الفصل الثالث

إنتاج المادة العضوية وتدفق الطاقة

مقدمة:

بفضل اليخضور La chlorophylle (صبغة خضراء) تلتقط النباتات الخضراء الطاقة الشمسية (الضوء) وتوظفها في إنتاج المواد العضوية انطلاقا من الماء و CO_2 والأملاح المعدنية. وهكذا تتمكن النباتات اليخضورية من تحويل الطاقة الضوئية إلى مواد عضوية تدخر الطاقة الكيميائية.

- **فكيف تتمكن النبتة من تحويل الطاقة الضوئية إلى طاقة كيميائية؟**
- **وما هي البنيات والجزيئات المساهمة في هذا التحول؟**
- **ما الآليات البيوكيميائية المسؤولة عن هذا التحول؟**

I – الصبغات اليخضورية ومكان تموضعها داخل الخلية Les pigments chlorophylliens

① استخلاص الصبغات اليخضورية

أ – مناولات: أنظر الوثيقة 1

الوثيقة1: استخلاص الصبغات اليخضورية.

★المناولة الأولى: استخلاص اليخضور(أنظر الشكل أ)

⇦ نقوم بتقطيع أوراق خضراء إلى أجزاء، ثم نقوم بهرسها في مهراس مع قليل من الرمل من أجل سحق الخلايا.

⇦ نضيف بكيفية تدريجية 10ml من الكحول 90° أو الأسيتون Acétone، من أجل تذويب الصبغات اليخضورية.

⇦ نقوم بترشيح محتوى المهراس باستعمال ورق الترشيح، وبذلك نحصل على محلول كحولي للصبغات اليخضورية، انه اليخضور الخام Chlorophylle brute.

★ المناولة الثانية: عزل الصبغات اليخضورية بواسطة الذوبانية الاختلافية (أنظر الشكل ب).

باعتبار أن قابلية الذوبان للصبغات اليخضورية تختلف حسب المذيبات، نقوم بالمناولة التالية:

⇦ نسكب $5cm^3$ من المحلول الأسيتوني لليخضور الخام في أنبوب اختبار، ونضيف إليه $5cm^3$ من ايثير البترول وقليلا من الماء (الأنبوب ①) فنحصل على خليطين (الأنبوب ②).

⇦ نحتفظ بالخليط الأكثر اخضرارا وهو الذي يحتوي على اثير البترول. ثم نضيف لهذا الخليط كحول الميتانول (الأنبوب ③).

★ المناولة الثالثة: عزل اليخضور بواسطة التحليل الكروماتوغرافي (أنظر الشكل ج).

⇦ نضع قطرة أو قطرتين من محلول اليخضور الخام على بعد 2 cm من أسفل سفيفة ورق Wattman.

⇦ نترك البقعة الخضراء حتى تجف، ثم نضيف إليها قطرات أخرى، ثم ننتظر حتى تجف البقعة تماما.

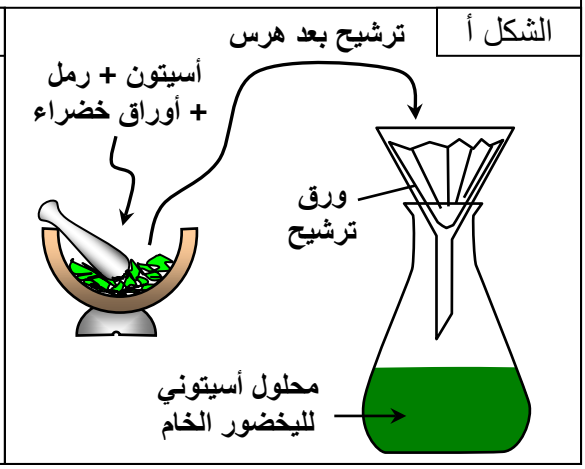
⇦ نعلق السفيفة بسدادة ونضعها داخل مخبار مدرج به خليط من المذيبات العضوية، لا يتعدى علوه 2cm. مع الحرص أن لا يغمر هذا الأخير إلا بضع مليمترات من أسفل السفيفة.

⇦ نغلق المخبار لمنع تبخر المذيبات مع الحرص على عدم لمس الورقة لجدار المخبار.

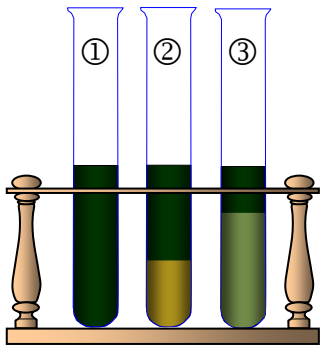
⇦ نحجب التركيب عن الضوء لمدة 40min.

1) أنجز المناولات الممثلة في الوثيقة.
2) ماذا تستخلص من تحليلك لنتائج هذه المناولات؟

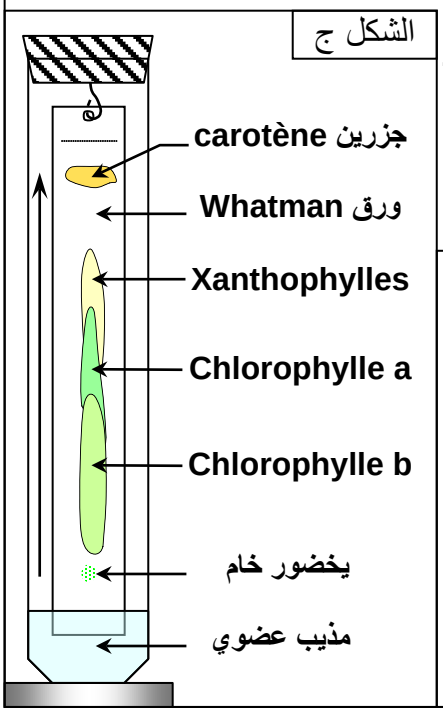
الشكل أ



الشكل ب



الشكل ج



Moutamadris.ma

ب – تحليل النتائج:

1) انجاز المناولات.

2) تحليل واستنتاج:

★ المناولة الأولى:
نعتمد في هذه الحالة على خاصية ذوبانية الصبغات اليخضورية في المحاليل العضوية (الكحول والأستون.....).
● بعد استخلاص اليخضور يظهر ورق الترشيح دوائر بألوان مختلفة (خضراء، صفراء، برتقالية)، مما يبين أن اليخضور الخام يتكون من صبغات مختلفة.
● عند تسليط الضوء الأبيض على محلول اليخضور الخام نلاحظ أن الإشعاعات التي تعبر المحلول تكون ذات لون أخضر هذا يعني أن هذه الإشعاعات لا يتم امتصاصها. لكن عند ملاحظة المحلول من جهة المنبع الضوئي تظهر إشعاعات حمراء، نتكلم عن ظاهرة التفلور Fluorescence. والتي تفسر بكون جزيئات اليخضور الخام تصدر الطاقة الضوئية الممتصة على شكل إشعاعات حمراء و حرارة.

★ المناولة الثانية:
نلاحظ بعد إضافة قطرات من الماء انفصال الكحول الخفيف عن إثير البترول الثقيل و ذوبان صبغات يخضورية مختلفة في كل محلول. تسمى بالذوبانية الإختلافية للصبغات اليخضورية.
نستنتج أن اليخضور مكون من نوعين من الصبغات على الأقل: الصفراء والخضراء.

★ المناولة الثالثة:
يعطي التحليل الكروماتوغرافي أربع بقع مختلفة الألوان، وعلى مستويات مختلفة من مكان تموضع اليخضور الخام.
نستنتج أن اليخضور الخام مكون من أربع صبغات تتموضع على الورق الكروماتوغرافي حسب درجة ذوبانيتها في المحلول، وهي:
اليخضور b: ذو لون أخضر مصفر واليخضور a: ذو لون أخضر مزرق والجزرين: ذو لون برتقالي والكزانتوفيلات.

ج – خلاصة:

تحتوي النباتات الخضراء على عدة أنواع من الصبغات اليخضورية قادرة على امتصاص الضوء وهي:
اليخضور ذو اللون الأخضر المصفر، هو اليخضور b.
اليخضور ذو اللون الأخضر المزرق، هو اليخضور a.
الكزانتوفيلات مصفرة ذات اللون الأصفر.
الجزرين ذو اللون البرتقالي.

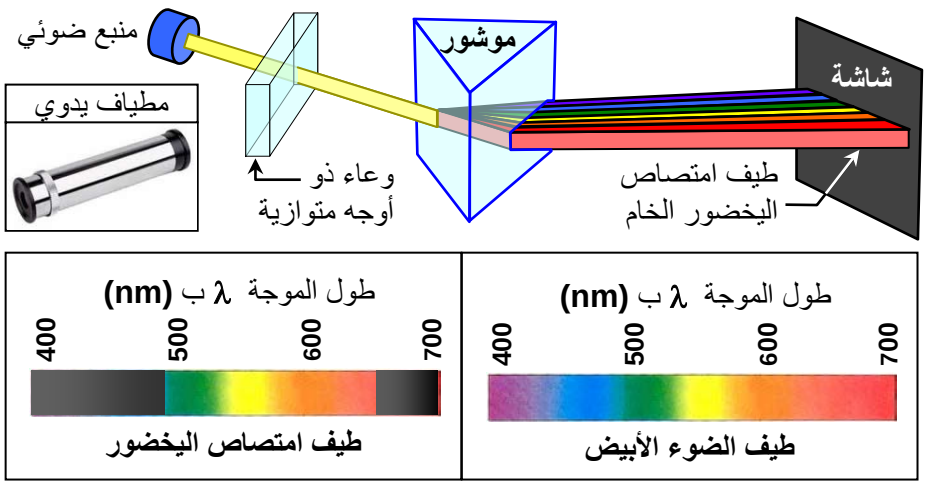
② خاصيات الصبغات اليخضورية

أ – كيف يتعامل اليخضور مع مختلف الإشعاعات؟

a – الكشف عن طيف امتصاص اليخضور الخام Le spectre d'absorption (أنظر الوثيقة 2)

الوثيقة 2: الكشف عن امتصاص الإشعاعات الضوئية من طرف الصبغات اليخضورية.

نحصل على طيف الضوء الأبيض بتعريض شعاع من الضوء الأبيض لموشور (Prisme)، واستقبال الأشعة النافذة منه على شاشة،
وللكشف عن طيف امتصاص اليخضور الخام نملأ وعاء ذا أوجه متوازية بمادة اليخضور الخام، ثم نضعه بين الموشور ومنبع الضوء، ونلاحظ النتيجة على الشاشة.
قارن بين طيف الضوء الأبيض وطيف اليخضور الخام. ماذا تستنتج؟



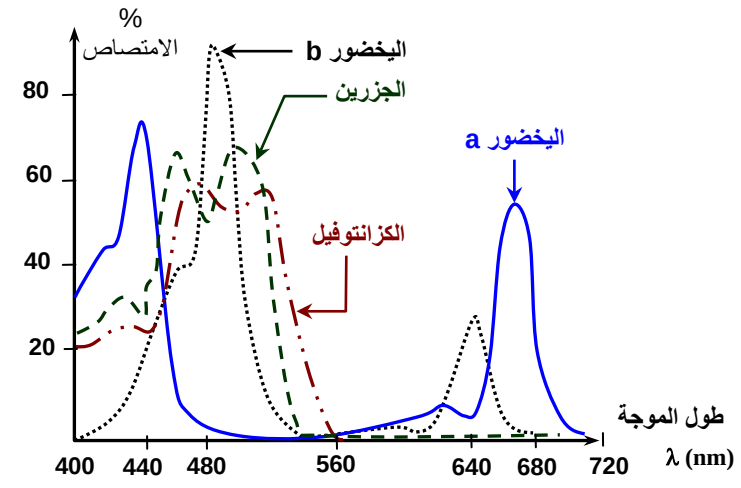
Moutamadris.ma

تتمة الوثيقة 2:

أطياف امتصاص الصبغات اليخضورية

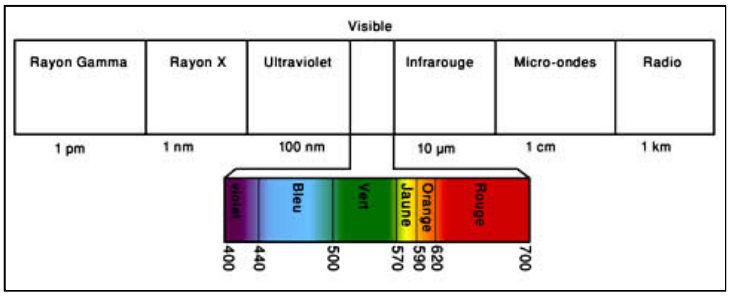
بطريقة مماثلة لطريقة قياس طيف امتصاص اليخضور الخام، نحصل على قياسات طيف امتصاص الصبغات اليخضورية بعد عزلها.
يعطي المبيان أمامه أطياف امتصاص أهم الصبغات اليخضورية.

★ ماذا تستخلص من تحليل هذه المعطيات؟



b – تحليل واستنتاج

★ يتبين من ملاحظة طيف الضوء الأبيض أن هذا الأخير يتكون من إشعاعات مختلفة يتراوح طول موجتها λ من 400nm (البنفسجي) إلى 720nm (الأحمر).



★ عندما نضع محلول اليخضور الخام بين منبع الضوء والموشور نحصل على طيف من الإشعاعات يظهر أشرطة مظلمة توافق الإشعاعات الممتصة من طرف اليخضور. نتكلم عن طيف امتصاص اليخضور الخام.

★ نستنتج من هذه المعطيات أن اليخضور الخام يمتص الإشعاعات البنفسجية، والزرقاء والحمراء. ويعكس الإشعاعات الصفراء والخضراء والبرتقالية وخاصة الخضراء مما يعطي اللون الأخضر للنباتات الخضراء.

★ تبين منحنيات شدة امتصاص الإشعاعات من طرف الصبغات اليخضورية أن مجال الموجات الممتصة يهم بالأساس اللونين الأزرق والأحمر والأقل امتصاصا يهم اللون الأخضر.
نستنتج إذن أن الصبغات اليخضورية المكونة لليخضور لا تمتص كل الإشعاعات المكونة للضوء الأبيض. فهل فعالية التركيب الضوئي تختلف حسب نوعية الإشعاعات الممتصة من طرف اليخضور؟

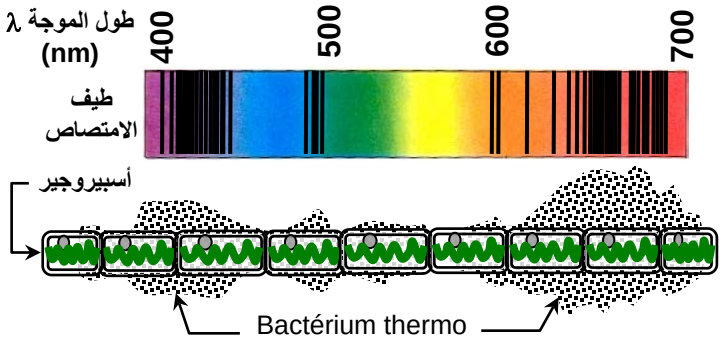
ب – فعالية الإشعاعات الممتصة

a – معطيات تجريبية: أنظر الوثيقة 3

الوثيقة 3: فعالية الإشعاعات الممتصة

★ التجربة الأولى: تجربة Engelmann 1885:
لمعرفة تأثير مختلف الإشعاعات الضوئية الممتصة على شدة التركيب الضوئي. قام Engelmann بوضع طحلب الأسبيروجير في وسط يحتوي على عالق من بكتيريا Bactérium thermo التي تتميز بالانجذاب الكيميائي ل O_2. يبين الشكل أمامه نتائج هذه التجربة.

1) قارن بين النتائج التجريبية المحصلة واقترح تفسيرا لذلك.

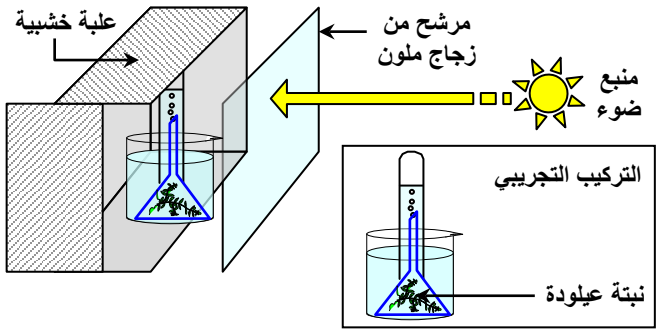


Moutamadris.ma

الوثيقة 3 (تابع): فعالية الإشعاعات الممتصة

★ التجربة الثانية: نضع التركيب التجريبي داخل علبة خشبية، ثم نعرض الوجه المفتوح من العلبة لمنبع ضوئي بعد حجب الضوء بأحد المرشحات الزجاجية الملونة (الأحمر، الأصفر، الأخضر، الأزرق والبنفسجي).
نقوم بقياس حجم O_2 المطروح خلال استعمال كل مرشح وذلك خلال نفس المدة الزمنية.
نحصل على النتائج الممثلة أمامه.

2) ماذا تستنتج من نتائج هذه التجربة؟



لون المرشح	بنفسجي	أزرق	أخضر	أصفر	أحمر
عدد فقاعات O_2 في الدقيقة	8	6	0	3	12

b – تحليل واستنتاج

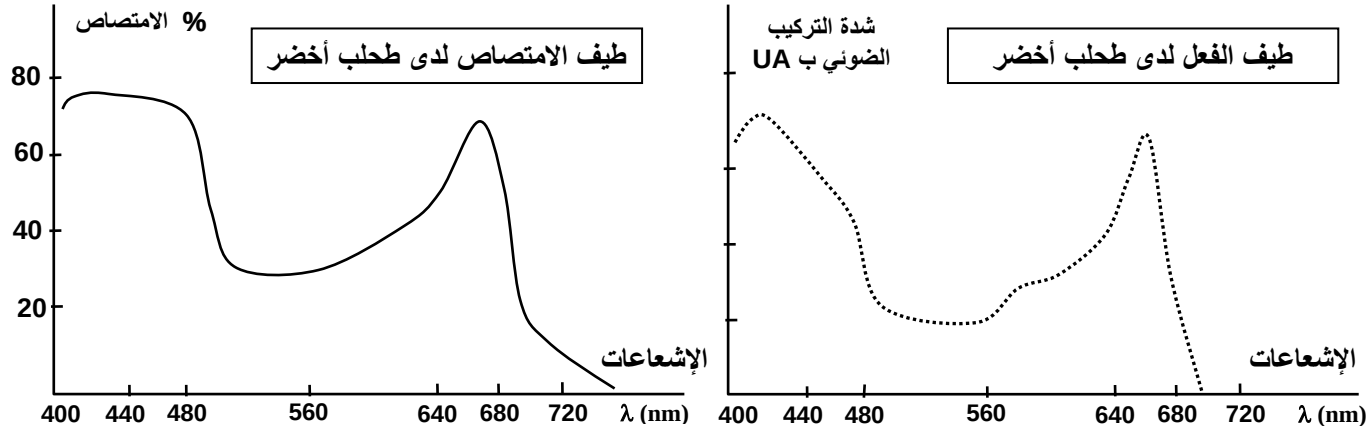
1) خلال التجربة الأولى نلاحظ تجمعا كثيفا للمستعمرات البكتيرية حول الطحلب مقابل الإشعاعات الزرقاء والحمراء، في حين تنفر البكتيريا من الإشعاعات الخضراء.
نستنتج من هذا أن المناطق التي تجمعت فيها البكتيريا غنية بالأكسجين نظرا لوجود أشعة تنشط ظاهرة التركيب الضوئي.

2) خلال التجربة الثانية نلاحظ تحرير كمية كبيرة من الأكسجين في الأنبوب عند استعمال المرشح الأحمر والبنفسجي، وكمية متوسطة عند استعمال المرشح الأزرق، وكمية ضعيفة عند استعمال المرشح الأصفر. في حين ينعدم تحرير O_2 عند استعمال المرشح الأخضر.
نستنتج أن الإشعاعات الضوئية لا تتوفر على نفس الفعالية في عملية التركيب الضوئي. ويطلق على فعالية مختلف الإشعاعات الممتصة اسم طيف الفعل Spectre d'action.

ج – طيف الامتصاص وطيف الفعل أنظر الوثيقة 4

الوثيقة 4: طيف الفعل لدى طحلب أخضر

نقيس شدة التركيب الضوئي (طيف الفعل) وكمية الضوء الممتص على مستوى اليخضور (طيف الامتصاص).
ونمثل على نفس المبيان تغيرات شدة التركيب الضوئي ونسبة الامتصاص حسب طول الموجات الضوئية.
قارن بين طيف الامتصاص وطيف الفعل. ماذا تستنتج من ذلك؟



نلاحظ أن هناك تطابق بين طيف الامتصاص وطيف الفعل، وبالتالي فالإشعاعات الأكثر امتصاصا هي نفسها الأكثر فعالية في التركيب الضوئي. نستنتج من هذه المعطيات أن الطاقة الضوئية الممتصة من طرف الصبغات اليخضورية تستعمل في ظاهرة التركيب الضوئي. وكل إشعاع ممتص يكون إشعاعا فعالا.

د – خاصية التفلور لدى اليخضور La fluorescence أنظر الوثيقة 5

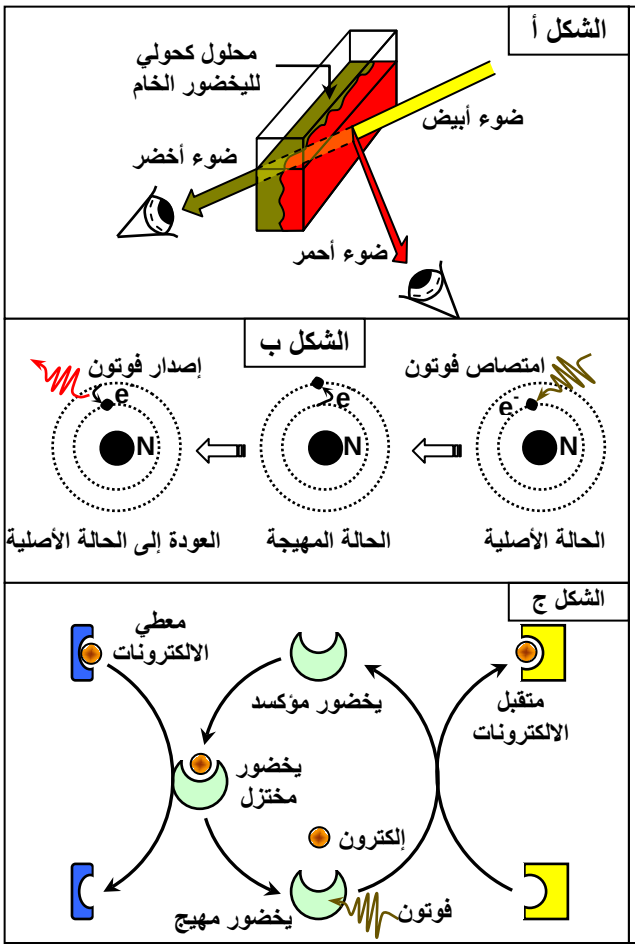
Moutamadris.ma

الوثيقة 5: خاصية التفلور لدى اليخضور La fluorescence

★ عند تسليط الضوء الأبيض على محلول اليخضور الخام، تكون الإشعاعات الضوئية التي تعبر المحلول خضراء والمنعكسة حمراء. وتسمى هذه الظاهرة بالتفلور (الشكل أ).
وتفسر بكون جزيئات اليخضور المعزول تستجيب للضوء بفقدان إلكترون يخرج عن مداره مبتعدا عن نواة الذرة ومكتسبا مستوى طاقيا أكبر مؤقتا. وعند رجوعه إلى مداره الأصلي يعيد الطاقة المكتسبة على شكل حرارة وتفلور (الشكل ب)

★ تنتظم جزيئات الصبغات اليخضورية على شكل مجموعة وظيفية تسمى اللاقطة المجمعة. تلتقط هذه الجزيئات الطاقة الضوئية وتوجهها إلى جزيئة واحدة من اليخضور a التي تصبح في حالة اهتياج.
عند اهتياجها تفقد جزيئة اليخضور a الكترونا لفائدة متقبل الكترونات فتكتسب قدرة مؤكسدة عالية تمكنها من انتزاع إلكترون من معطي الكترونات لتسترجع حالتها الأصلية (الشكل ج).
تسمى الوحدة الوظيفية المكونة من اللاقطة المجمعة وجزيئة اليخضور a نظاما ضوئيا.

من خلال معطيات هذه الوثيقة أبرز دور النظام الضوئي في تحويل الطاقة الضوئية إلى طاقة كيميائية.



بعد امتصاصها لكمية من الطاقة الضوئية تصبح جزيئة اليخضور مهيجة، ويمن أن تعود إلى حالتها الأصلية بثلاث طرق:

★ طرح كمية من الحرارة والضوء، طول موجتها أطول من طول الموجة الممتصة وهذا ما يسمى بالتفلور.

★ نقل الطاقة إلى جزيئة أخرى، هذه الأخيرة تصبح بدورها مهيجة.

★ تنشيط نقل الالكترونات بين معط D ومستقبل R، يتميزان بجهد أكسدة - اختزال (E_0) بحيث $E_0D^+/D < E_0R^+/R$.
ويتم هذا التنشيط بواسطة اليخضور a الذي يهيج تحت تأثير فوتون فيفقد إلكترون ويكتسب قدرة مؤكسدة عالية تسمح له بانتزاع إلكترون من معط للالكترونات لتسترجع حالتها الأصلية. انه تفاعل أكسدة – اختزال باستعمال طاقة الضوء، وهكذا يحول اليخضور a الطاقة الضوئية إلى عمل كيميائي.
تسمى الوحدة الوظيفية المكونة من اللاقطة المجمعة وجزيئة اليخضور a نظاما ضوئيا Photosystème.

★ تفاعلات الأكسدة - اختزال هي تفاعلات كيميائية يحدث خلالها انتقال الإلكترونات بين معط للإلكترونات (مختزِل) ومتقبل للإلكترونات (مؤكسِد).
يتميز كل زوج مؤكسد – مختزل بجهد أكسدة – اختزال (E_0)، يعبر عن قدرته على الاختزال، ففي المثال أسفله تنتقل الإلكترونات من D إلى R دون مصدر خارجي للطاقة مما يعني أن: $E_0D^+/D < E_0R^+/R$

تفاعل أكسدة / اختزال: $D + R^+ \longrightarrow D^+ + R$

تفاعل أكسدة: D (مختزِل) $\longrightarrow D^+ + e^-$

تفاعل اختزال: $R^+ + e^- \longrightarrow R$ (مؤكسَد)

③ على أي مستوى من الخلية يوجد اليخضور؟ أنظر الوثيقة 6

أ – ملاحظة مجهرية لورقة خضراء:

★ يتضح من الملاحظة المجهرية لورقة خضراء (الشكل أ) أنها تتكون من مجموعة من الخلايا تحتوي على عناصر شبه كروية الشكل ذات لون أخضر، نسميها بلاستيدات خضراء Les chloroplastes. نستنتج إذن أن هذه العضيات الخلوية هي التي تحتوي على اليخضور.

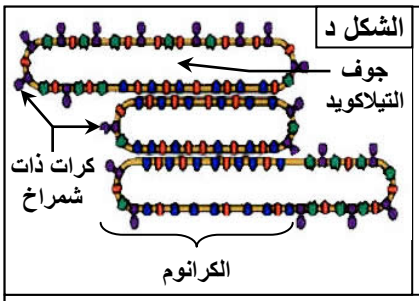
Moutamadris.ma

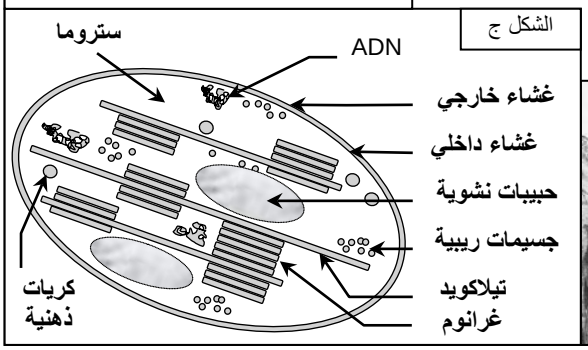
ب – بنية وفوق بنية البلاستيدة الخضراء:

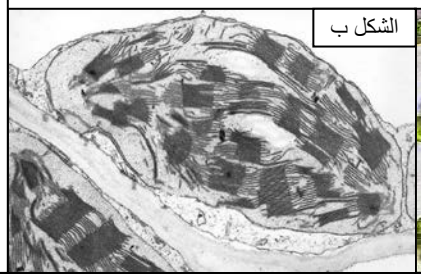
الوثيقة 6: مكان تموضع الصبغات اليخضورية

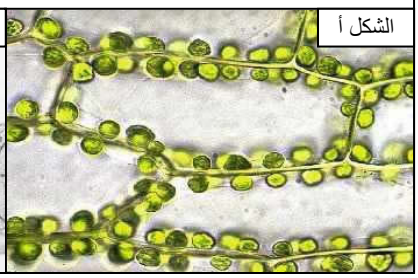
يعطي الشكل أ ملاحظة مجهرية لخلايا ورق عيلودة. ويعطي الشكل ب فوق بنية البلاستيدة الخضراء ملاحظة بالمجهر الالكتروني. والشكل ج رسم تفسيري لفوق بنية البلاستيدة الخضراء. والشكل د رسم تفسيري لفوق بنية التيلاكويد.

بالاعتماد على معطيات الوثيقة وعلى ملاحظات مجهرية لورقة خضراء صف بنية وفوق بنية البلاستيدة الخضراء وحدد تموضع الصبغات اليخضورية بها.









★ تبين الملاحظة الالكترونوغرافية (الشكل ب وج) أن البلاستيدة الخضراء تتكون من صفيحات ممتدة داخل وسط عديم اللون يسمى الستروما Stroma.
تظهر البلاستيدة الخضراء غشاءين، غشاء خارجي وغشاء داخلي. هذا الأخير يظهر تفرعات هي التي تكون الصفيحات والتي نسميها التيلاكويد Thylacoïde.
في بعض المناطق تتجمع الصفيحات على شكل أقراص متراكبة تسمى الكرانوم Granum.
تتجمع الصبغات اليخضورية في أغشية التيلاكويد. كما تظهر هذه الأغشية عناصر يتراوح قطرها بين 8nm إلى 9nm تسمى كريات ذات شمراخ Sphères pédonculées (الشكل د)، وهي عبارة عن مركبات أنزيمية تحتوي على أنزيم ATP سانتيتاز ATP Synthétase.
نجد بالستروما عدة جزيئات عضوية أهمها النشا وعدة أنزيمات كالأنزيم المسؤول عن إدماج CO_2.

ج – خلاصة:

تنفرد البلاستيدة الخضراء باحتوائها على اليخضور الذي تستمد منه لونها الأخضر. وهي عضيات خلوية تسبح في السيتوبلازم. تحتوي كل بلاستيدة على صفيحات التيلاكويد التي تتجمع في مناطق متعددة على شكل كرانوم. وتشبه التيلاكويد في بنيتها الغشاء الغشاء السيتوبلازمي إلا أنها تتميز باحتوائها على جزيئات اليخضور وعلى أنزيمات تساهم في عملية التركيب الضوئي.

II – آلية التركيب الضوئي

① الكشف عن مراحل التركيب الضوئي

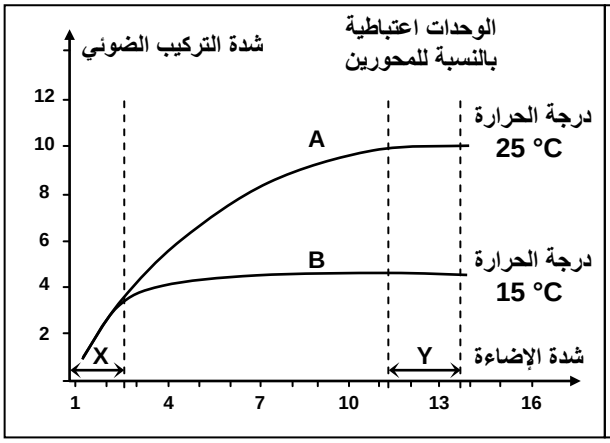
أ – ملاحظات Blackman (1905): أنظر الوثيقة 7

الوثيقة 7: الكشف عن تفاعلات التركيب الضوئي

اهتم Blackman بدراسة تأثير درجة الحرارة وشدة الإضاءة على شدة التركيب الضوئي، فحصل على النتائج الممثلة على المبيان أمامه.

افترض Blackman وجود نوعين من التفاعلات في ظاهرة التركيب الضوئي: تفاعلات ضوكيميائية وأخرى كيميائية حرارية.

أبرز هذا الافتراض انطلاقا من تحليل معطيات هذه الوثيقة.



Moutamadris.ma

ب – تحليل واستنتاج

★ في المرحلة X عند شدة إضاءة ضعيفة نلاحظ أن شدة التركيب الضوئي تتأثر بشدة الإضاءة، ولا تتأثر بدرجة الحرارة، إذ ترتفع شدة التركيب الضوئي مع ارتفاع شدة الإضاءة. وبالتالي فالعامل المحدد لهذه الفترة هو شدة الإضاءة.

★ في المرحلة Y عند شدة إضاءة مرتفعة نلاحظ أن شدة التركيب الضوئي لا تتأثر بشدة الإضاءة، وتتأثر بدرجة الحرارة، إذ ترتفع شدة التركيب الضوئي عند ارتفاع درجة الحرارة. وبالتالي فالعامل المحدد لهذه الفترة هو درجة الحرارة.

★ انطلاقا من هذه المعطيات يمكن افتراض تدخل نوعين من التفاعلات خلال عملية التركيب الضوئي:
- ✓ تفاعلات ضوكيميائية Réactions photochimiques تستلزم الإضاءة ولا تتأثر بالحرارة.
- ✓ تفاعلات كيميائية حرارية Thermochimiques لا تستلزم الإضاءة وتتأثر بالحرارة.

② التفاعلات الأساسية للتركيب الضوئي

أ – تفاعلات المرحلة المضاءة: أكسدة الماء

تلتقط الصبغات اليخضورية (اليخضور b والمصفر والجزرين) الطاقة الضوئية، وتنقلها إلى اليخضور a التي تحرر الكترونا لفائدة متقبل الكترونات وتصبح قادرة على انتزاع إلكترون من معط للالكترونات.
فما المصدر الطبيعي للالكترونات المنتزعة من طرف اليخضور a؟ وما مصير الإلكترون المحرر من طرفه؟

a – الكشف عن التحليل الضوكيميائي للماء: La photolyse de l'eau (أنظر الوثيقة 8)

الوثيقة 8: الكشف عن التحليل الضوكيميائي للماء La photolyse de l'eau

★ تجربة Karmen و Ruben (1941).

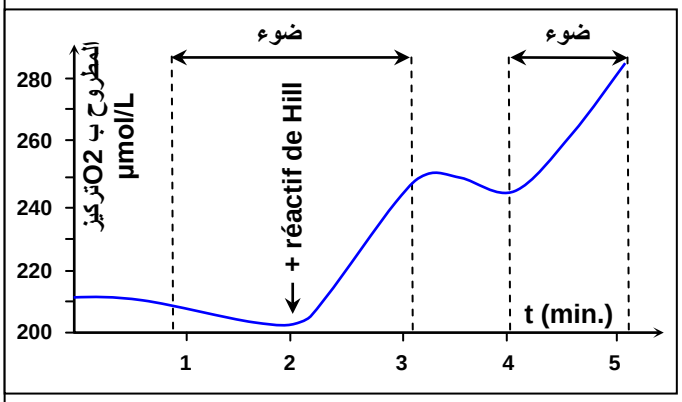
لمعرفة أصل O_2 المطروح اثر التركيب الضوئي قام Karmen وRuben بتزويد وسط زرع طحلب يخضوري أحادي الخلية (الكلوريل Chlorelle) بماء مشع يحتوي على الأكسجين الثقيل H_2O^{18} وبثنائي أكسيد الكربون يحتوي على الأكسجين الخفيف CO_2^{16}. ثم قاما بتحليل الأكسجين المطروح الذي اتضح أنه يحتوي على O^{18} بنسبة قريبة من نسبته في الماء المستعمل في بداية التجربة. كما قاما بتجربة مضادة حيث زودت الكلوريلات بماء يحتوي على الأكسجين الخفيف H_2O^{16} وبثنائي أكسيد الكربون مشع يحتوي على الأكسجين الثقيل CO_2^{18}. وتبين أن الأكسجين المطروح يحتوي على O^{16} بنفس النسبة الموجودة في الماء المستعمل في التجربة المضادة.

1) ماذا يمكنك استخلاصه من هذه التجارب؟
2) أكتب معادلة التفاعل.

★ تجربة Hill (1939)

استعمل Hill محلولا عالقا للبلاستيدات الخضراء المعزولة في وسط بدون CO2. وقام بقياس حجم O2 المطروح تحت إضاءة مستمرة. أضاف إلى الوسط متقبلا غير طبيعي للالكترونات (Ferricyanure de potassium) يدعى كاشف Hill بدل المتقبل الطبيعي الموجود داخل البلاستيدة الخضراء. يحتوي هذا الكاشف على Fe3+ وهو ايون قابل لاستقبال إلكترون وفق التفاعل التالي:

$Fe^{3+} + 1e^- \text{----------}> Fe^{2+}$



1) ما يمكن استخلاصه من نتائج تجربة Karmen وRuben، هو أن الماء هو أصل O_2 المطروح أثناء عملية التركيب الضوئي

2) يكتب التفاعل كما يلي: $2H_2O \text{----------}> 4H^+ + 4e^- + O_2$

يسمى هذا التفاعل بالتحليل الضوكيميائي للماء La photolyse de l'eau

Moutamadris.ma

3) في الظلام وقبل إضافة كاشف Hill نلاحظ أن نسبة O_2 المطروح تكون منخفضة. وبعد إضافة هذا الكاشف نلاحظ ارتفاع نسبة O_2 المطروح، طيلة مدة الإضاءة. وفي الظلام تنخفض من جديد نسبة O_2 المطروح.
نستنتج من هذا أن طرح O2 مرتبط بوجود مادة كيميائية متقبلة للالكترونات. في هذه التجربة المادة المتقبلة للالكترونات هي أملاح الحديد حيث $Fe^{3+} + 1e^- \text{----------}> Fe^{2+}$.
في الحالة الطبيعية، المادة الكيميائية المتقبلة للالكترونات هي جزيئة NADP (Nicotinamide Adénine Diphosphate) توجد في الستروما وتتميز بقدرة اختزالية عالية تمكنها من اكتساب الالكترونات حسب التفاعل التالي:

$$NADP^+ + 2H^+ + 2e^- \text{----------}> NADPH,H^+$$

خلاصة: يتبين من تجربة Hill أن تفاعلات طرح O_2 هي تفاعلات أكسدة للماء (فقدان الكترونات). وإذا رمزنا للمادة المؤكسدة ب A يكون التفاعل:

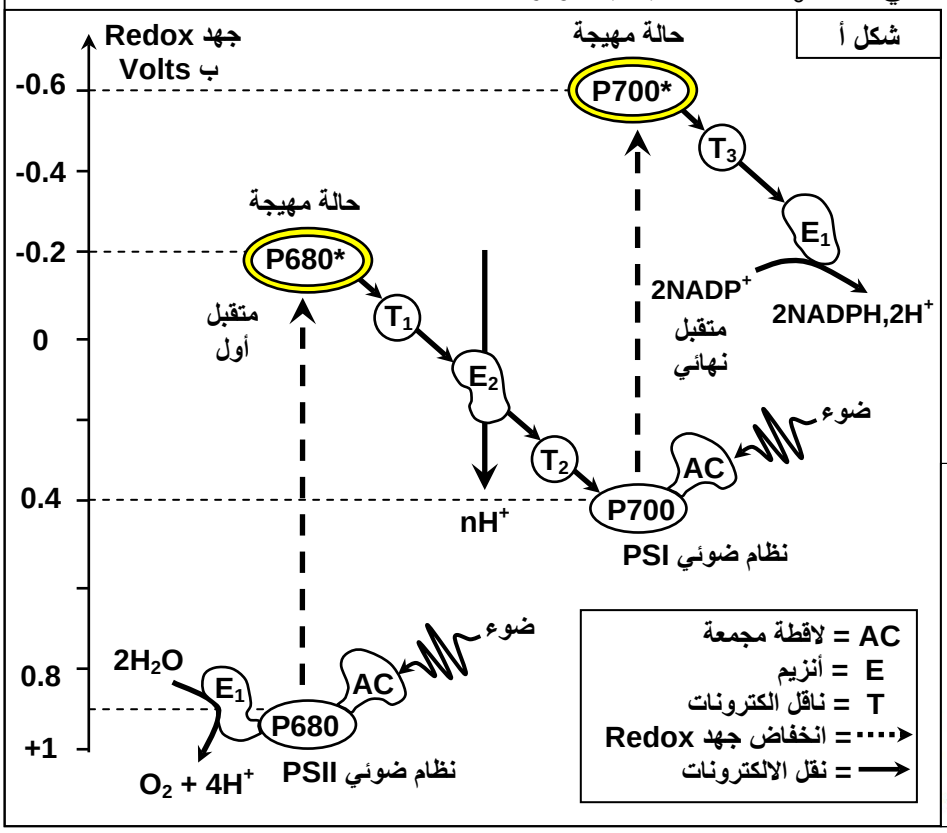
$$\left.\begin{array}{l} 2H_2O \text{--------}> 4H^+ + 4e^- + O_2 \\ 2A + 4H^+ + 4e^- \text{--------}> 2AH_2 \end{array}\right\} \underset{\text{الحصيلة}}{2A + 2H_2O \text{----------}> 2AH_2 + O_2}$$

إن الإلكترون المنزوع من طرف جزيئات اليخضور a يستقبل من طرف جزيئات $NADP^+$ حيث يتم نقله إلى هذه الجزيئة عبر سلسلة أكسدة / اختزال بواسطة ناقلات خاصة $(T_1, T_2, T_3, \ldots)$ توجد على مستوى غشاء التيلاكويد، بينما $NADP^+$ توجد على مستوى الستروما.
فكيف يتم انتقال الالكترونات من اليخضور a إلى المتقبل النهائي $NADP^+$ عبر سلسلة أكسدة/اختزال؟

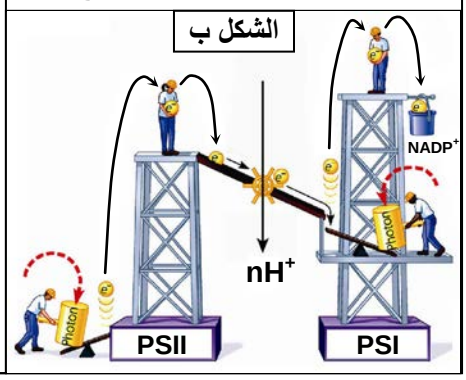
b – نقل الالكترونات داخل البلاستيدة الخضراء

الوثيقة 9: نقل الالكترونات من اليخضور a إلى المتقبل النهائي $NADP^+$

لمعرفة كيفية تحول الطاقة الضوئية إلى طاقة كيميائية نقترح دراسة الوثائق التالية:
يبين الشكل أ من الوثيقة قيم جهد الأكسدة / اختزال لناقلات الالكترونات. ونعلم أن الالكترونات تنتقل تلقائيا في اتجاه E_0 متزايد مع تحرير الطاقة، ولا تنتقل في اتجاه E_0 متناقص إلا إذا توفرت الطاقة.

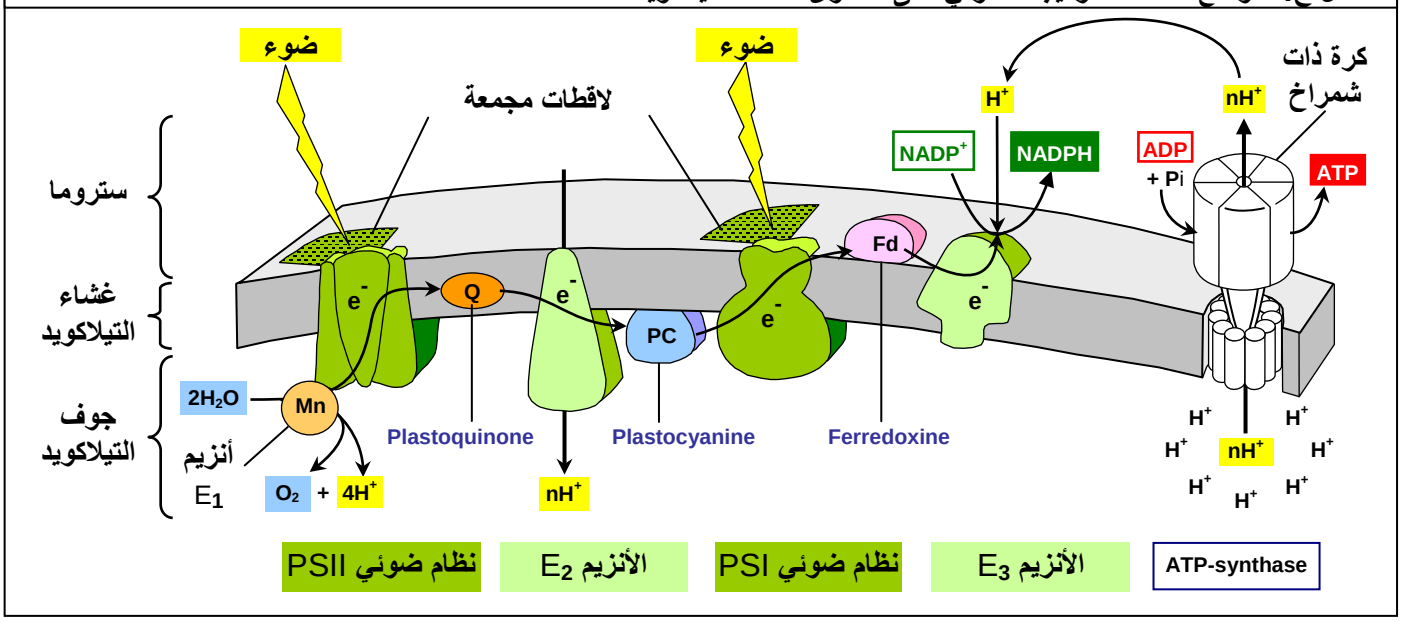


1) بالاستعانة بالشكل 2 من الوثيقة، بين معللا جوابك كيف تنتقل الالكترونات عبر السلسلة من الناقلات المبينة في الشكل أ.
2) حدد المتقبل النهائي للالكترونات
3) بالاعتماد على معطيات الشكل ج من الوثيقة، حدد ما هو مصدر البروتونات H^+؟ وما مصيرها؟
4) فسر تركيب جزيئة ATP على مستوى الكرات ذات شمراخ.



Moutamadris.ma

الشكل ج: تموضع سلسلة التركيب الضوئي على مستوى غشاء التيلاكويد



1) يتطلب نقل الالكترونات إمدادا طاقيا خارجيا. ويتم بفضل نظامين ضوئيين PSI وPSII عند التقاطهما للطاقة الضوئية، وبمساعدة مجموعة من البروتينات الموجودة في غشاء التيلاكويد والتي تلعب دور ناقلات للالكترونات. وتشكل ما يسمى سلسلة التركيب الضوئي.وتنتقل الإلكترونات عبر السلسلة على الشكل التالي:

- من T_1 إلى PSI و من T_3 إلى $NADP^+$: انتقال من E_0 منخفض إلى E_0 مرتفع، هو انتقال تلقائي للإلكترونات مع تحرير الطاقة.
- من PSII إلى T_1 و من PSI إلى T_3: انتقال من E_0 مرتفع إلى E_0 منخفض مع استعمال الطاقة.

2) المتقبل النهائي للإلكترونات هو $NADP^+$:

$$2NADP^+ + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2NADPH,2H^+$$

3) يتم نقل الإلكترونات المحررة من طرف اليخضور عند تهييجه عبر سلسلة تفاعلات (أكسدة / اختزال) بواسطة ناقلات الإلكترونات التي توجد على مستوى غشاء التيلاكويد.
أثناء انتقال الإلكترونات عبر الناقلات الغشائية تحرر طاقة تستعمل في ضخ البروتونات H^+ من الستروما نحو جوف التيلاكويد والتي تضاف إلى البروتونات الناتجة عن التحليل الضوئي للماء في جوف التيلاكويد، فيرتفع بذلك تركيز أيونات H^+ داخل جوف التيلاكويد وإحداث ممال H^+ (Gradient) بين جهتي غشاء التيلاكويد (انخفاض pH جوف التيلاكويد).

4) تتدفق البروتونات H^+ عبر الكرات ذات شمراخ إلى خارج التيلاكويد، وتستعمل الطاقة الناتجة عن ذلك في تركيب جزيئات ATP انطلاقا من ADP و Pi، بتدخل أنز يم غشائي ATP سنتاز حسب التفاعل التالي:

$$ADP + Pi \xrightarrow[\text{ATPsynthase}]{\text{طاقة}} ATP$$

يسمى هذا التفاعل بالتفسفر التأكسدي La phosphorylation oxydative.

c – خلاصة:

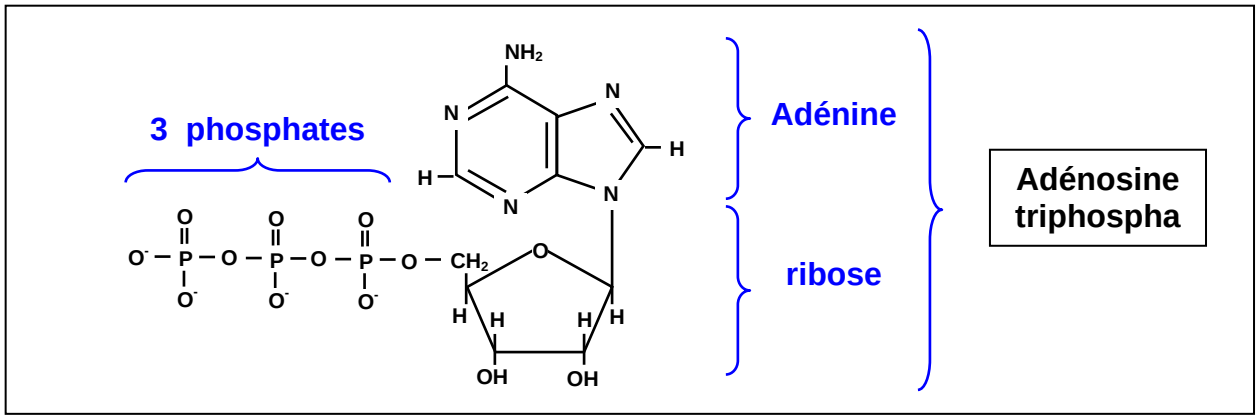
يمكن تلخيص نواتج المرحلة المضاءة فيما يلي:

- التحليل الضوكيميائي للماء داخل جوف التيلاكويد (أكسدة): $2H_2O \longrightarrow 4H^+ + 4e^- + O_2$
- اختزال جزيئة $NADP^+$ إلى $NADPH,H^+$: $2NADP^+ + 4H^+ + 4e^- \longrightarrow 2NADPH,2H^+$
- تركيب جزيئات ATP : $ADP + Pi \longrightarrow ATP$

المعادلة الحصيلة: $3ADP + 3Pi + 2NADP + 2H_2O \longrightarrow 3ATP + O_2 + 2NADPH,2H^+$

Moutamadris.ma

يتبين إذن أن الطاقة الضوئية تحولت إلى طاقة كيميائية على شكل جزيئة ATP (Adénosine triphosphate) = الأدينوزين ثلاثي الفوسفات. وهي جزيئة مركبة من الأدينوزين (أدينين – ريبوز) والفوسفات.



الروابط التي تجمع بين الفوسفاط غنية بالطاقة . فعند تركيب جزيئة ATP يتم تخزين طاقة يمكن تحريرها أثناء الحلمأة:

$ATP + H_2O \text{ ----------> } ADP + Pi + E$ **(Energie)**

ب – تفاعلات المرحلة المظلمة: اختزال CO_2 وتركيب المادة العضوية

a – الكشف عن مصير CO_2 الممتص من طرف النباتات أنظر الوثيقة 10

الوثيقة 10: الكشف عن مصير CO_2 الممتص من طرف النباتات

★ تجربة Gaffron وزملاؤه (1951). الشكل أ

يتم إدماج ثنائي أكسيد الكربون مشع $^{14}CO_2$ في محلول عالق لطحلب الكلوريل. ونتتبع سرعة امتصاصه خلال فترة إضاءة لمدة ساعة، وبعد توقيف الإضاءة مباشرة. يبين منحنى الشكل أ النتائج المحصل عليها.

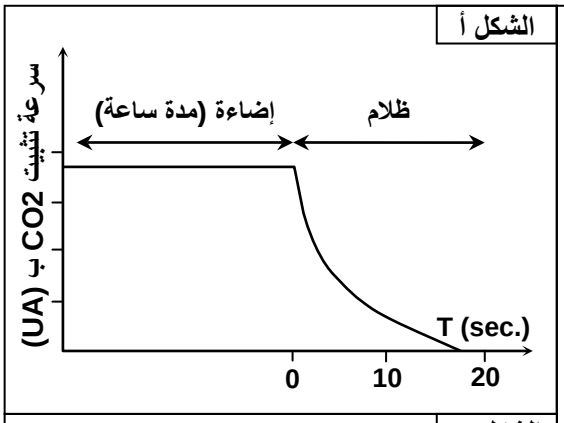
1) حلل المنحنى واستنتج مستلزمات امتصاص CO2.

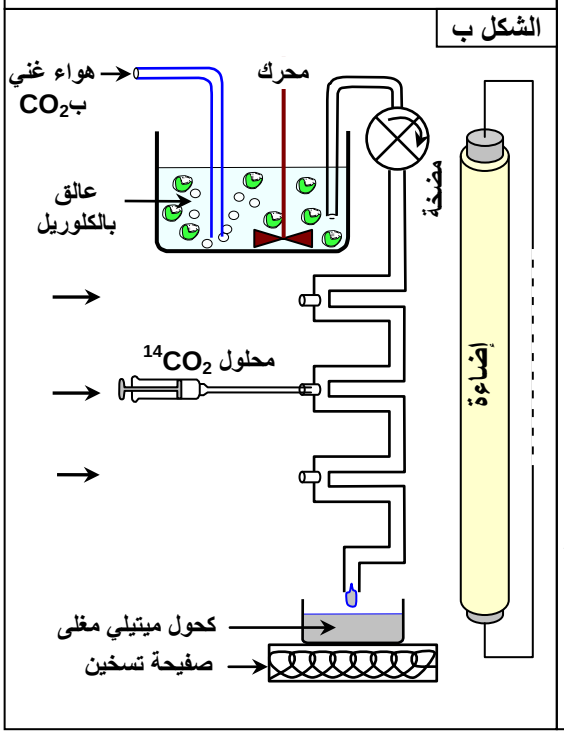
★ تجربة Calvin وBenson (1962). الشكل ب

تم وضع عينة من طحالب الكلوريل في محلول مغذ داخل وعاء مغلق دقيق الجدران وشفاف، حيث تتم اضائتها وتزويدها بثنائي أكسيد الكربون العادي. تدفع الطحالب بواسطة مضخة داخل أنبوب دقيق وشفاف، يتم عبوره في مدة زمنية محددة حسب قوة صبيب المضخة. يحقن $^{14}CO_2$ الإشعاعي النشاط في مستويات مختلفة من الأنبوب حسب المدة الزمنية المختارة لمكوث الطحالب في الوسط الذي يحتوي على ^{14}C، والتي بعدها تقتل الخلايا الطحلبية بواسطة الكحول المغلى. بعد استخراج المواد العضوية المركبة من طرف الخلايا الطحلبية، يتم فرزها بواسطة تقنية التحليل الكروماتوغرافي الإشعاعي ثنائي القطب على النحو التالي:

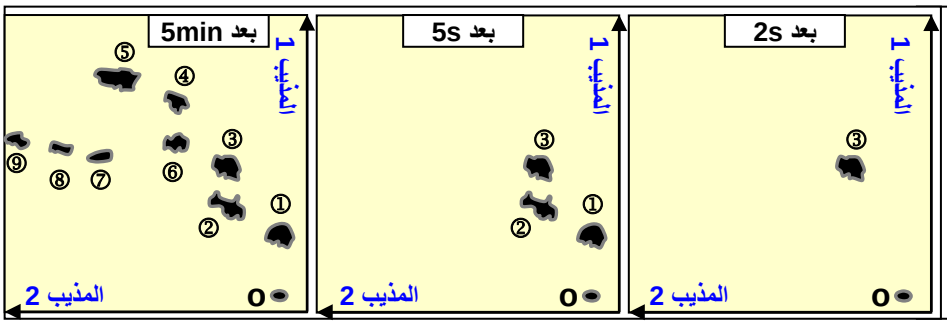
- توضع قطرة من مستخلص الطحالب المقتولة في النقطة 0 من ورق التحليل الكروماتوغرافي.
- يستعمل على التوالي مذيبان مختلفان في اتجاهين مختلفين.
- بعد انتشار المواد تقاس شدة إشعاعها وتنجز صور إشعاعية ذاتية تكون فيها مواقع المواد المركبة محددة ومعروفة. (الشكل ج).

2) حدد ترتيب ظهور المواد المركبة حسب التسلسل الزمني. ماذا تستنتج؟





Moutamadris.ma



الشكل ج

O= الوضعية الأولى للمستخلص
①= ريبولوز ثنائي الفوسفات RudiP
②= سكر سداسي فوسفات
③= حمض فوسفوغليسيري APG
④= حمض بيروفي، ⑤= حمض الماليك
⑥= حمض أسبرتي، ⑦= سيرين
⑧= غليسين، ⑨= ألنين

1) يلاحظ أن امتصاص CO_2 يكون مرتفعا ومستقرا أثناء فترة الإضاءة. لكن خلال فترة الظلام يستمر هذا التثبيت تنخفض نسبته تدريجيا إلى أن تنعدم بعد 18s في الظلام.

نستنتج من هذا أن تثبيت CO_2 لا يتطلب إضاءة ولكن يتطلب توفير مواد يتم تركيبها خلال فترة الإضاءة. هذه الطاقة تنفذ بعد 18 ثانية من تطبيق الفترة المظلمة لذلك يتوقف تثبيت CO_2.
إن تفاعلات المرحلة المظلمة (التفاعلات الكيميائية الحرارية) تمكن من إدماج CO_2 قصد تركيب المادة العضوية وذلك بوجود نواتج المرحلة الضوكيميائية: ATP و $NADPH,H^+$.

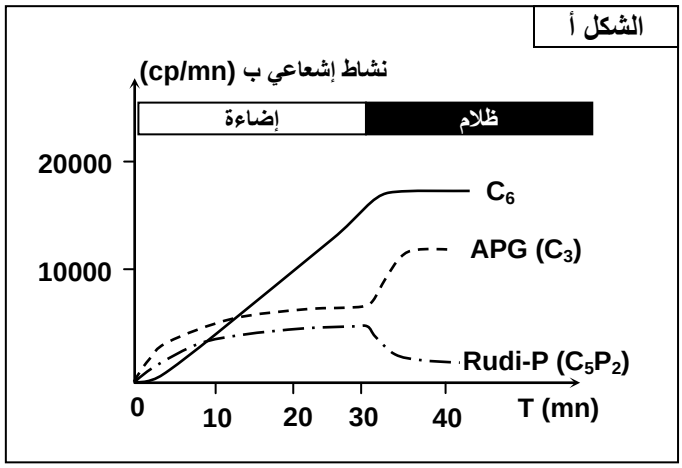
2) نلاحظ في الثواني الأولى أن الإشعاع يظهر في الحمض الفوسفوغليسيري APG (جزيئة ثلاثية الكربون)، ثم السكر السداسي أحادي الفوسفات ثم السكر الخماسي ثنائي الفوسفات RudiP، وبعد مدة أطول يظهر الإشعاع في مواد عضوية أكثر تعقيدا مثل الأحماض الأمينية، الأحماض الذهنية، السَكَروز...

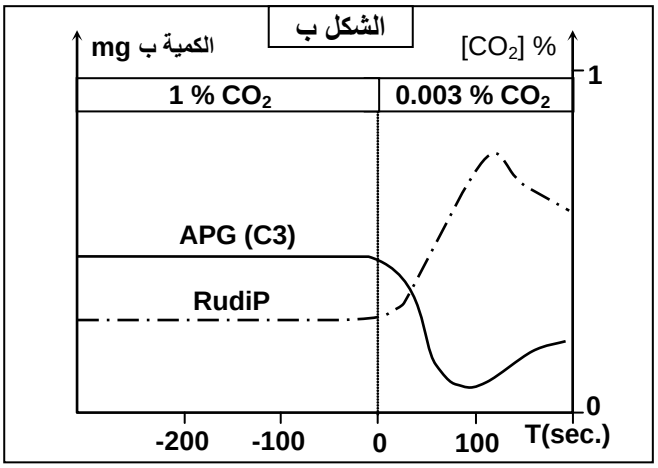
نستنتج من هذا أن الكربون المعدني (CO_2) يتحول إلى كربون عضوي يدمج في مواد عضوية مختلفة مع مرور الزمن.

b – اختزال CO_2 الممتص وتركيب المادة العضوية أنظر الوثيقة 11

الوثيقة 11: اختزال CO2 الممتص وتركيب المادة العضوية

للكشف عن التحولات المتبادلة بين المواد المركبة حسب الإضاءة وحسب توفر CO_2 نستعمل تركيب Calvin ونقوم بالتجارب التالية:
★ عرضت عينة من الكلوريلات لفترة إضاءة متبوعة بفترة مظلمة مع قياس شدة الإشعاع عبر الزمن بالنسبة لثلاث مركبات كربونية: سكر سداسي الكربون (C_6) و RudiP وهو سكر خماسي الكربون (C_5) و APG (C_3). النتائج مبينة على الشكل أ من الوثيقة.
★ في فترة ثانية تم وضع الكلوريلات بالتتالي في وسط غني ب CO2 (1%) ووسط فقير من CO2 (0.003%) مع إخضاعها لإضاءة ثابتة وقياس شدة الإشعاع بالنسبة لكل من RudiP و APG (أنظر الشكل ب).





1) صف تطور كل من المركبات C_6 وC_5 وC_3 في مختلف مراحل التجربتين.
2) اقترح تفسيرا للتطور المتزامن لهذه المركبات (اربط العلاقة بين تطور كل من RudiP و APG ووجود CO_2 في الوسط).

Moutamadris.ma

1) تطور المركبات C_6 وC_5 وC_3:

★التجربة الأولى (عند توفر CO_2 بنسبة ثابتة):

- ✓ خلال فترة الإضاءة ترتفع كمية السكريات C_6 باستمرار بينما ترتفع كمية APG وRudiP وتبقى مستقرة عند قيمة قصوية.
- ✓ خلال الفترة المظلمة: نلاحظ ارتفاع في نسبة (C_3) APG و C_6 وانخفاض في نسبة (C_5) RudiP.

★ التجربة الثانية (عند تغيير تركيز CO_2):

- ✓ بوجود CO_2 تكون تراكيز APG وRudiP ثابتة مع نسبة أكبر من APG.
- ✓ بغياب CO_2 يرتفع RudiP وينخفض تركيز APG.

2) تفسير التغيرات الملاحظة:

★ يتبين خلال فترة الإضاءة أن هناك تحولات متبادلة بين RudiP وAPG تجعل تركيزهما ثابتا. أما خلال الفترة المظلمة يتراكم APG على حساب RudiP، الذي لا يتم تجديده إلا بوجود الإضاءة أي بوجود نواتج المرحلة الضوكيميائية وهي ATP و $NADPH,H^+$.

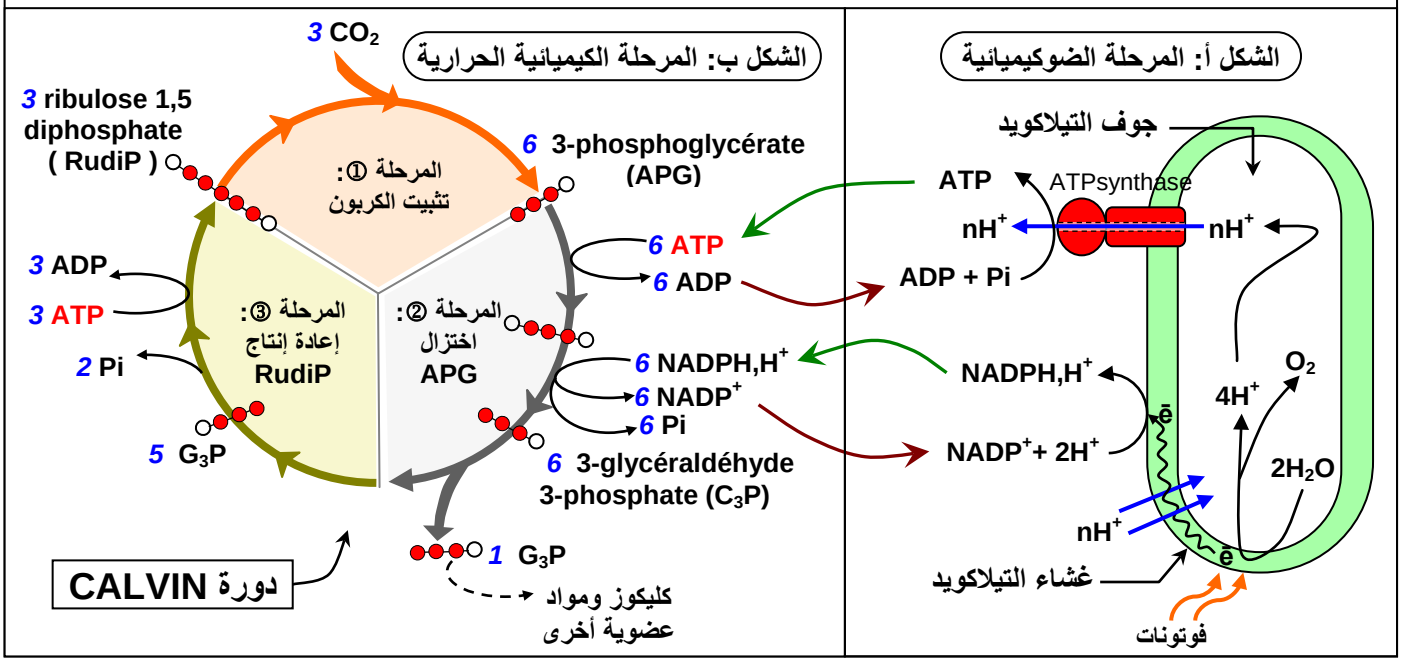
★ في غياب CO_2 يتراكم RudiP على حساب APG الذي يتناقص وذلك راجع إلى توقف تحول RudiP إلى APG واستمرار تحول APG إلى مواد أخرى من بينها RudiP.

استنتاج:

إن APG هو أول منتوج عضوي لعملية التركيب الضوئي، يستعمل هذا المنتوج في تركيب مواد عضوية أخرى (سكريات ثلاثية الكربون بها فوسفات) والتي تعتبر المواد الأولية لتركيب مختلف المواد العضوية (سكريات، دهنيات، بروتيدات...) وكذا تجديد RudiP الضروري لضمان استمرار إدماج CO_2. وذلك ضمن مجموعة من التفاعلات البيوكيميائية التي تنتظم في شكل دورة مغلقة تسمى دورة Calvin. هذه التفاعلات لا تستلزم الإضاءة لهذا تسمى تفاعلات المرحلة المظلمة. ولكن تستلزم نواتج المرحلة المضاءة (أنظر الوثيقة 12).

الوثيقة 12: تفاعلات دورة Calvin وعلاقتها بتفاعلات المرحلة الضوكيميائية

بينت عدة تجارب أن تفاعلات المرحلة المظلمة (شكل ب) ترتبط بالمرحلة المضاءة (شكل أ). ففي ستروما البلاستيدة الخضراء تتحول جزيئة **APG** عبر تفاعلات مستهلكة ل **ATP** و **$NADPH,H^+$** إلى سكر ثلاثي الفوسفات C_3، مصدر تركيبات عضوية متنوعة، وإلى تجديد **RudiP**. تشكل هذه التفاعلات دورة بيوكيميائية تدعى دورة **Calvin**.
تعطي الوثيقة أسفله مزاوجة تفاعلات كل من المرحلة المضاءة (شكل أ) والمرحلة المظلمة (شكل ب).
أول معطيات هذه الوثيقة إلى نص علمي سليم محددا مراحل دورة **Calvin** مع الربط بين المرحلة المضاءة والمظلمة.



Moutamadris.ma

تفاعلات دورة Calvin

يمكن تقسيم دورة Calvin إلى ثلاث مراحل:

⇦ المرحلة ①: إدماج CO_2 في مركب خماسي الكربون RudiP للحصول على جزيئتين لمركب ثلاثي الكربون APG، وذلك بتدخل أنزيم يسمى RubisCO.

⇦ المرحلة ②: اختزال APG إلى سكر ثلاثي الكربون أحادي الفوسفات (G_3P) مع استهلاك لـ ATP و$NADPH,H^+$، يدخل جزء من (G_3P) في تركيب المواد العضوية والجزء الآخر في المرحلة ③ من دورة Calvin.

⇦ المرحلة ③: إعادة إنتاج RudiP: تعد هذه المرحلة أساسية لإعادة إدماج CO_2، إذ تتم عبر سلسلة من التفاعلات التي تستهلك الطاقة. وتتم إعادة التركيب باستعمال جزء من ثلاثيات السكر (G_3P) المركبة.

إذن خلال التفاعلات الضوكيميائية تتمكن البلاستيدات الخضراء من تركيب $NADPH,H^+$ و ATP اللازمين لاختزال CO2. ويتم هذا الاختزال مع تركيب المادة العضوية خلال المرحلة المظلمة.

✓ نتيجة المرحلة الضوكيميائية:

$$3ADP + 3Pi + 2NADP + 2H_2O \text{ ----------> } 3ATP + O_2 + 2NADPH, 2H^+$$

✓ نتيجة المرحلة البيوكيميائية:

$$9ATP + 3CO_2 + 6(NADPH, H^+) \text{ ----------> } G_3P\ (C_3) + 6NADP^+ + 9ADP + 9Pi$$

✓ حصيلة:

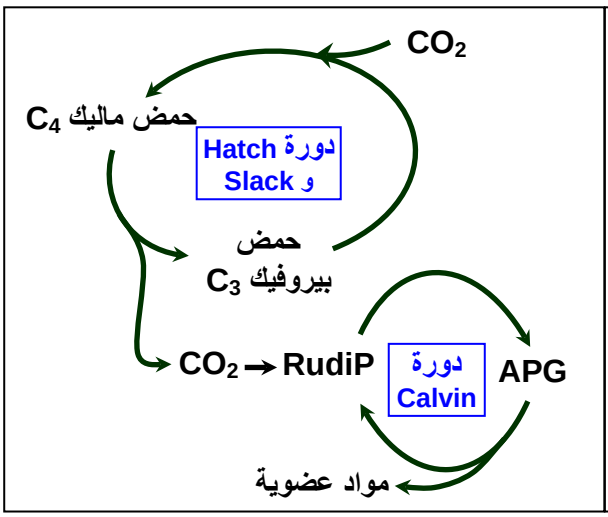
$$6CO_2 + 12H_2O \text{ ----------> } C_6H_{12}O_6 + 6H_2O + 6O_2$$

$$6CO_2 + 6H_2O \text{ ----------> } C_6H_{12}O_6 + 6O_2$$

ملاحظة: نمط آخر لدمج CO_2 (أنظر الوثيقة 13)

الوثيقة 13: دمج CO_2 عند المخلدات

تضم فصيلة المخلدات النباتات المكيفة على العيش في المناطق الجافة، إذ تتميز بقدرتها على الاحتفاظ بكميات هائلة من الماء في بعض أجزائها، وتتميز بعدم انفتاح الثغور خلال النهار، مما يجعلها تمتص CO_2 خلال الليل فقط.
عند المخلدات والنباتات C_4 كالذرة وقصب السكر، يتم تثبيت CO_2 خلال الليل على مستوى مركبات رباعية الكربون (C_4) (حمض ماليك مثلا).
خلال النهار يتم انتزاع CO_2 منها ليدخل في دورة Calvin.
يعتبر التركيب الضوئي عند النباتات (C_4) تكيفا مع العيش في المناطق الحارة والجافة. أبرز ذلك.

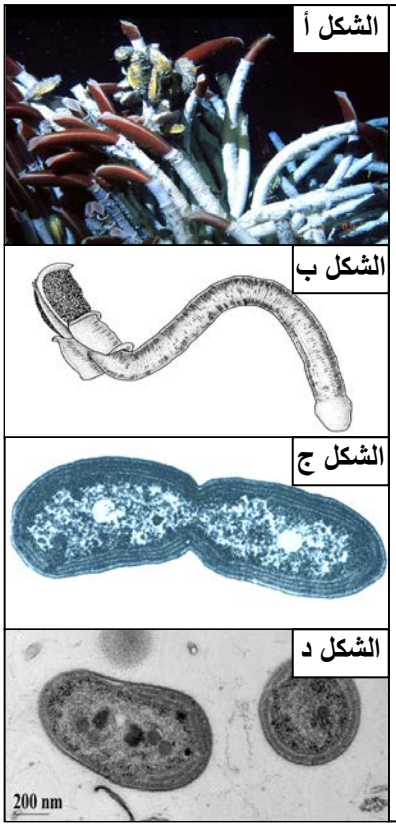


بالنسبة للنباتات المكيفة مع العيش في مناخ جاف مثل المخلدات، يتعذر امتصاص CO_2 نهارا فيتم تثبيته ليلا لتركيب حمض الماليك (C_4) ليشكل خزان لـ CO_2 يراكمه في فجوات الخلية، لهذا تنعت هذه النباتات بالنباتات C_4 لأن أول مركب ينتج عن دمج CO_2 يكون رباعي الكربون C_4.
خلال النهار يتحول حمض ماليك إلى حمض بيروفيك مع تحرير CO_2 الذي يلتحق بدورة Calvin وبالتالي إنتاج APG ثم باقي المركبات العضوية على شاكلة النباتات C_3.

Moutamadris.ma

III – تنوع مصادر المادة والطاقة المستعملة من طرف الكائنات الحية

① التركيب الكيميائي عند الكائنات المعدنية التغذية أنظر الوثيقة 14



الوثيقة 14: الكائنات الكيميائية المعدنية التغذية

★ في بداية ثمانينيات القرن العشرين اكتشفت فونة تحت بحرية تعيش في أعماق البحار التي تفوق 2500m، باستقلال تام عن الطاقة الشمسية، كحالة بعض البكتريات وحيوان ريفتيا Riftia pachyptila (الشكل أ وب)
تعيش هذه الكائنات ، بمحاذاة الذروات الوسط محيطية، حيث توجد مدخنات حرارية تنثر مجموعة من المركبات المعدنية المختزلة، من أهمها H_2S. تعمل البكتريات معدنية التغذية على أكسدتها من أجل تركيب المادة العضوية.

★ تتمكن بكتيريا من نوع Nitrosomonas (الشكل ج) من أكسدة محلول النشادر Ammoniac NH^+_4 إلى حمض النتروز NO^-_2 بوجود O_2 مع تحرير طاقة (ATP وRH_2) تعتبر مصدرا لإنتاج مادتها العضوية.

$$NH^+_4 + 3/2O_2 \rightarrow NO^-_2 + H_2O + 2H^+$$

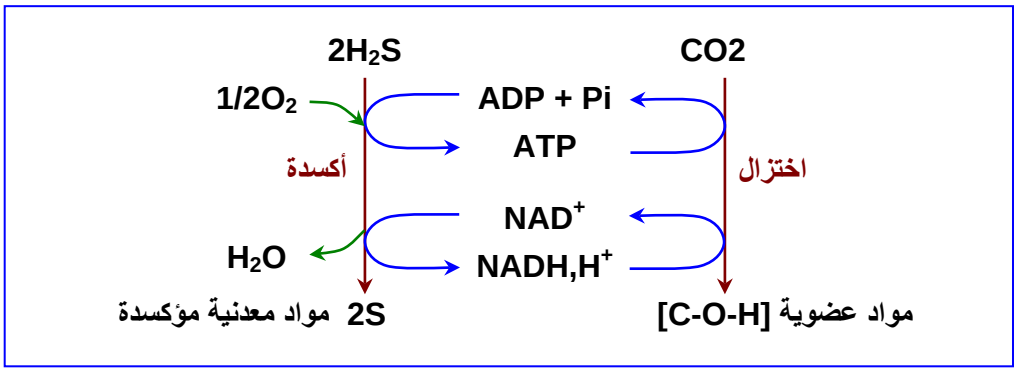
★ تتمكن بكتيريا Nitrobacter (الشكل د) من أكسدة حمض النتروز NO^-_2 إلى حمض النتريك NO^-_3 :

$$NO^-_2 + 1/2O_2 \rightarrow NO^-_3$$

قارن بين مصدر الطاقة المستعملة من طرف النباتات اليخضورية ومصدر الطاقة المستعملة من طرف البكتيريات التي تعيش قرب الذروات الوسط محيطية، وبكتيريات التربة المعدنية التغذية.

★ تتميز الكائنات الحية بتنوع كبير في أنواعها وبنيتها وأوساط عيشها التي تستمد منها الطاقة والمادة اللازمتين لتركيب مادتها العضوية والقيام بوظائفها الحيوية. فإضافة إلى النباتات التي تركب مادتها العضوية انطلاقا من مادة معدنية بالاعتماد على الطاقة الشمسية، توجد كائنات حية تعيش باستقلال تام عن الطاقة الشمسية والتركيب الضوئي وتستطيع تحويل المادة المعدنية إلى مادة عضوية.

★ تعيش الكائنات المعدنية التغذية، على مستوى الذروات المحيطية بالقرب من مدخنات حرارية تنثر مجموعة من المركبات المعدنية مثل H_2S، تعمل هذه الكائنات على أكسدتها من أجل تركيب المادة العضوية، وتسمى هذه الظاهرة بالتركيب الكيميائي، وتتم على النحو التالي:



★ تتمكن بكتريات التربة من أكسدة الأمونياك إلى نترات، وتشكل هذه العملية مصدرا للطاقة التي تستغل لتنشيط دورة Calvin وبالتالي تركيب المادة العضوية دون الانطلاق من الطاقة الضوئية، لذلك نتكلم عن التركيب الكيميائي.

Moutamadris.ma

② تنوع مصادر المادة والطاقة أنظر الوثيقة 15

الوثيقة 15: تنوع مصادر المادة ومصادر الطاقة واستعمالاتها من طرف الكائنات الحية

تختلف الكائنات الحية حسب / مصادر المادة	مصادر الطاقة	يمكنها استعمال الضوء (دائما يخضورية)	- لا تستعمل الضوء - تستعمل مواد تؤكسدها
		ضوئية التغذية	كيميائية التغذية
تتطلب مواد معدنية فقط	ذاتية التغذية	ضوء معدنية التغذية تنجز عملية التركيب الضوئي (أغلبية الخلايا اليخضورية بوجود الضوء)	كيمياء معدنية التغذية تنجز تركيبا كيميائيا (بعض البكتريات كالبكتريات الأزوتية للتربة)
تتطلب مواد عضوية	اعتمادية التغذية (غير ذاتية التغذية)	ضوعضوية التغذية تستعمل معطيا عضويا للبروتونات والالكترونات في التركيب الضوئي (بعض البكتيريات اليخضورية)	كيمياء عضوية التغذية (عدد كبير من البكتريات والفطريات، الخلايا اللايخضورية للنباتات اليخضورية، خلايا يخضورية في الظلام)

تلجأ الكائنات الحية إلى استعمال مصادر متنوعة من المادة العضوية أو المعدنية، للقيام بمختلف الوظائف الإحيائية، والى استغلال الطاقة الشمسية أو طاقة الأكسدة للحصول على طاقة كيميائية قابلة للاستعمال مباشرة في التفاعلات اللازمة لانجاز هذه الوظائف الإحيائية.

Moutamadris.ma