشائين: غشاء خارجي وغشاء داخلي متعرج داخل الماتريس مشكلاً أعرافاً. تبين الملاحظة الإلكترونية أن الأعراف تحتوي على بنيات كروية موجهة نحو الماتريس ومرصعة في الغشاء بواسطة شمراخ. تسمى الكرات ذات الشمراخ المركب  $F_1 - F_0$  أو ATP سانتيتاز.

### ■ الوثيقة 2 :

• في التجربة 1 حيث يتساوى pH في الوسطين (pH = 7)، الوسط «أ» (الوسط الخارجي للحوصلة) والوسط «ب» (الوسط الداخلي للحوصلة)، لا يتم تركيب ATP.

• في التجربة 2 حيث pH الوسط الخارجي مرتفع (pH = 7)، و pH الوسط الداخلي منخفض (pH = 4) يتم تركيب ATP.



- في التجربة 3 حيث توجد مادة oligomycin في الوسط الخارجي والتي تكبح النشاط الأنزيمي للمركب  $F_1 - F_0$  ورغم أن pH هذا الوسط أكبر من pH الوسط الداخلي، فإنه لا يتم تركيب ATP ← يتطلب تركيب ATP نشاط المركب  $F_1 - F_0$ .
  - في التجربة 4، حيث لا يوجد Pi وADP ورغم أن pH الوسط الخارجي أكبر من pH الوسط الداخلي، فإنه لا يتم تركيب ATP ← يتطلب تركيب ATP وجود Pi وADP.
  - في التجربة 5، حيث توجد مادة FCCP في الوسط الخارجي تسمح بتدفق البروتونات  $H^+$  من الوسط الداخلي (pH منخفض) إلى الوسط الخارجي (pH مرتفع)، لا يتم تركيب ATP ← يتطلب تركيب ATP فارق تركيز  $H^+$  بين الوسطين.
- يمثل الوسط «أ» أي خارج الحويصلة الماتريس داخل الميتوكوندري، أما الوسط «ب» داخل الحويصلة فهو المرادف للحيز البيغشائي.

### ■ الوثيقة 3 :

تتكون السلسلة التنفسية من ثلاثة مركبات أنزيمية كبيرة ( $C_I, C_{II}, C_{III}$ ) مرصعة في الغشاء الداخلي للميتوكوندري، كل مركب بمثابة مضخة للبروتونات  $H^+$  يغذيها تدفق الإلكترونات  $e^-$ .  
 يحرر ( $NADH, H^+$ ) إلكترونات وبروتونات. تنتقل الإلكترونات بين المركبات الثلاث بواسطة جزيئة Q (Ubiquinone) وجزيئة C (Cytochrome C) التي تمثل ناقلات متحركة داخل الغشاء الداخلي للميتوكوندري.  
 يصاحب تنقل الإلكترونات عبر السلسلة التنفسية تحرير للطاقة تستعمله المركبات  $C_I$  و  $C_{II}$  و  $C_{III}$  لضخ البروتونات من الماتريس في اتجاه الحيز البيغشائي. ينتهي تنقل الإلكترونات بالوصول إلى المتقبل النهائي  $O_2$  الذي يتحول إلى ماء.  
 يترتب عن ضخ البروتونات إلى الحيز البيغشائي نشوء ممال  $H^+$  من جهتي الغشاء الداخلي للميتوكوندري.



← ظهور فرق جهد بين الحيز البيغشائي والماتريس

يستغل المركب ATP سانتيماز الطاقة الناتجة عن وجود فرق جهد  $H^+$  في تركيب ATP انطلاقاً من ADP وPi وعودة أيونات  $H^+$  إلى الماتريس عبر هذا المركب : إنها ظاهرة التفسفر المؤكسد.

