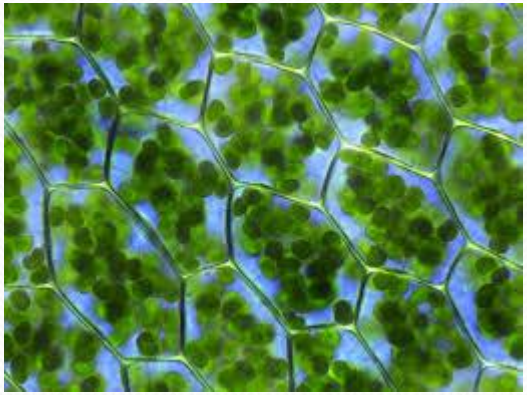
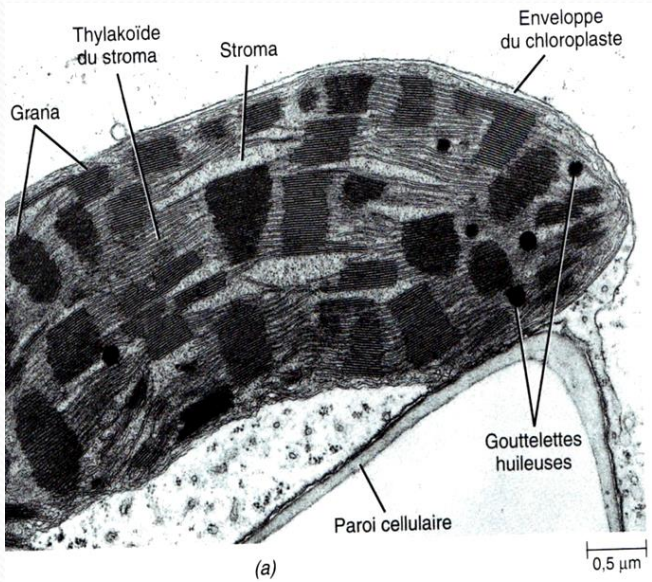
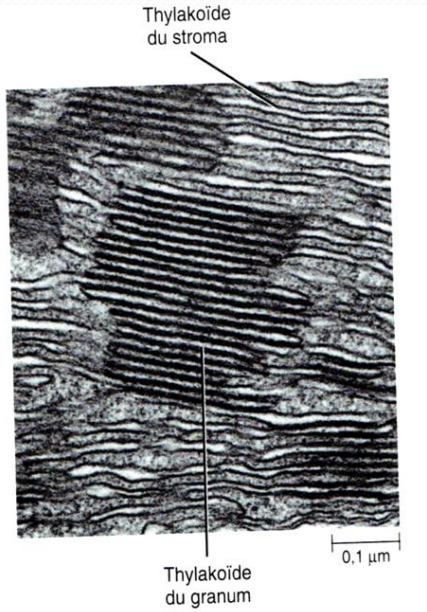
5. الصانعات الخضراء Le Chloroplaste

- تعبر الصانعات الخضراء الجهاز التمثيلي للنباتات، فهي تتواجد في جميع الأجزاء الخضراء للنبات، يقدر عدد ها في الأوراق بحوالي نصف مليون كلوروبلاست في ملم^2 للورقة، لون هذه الأخيرة ناتج من الكلوروفيل وهو الصبغة الخضراء المحتواة داخل الكلوروبالست.
- تكثر البلاستيدات في الميزوفيل (النسيج الداخلي للورقة)، خلية الميزوفيل تحتوي على 30 - 40 كلوروبلاست طول الواحدة منها 4 ـ 7 مك متر وعرضها 2 ـ 4 مك متر.







الشكل : صانعة خضراء لنبات الذرة *Zea mays*

1.5. البنية الدقيقة للكلوروبلاست:

- الصانعات الخضراء أو الكلوروبلاست هي عضيات خلوية محاطة بغشاء مزدوج، وتحتوي على أنظمة داخلية دقيقة تُمكّنها من أداء وظيفتها الأساسية في عملية التركيب الضوئي. البنية الدقيقة للصانعات الخضراء تتسم بتعقيد وتكامل يسمح بامتصاص الطاقة الضوئية وتحويلها إلى طاقة كيميائية.

1- الغشاء: تحتوي الكلوروبلاست على غشاء مزدوج (Double Membrane)

- **الغشاء الخارجي:** نفوذ جزئي يحتوي على قنوات تسمح بمرور الجزيئات الصغيرة والأيونات.
- **الغشاء الداخلي :**أقل نفاذية من الغشاء الخارجي .يحتوي على بروتينات ومكونات ناقلة للطاقة.
- **الفراغ بين الغشائين (Espace intermembranaire):** فراغ ضيق بين الغشاءين يحتوي على أيونات وجزيئات صغيرة.

2- الحشوة (Stroma) : مادة هلامية تملأ الصانعة الخضراء .تحتوي على:

- DNA دائري خاص بالصانعة الخضراء، مما يُمكنها من تصنيع بعض بروتيناتها.
- ريبوسومات لإنتاج البروتينات.
- إنزيمات تُشارك في تفاعلات دورة كالفن (Cycle de Calvin)لإنتاج الغلوكوز.
- حبيبات النشا والدهون.

3- التيلاكويدات(Thylakoids) : أكياس غشائية مسطحة مرتبة داخل الصانعة الخضراء.

4- الجرانا:(Grana) : مجموعات من التيلاكويدات مكدسة فوق بعضها لتكوين ما يُعرف بالجرانا.

- **Thylakoids du stroma :** تُشير إلى التيلاكويدات الفردية التي تنتشر بشكل منفصل في الحشوة داخل الصانعة الخضراء، ولا تكون مكدسة في شكل جرانا.
- **Thylakoids du granum:** تُشير إلى التيلاكويدات التي تتجمع في شكل أكوام مكدسة تُسمى جرانا والتي تُعتبر الوحدة الرئيسية لامتصاص الضوء أثناء عملية التركيب الضوئي.

5- الأصباغ:

- تُوجد في أغشية التيلاكويد وتلعب دورًا أساسيًا في امتصاص الضوء .لإنتاج الطاقة الكيميائية
- الكلوروفيل (a) و(b): مسؤولان عن امتصاص الأطوال الموجية الضوئية المناسبة.
- الكاروتينات: أصباغ مساعدة تمتص الضوء الأزرق والأخضر وتعزز كفاءة التركيب الضوئي.

2.5. التركيب الكيميائي للكلوروبلاست:

- الصانعات الخضراء (الكلوروبلاست) هي عضيات غنية بالمكونات الكيميائية التي تُسهم في أداء وظائفها الحيوية مثل عملية التركيب الضوئي. يتكون الكلوروبلاست من عناصر أساسية، تشمل الأغشية والإنزيمات والجزيئات العضوية وغير العضوية، وكلها تعمل بتناغم لتوليد الطاقة الكيميائية.

1. **أغشية الغلاف:** تتكون من

- **1- الدهون:** تمثل 60% تتكون من الليبيدات الفوسفورية وليبيدات سكرية وكبريتية التي تُشكّل الطبقة المزدوجة للأغشية.
- **2- البروتينات:** تمثل 40 %تحتوي على بروتينات غشائية متنوعة تعمل كإنزيمات أو بروتينات هيكلية..
- الغشاء الداخلي غني بالبروتينات المسؤولة عن نقل الجزيئات الكبيرة.
- **3- الأصباغ:** يوجد في أغشية الغلاف القليل من الكاروتين وانعدام الكلوروفيل بيها .

2. أغشية الصفائح: تتكون من

- 50% بروتينات.
- 38% دهون.
- 12% صبغات

1- الدهون: اغلب الدهون سكرية ثم الفوسفورية وكبريتية.

2- الأصباغ: تحتوي أغشية الصفائح على نوعين من الصبغات:

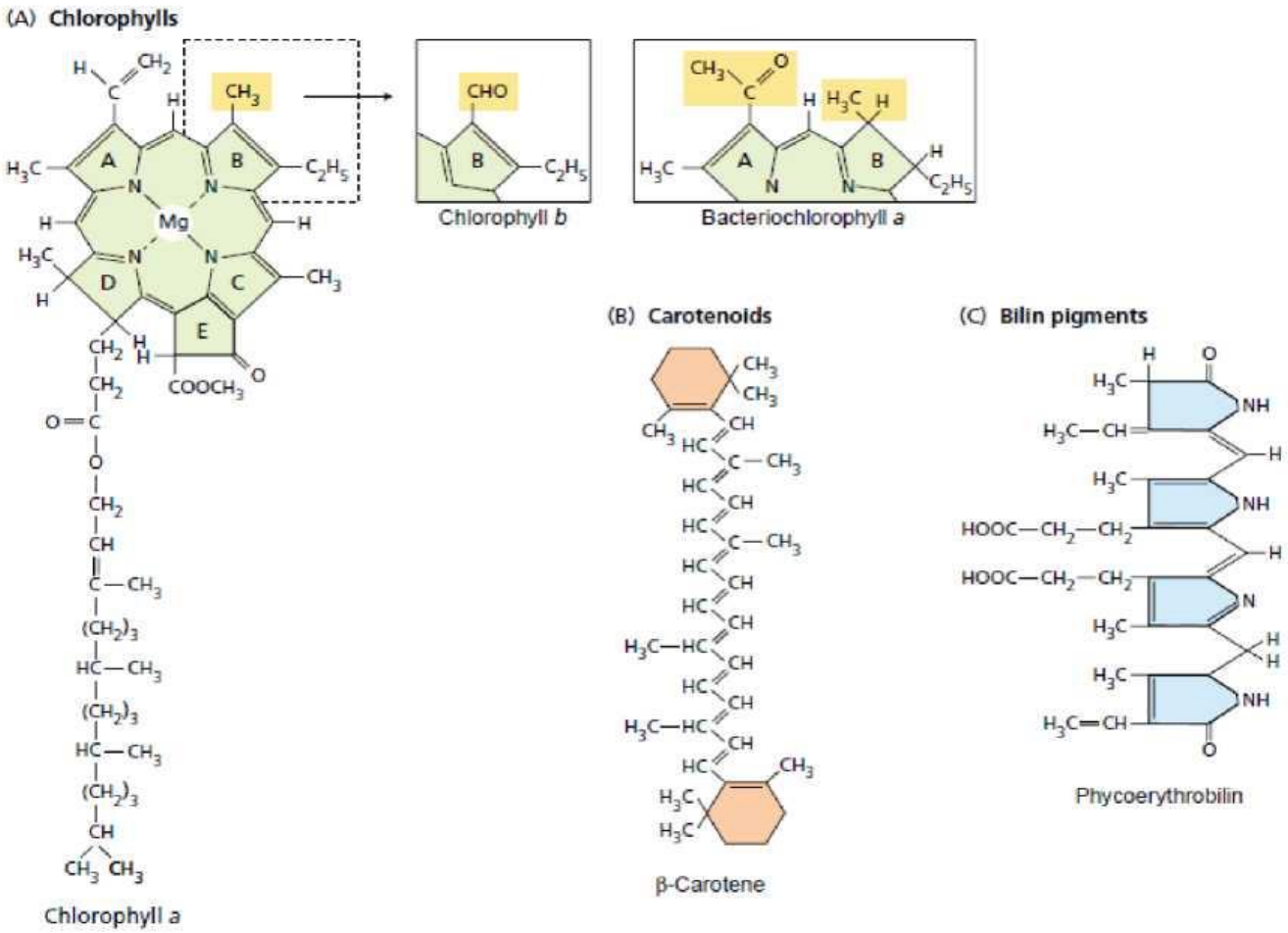
- صبغات الكلوروفيل 10% . صبغات الكاروتين 2%

جزيء الكلوروفيل يتكون من رأس محب للماء (Hydrophilique) وذيل كاره للماء (Hydrophobique)ويوجد نوعين من الكلوروفيل في بلاستيدات الخلايا النباتية هما :

- **كلوروفيل أ (Chlorophylle a) :** لونه اخضر مائل للزرقة تبلغ كميته حوالي ثلاث اضعاف كلوروفيل b صيغته الكيميائية $C_{55}H_{72}O_5N_4Mg$.
- **كلوروفيل ب (Chlorophylle b):** لونه اخضر مائل للصفرة صيغته الكيميائية $C_{55}H_{70}O_6N_4Mg$.

يمتاز الأول باحتوائه على مجموعة CH_3 بينما يحتوي كلوروفيل b على مجموعة CHO عند ذرة الكربون الثالثة.

- **الكاروتينات:** أصباغ مساعدة وتعمل كمضادات أكسدة ذات لون اصفر وتشمل α- carotene و β-carotene و Lycopene
- الكلوروفيل (أ): يمتص الضوء الأزرق والأحمر.
- الكلوروفيل (ب): يمتص أطوال موجية مختلفة لتحسين كفاءة الامتصاص.
- الكاروتينات :(Carotenoids) تمتص الضوء الأزرق والأخضر



الشكل 2: الصيغة الكيميائية لجزيئه الكلوروفيل

3- البروتينات: اغلب بروتينات اغشية الصفائح كارهة للماء ويمكن تقسيمه الى 3 مجاميع:

1- معقد كلوروفيل - بروتين : وهو عبارة عن بروتينات ترتبط بها جزيئة كلوروفيل لم تعرف خصاءصها جيدا ويبقى دورها غير معروف جيدا.

2- مكونات سلسلة التركيب الضوئي : وهي عبارة عن ناقلات للإلكترونات والبروتونات تساعد في تفاعلات الاكسدة والارجاع عبر السلسلة ويمكن تقسيمها الى مجموعين:

ناقلات للإلكترونات فقط وتعرف بـ Métalloprotéine ومنها :

- Cytochrome عبارة عن بروتينات تحتوي على ذرة حديد تلعب دورًا رئيسيًا في نقل الإلكترونات داخل الخلايا.
- Ferrodoxine عبارة عن بروتينات تحتوي على ذرتي كبريت و ذرة حديد
- Plastocyanine عبارة عن بروتينات تحتوي على ذرتي نحاس

ناقلات للإلكترونات والبروتونات في نفس الوقت ومنها:

- Plastoquinone تمثل 2% من مكومات غشاء الصفائح
- انزيم Ferrodoxine NADP+ Réductase المسؤول على اختزال Ferrodoxine على السلسلة التمثيلية

3- إنزيم ATPase : هو معقد بروتيني موجود في **أغشية الصفائح** حيث يلعب دورًا حيويًا في عملية إنتاج الطاقة أثناء البناء الضوئي. ويتكون من قسمين رئيسيين:

1. القسم الغشائي Couplage facteur (CF_0)

- يقع داخل غشاء التيلاكويد.
- يعمل كقناة لنقل أيونات الهيدروجين H^+ من داخل الفراغ التيلاكويد إلى الستروما.
- يسهم في تفريغ التدرج البروتوني الناتج عن سلسلة نقل الإلكترونات خلال عملية البناء الضوئي.

2. القسم المحفز (CF_1)

- يبرز إلى خارج غشاء التيلاكويد في اتجاه الستروما.
- يحتوي على المواقع النشطة المسؤولة عن تحفيز تكوين جزيئات ATP.
- يستخدم الطاقة الناتجة عن تدفق البروتونات لتجميع ADP (أدينوزين ثنائي الفوسفات) مع Pi (الفوسفات غير العضوي) لإنتاج ATP.

3. الحشوة (Stroma):

- الحشوة هي المادة السائلة الموجودة داخل الكلوروبلاست (Chloroplast) وتحيط باغشية التيلاكويد

مكونات الحشوة:

- تحتوي على مجموعة كبيرة من الإنزيمات المسؤولة عن تثبيت ثاني أكسيد الكربون (CO_2) في دورة كالفن.
- الحشوة تحتوي على DNA الخاص بالكلوروبلاست الذي يتحكم في تخليق بعض البروتينات.
- الريبوسومات : تُستخدم لترجمة البروتينات المشفرة في DNA الكلوروبلاست.
- النيوكليوتيدات والطاقة : تشمل مركبات الطاقة (NADPH و ATP) الناتجة عن التفاعلات الضوئية، تستخدمها الحشوة في التفاعلات الكيميائية.
- جزيئات صغيرة وأيونات: توفر وسطًا مناسبًا لحدوث التفاعلات الكيميائية.

2.5.الدور الفيزيزلوجي للكلوروبلاست:

التمثيل الضوئي Photosynthèse:

تطلق كلمة التمثيل الضوئي بصفة عامة على العملية التي تبني بها الخلايا اليخضورية مواد كاربوهيدراتية معينة انطلاقا من CO_2 وH_2O بوجود الضوء، في هذه العملية يكون الاوكسيجين ناتج إضافي.

إن تمثيل المواد العضوية اللازمة لنمو وتطور النبات ينطلق من مواد أو عناصر معدنية بسيطة، لكن العنصر الأساسي للجزيئات العضوية هو الكربون الآتي من CO_2 الجوي، ومن المحتمل كذلك أن تكون الايونات CO_3H^- (كربونات) مصدر للكربون المستعمل في التمثيل الضوئي، فهذا التنظيم للكربون المعدني يسمى التمثيل الضوئي، وتعني هذه الكلمة حرفيا **البناء والجمع بواسطة الضوء** وتكتب المعادلة الإجمالية عادة كما يلي

$$6CO_2 + 6H_2O \xrightarrow{\text{ضوء ، كلوروفيل}} C_6H_{12}O_6 + 6O_2$$

2. آلية التمثيل الضوئي:

تنقسم عملية التمثيل الضوئي إلى **3 تفاعلات** تتم في **وقت واحد** وهي:

1- تفاعل هيل HILL: يتم في داخل **الكييسات** Thylakoide بوجود الضوء حيث أن البلاستيدات تستطيع تحرير الأكسيجين بإضافة مستقبل للهيدروجين للوسط وتتم حسب المعادلة التالية:

$$CO_2 + 2H_2O \longrightarrow HCOH + O_2 + H_2O$$

وفي سنة 1951 وجد بان المركب NADP يعمل كمستقبل للهيدروجين في عملية التمثيل الضوئي مع أن هذا المركب موجود في الصانعات الخضراء فأصبح التفاعل على الشكل التالي:

$$2NADP^+ + 2H_2O \xrightarrow{\text{ضوء ، كلوروفيل}} 2NADPH + 2H^+ + O_2 \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (1)$$

وما تميز تفاعل هيل هو كسر **جزيئة الماء** وتحرير **الأكسيجين و الإلكترونات** وتكوين **NADPH**

2- الفسفرة الضوئية: يتم هدا التفاعل في **الكييسات** Thylakoide بوجود الضوء فعند إضافة ADP والفوسفات غير العضوية في غياب $NADP^+$ و CO_2 ينتج عن العملية **ATP**:

ضوء ، كلوروفيل

$$ADP + H_3PO_4 \longrightarrow ATP + H_2O \quad \text{.....(2)}$$

وهذا ما يسمى بالفسفرة الضوئية الحلقية.

والواضح أن التفاعلين (1) و (2) يتمان في وقت واحد يكونان ما يسمى بالحلقة الضوئية غير الحلقية حسب العلاقة التالية:

$$2NADP^+ + 2ADP + H_3PO_4 \longrightarrow 2NADPH + 2ATP + 2H^+ + O_2$$

3- تثبيت الـ CO_2: يتم في غياب الضوء في **المادة الاساسية** Stroma يتمثل في تثبيت CO_2 حسب دورة CALVIN حيث قسمت النباتات إلى 3 مجموعات حسب طريقة تثبيت جزيئة الـ CO_2.

بعد العمليات الثلاثة تكون الحصيلة كما يلي:

المرحلة المضيئة:

اكسدة الماء $2H_2O \longrightarrow 0_2 + 4H^+ + 4e^-$

ارجاع $2NADP^+ + 2H^+ + 4e^- \longrightarrow 2NADPH$

الحصيلة $2NADP^+ + 2H_2O \longrightarrow NADPH + 2H^+ + O_2$

Phosphorilation الفسفرة $ADP + Pi \longrightarrow ATP + H_2O$

المرحلة المظلمة:

NADPH اكسدة $2NADPH + CO_2 + 2H^+ \longrightarrow CHOH + 2NADP^+ + 2H_2O$

استهلاك الطاقة $ATP + H_2O \longrightarrow ADP + Pi$

تقسيم النباتات حسب طريقة تثبيت CO_2:

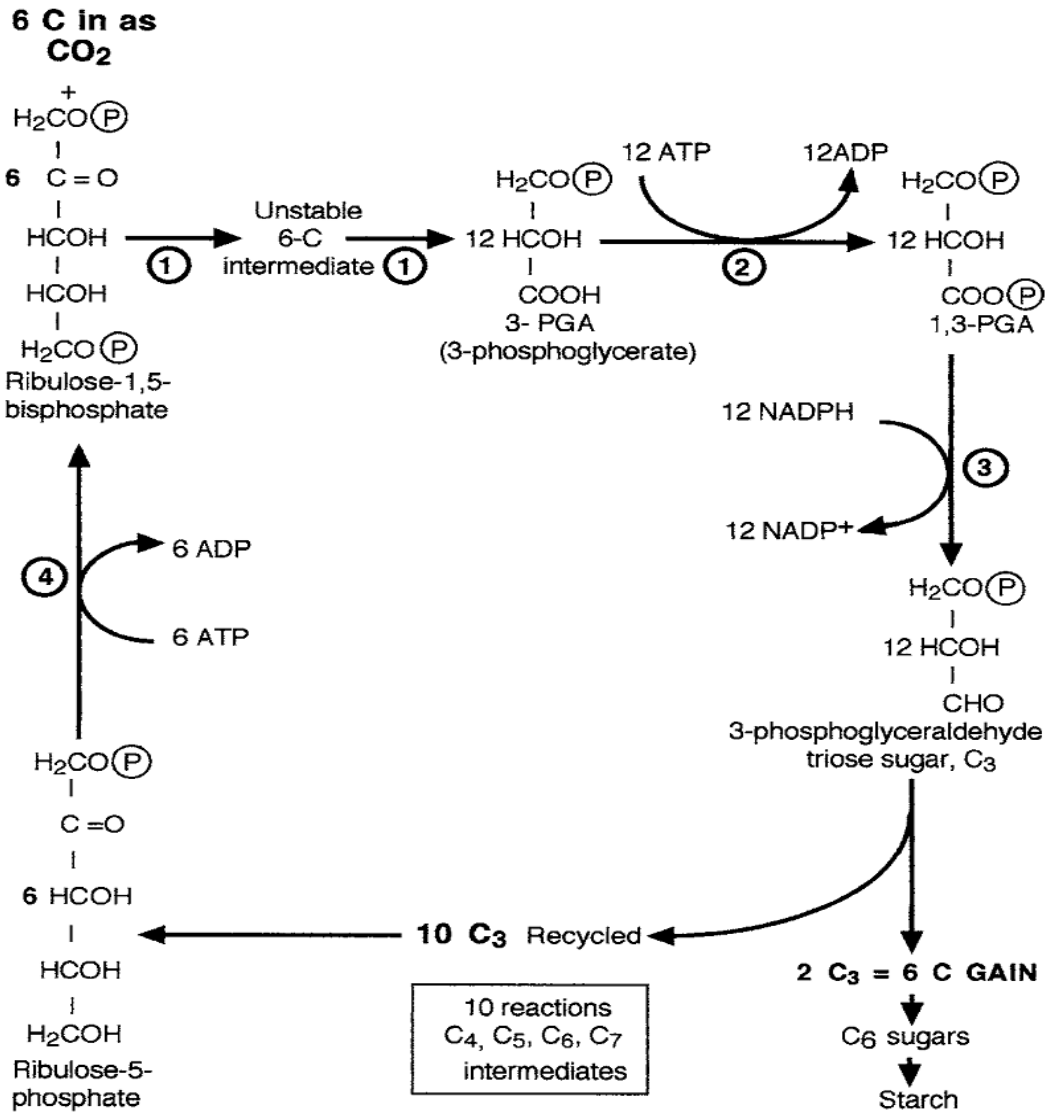
حسب طريقة إدماج المادة الأولية للبناء قسمت النباتات إلى: C_3 . C_4 . CAM

1- تثبيت الـ CO_2 عند النباتات ثلاثية الكربون C_3 (حلقة CALVIN):

- تشمل الأنواع التالية: القمح ، الشعير ، الأرز ...
- تشمل هذه الدورة على عدة تفاعلات أساسية تحدث داخل البلاستيدة.
- تم الكشف عن هذه الدورة في طحلب Chlorella حيث قام العالم وزملائه بتعريض البيئة التي يعيش فيها هذا الطحلب للكربون المشع $^{14}CO_2$ حيث استعملت البيكاربونات كمصدر للكربون في شكل محلول $^{14}HCO_3^-$ لفترات زمنية مختلفة وبعد عدة ثواني كان حوالي 90% من المواد المشعة في المجموعة الكربوكسيلية لمركب (3 Phosphoglucerate) واختصارا (3APG)، أما إذا زيدت فترت التعريض فان الكربون المشع يظهر في مركبات أخرى وإذا طالت الفترة الزمنية يظهر الكربون في المركبات السكرية الأخرى مثل السكروز.
- وبعد توالي البحوث تأكد بان المستقبل الأول ل CO_2 وهو **سكر خماسي** (Ribulose 1-5 phosphate) ليكون مركب سداسي ذرات الكربون **غير ثابت** لا يلبث أن ينشطر ليكون **سكر ثلاثي** الفوسفات الجلسرين **3APG** (Acide 3 phosphoglycérique)

- تتلخص دورة كالفن في أربعة مراحل من التفاعلات
- **1- تثبيت الـ CO_2:** يثبت الـ CO_2 في الكلوروبلاست مع جزيئة خماسية من Rudip، المركب الوسطي السداسي الكربون غير ثابت فهو ينشق بسرعة إلى جريئتين متماثلتين ثلاثية الكربون APG Acide phosphoglycérique يحتويان على ثلاثة ذرات كربون ومنها اشتقت النباتات ثلاثية الكربون.
- **2- اختزال APG:** كل جزيئة APG تختزل إلى Glyceraldehydes phosphate باستعمال جزيئة ATP و NADPH .
- **3- تصدير Glyceraldehydes phosphate:** إلى خارج الكلوروبلاست أين لا يجمع إلا مؤقتا في النهار على شكل جزيئة كبيرة من النشاء الذي يميه في الليل إلى سكريات قابلة للتصدير خارج الكلوروبلاست.
- **4- اعادة تشكيل Rudip:** مستقبل CO_2 الذي هو Rudip يعاد تشكيله انطلاقا من Pi و ATP انطلاقا من تفاعلات تحويل السكريات والتي تلخص في المعادلة التالية:

$$\text{Ribulose 1,5-P} + CO_2 + H_2O \longrightarrow \text{2 glycérate 3-P}$$

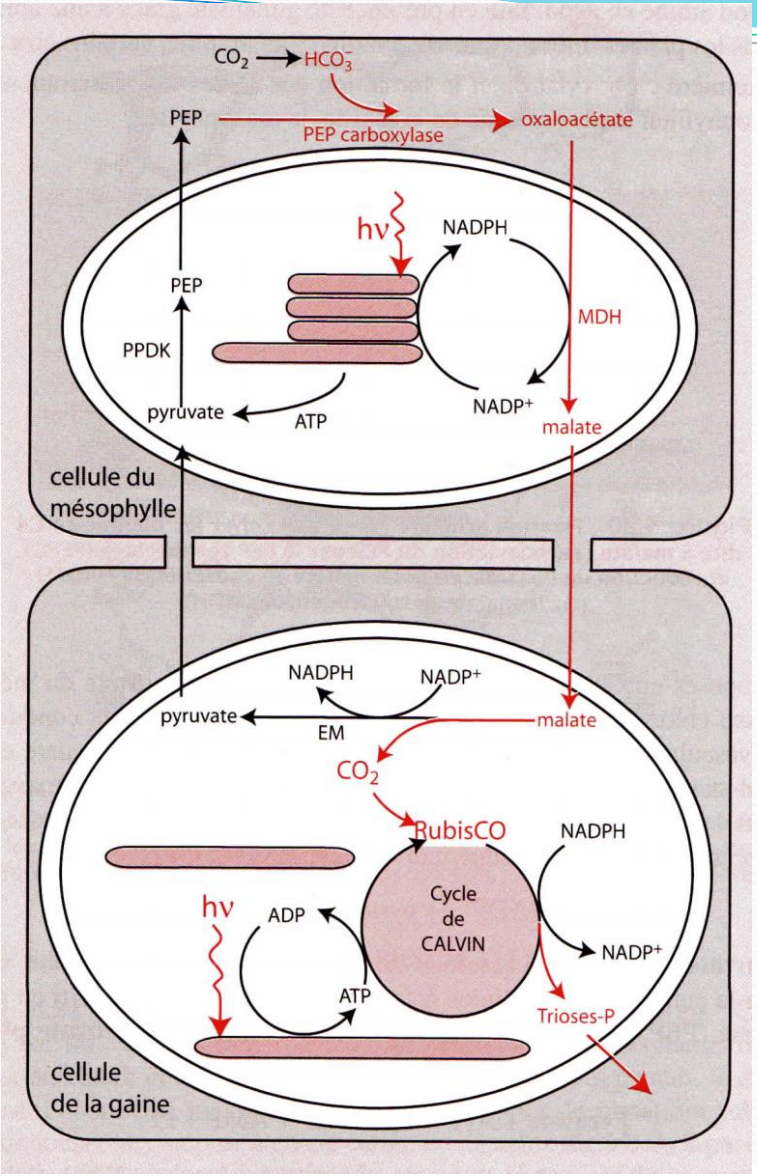


الشكل 16: حلقة CALVIN

2- تثبيت الـ CO_2 عند النباتات رباعية الكربون C_4 (حلقة HATCH et SLACK):

- بعد اكتشاف مسار الكربون في طحلب Chlorella توالت البحوث في هذا المجال للكشف عن مدى التشابه بين النباتات الراقية في هذه الدورة حيث اثبت HATCH et SLACK عام 1968 ان هناك اختلاف في مسار الكربون عند بعض النباتات مثل **قصب السكر والذرة** إذ أن الناتج الاول الثابت بعد تعريض النبات للكربون المشع هو عبارة عن مركب عضوي رباعي ذرات الكربون **(OAA) acide Oxaloacétique** وليس (APG).
- ومن هنا استدلو ان هناك مسار آخر بديل لاختزال CO_2 في هذه النباتات، حيث اكتشف العالمان مسارا للكربون والتعرف كذلك على التفاعلات والانزيمات التي تؤدي الى اختزال CO_2 وإضافته الى الحمض العضوي ثلاثي ذرات الكربون وهو **Phosphoenolpyrovate (PEP)** وتكوين حمض عضوي رباعي ذرات الكربون هو حمض **(OAA)** اما الانزيم المسئول عن هذه العملية هو Phosphoenolpyrovate carboxylase.
- جميع هذه التفاعلات تحدث في خلايا النسيج المتوسط.

Phosphoénolpyruvate + CO_2 + H_2O ⟶ oxaloacétate + Pi



الشكل 17: مسار الكربون عند النباتات رباعية الكربون C_4

3- تثبيت الـ CO_2 عند النباتات العصارية Crassulacean acid Metabolism (CAM):

- جاء الاسم من اسم فصيلة النباتات التي تم اكتشاف هذه الطريقة فيها لأول مرة وهي فصيلة النباتات العشبية (Crassulacea) أو السيدوم، بعد ذلك تم اكتشاف هذه الطريقة في أكثر من 25 عائلة من النباتات الأخرى مثل الأناناس التي تنمو في ظروف بيئية جافة.
- تكيفت هذه النباتات مع هذه الظروف بعدة عوامل منها المحافظة على الماء وذلك **بغلق الثغور أثناء النهار وفتحها أثناء الليل**. وبالرغم من أن غلق الثغور أثناء النهار في هذه النباتات يساعدها على المحافظة على الماء، لكنه يمنع دخول ثاني أكسيد الكربون.
- لذا فإن دخول **CO_2** وعملية تثبيته وتحويله إلى مركبات عضوية مختلفة تتم عندما تكون الثغور مفتوحة أثناء الليل.
- يطلق على هذه الطريقة اسم الأيض الحمضي العشبي (CAM) وفيها يتم تثبيت ثاني أكسيد الكربون بطريقة **تشبه** تثبيته في النباتات رباعية الكربون **(C_4)**، حيث أن المركب العضوي الأول الذي يتم تثبيت ثاني أكسيد الكربون فيه هو حمض acide Oxaloacétique **(OAA)** وهو يتكون من أربع ذرات كربون، إلا أن هناك اختلافات هامة بين النوعين وذلك كما يلي:

$$\text{Phosphoénolpyruvate} + CO_2 + H_2O \longrightarrow \text{oxaloacétate} + Pi$$

1. تتم عملية تثبيت ثاني أكسيد الكربون بواسطة إنزيم **Phosphoenolpyrovate carboxylase**، وارتباطه مع **acide pyruvique** معطياً (OAA) تتم **أثناء الليل فقط** في خلايا **النسيج المتوسط** (Mésophile) التي تقوم بتخزين الأحماض العضوية الناتجة بعد تثبيت ثاني أكسيد الكربون في الفجوات العصارية حتى الصباح .
2. **أثناء النهار** يتحرر ثاني أكسيد الكربون من الأحماض العضوية ويدخل دورة كالفن لإكمال تفاعلات الدورة في خلايا النسيج المتوسط أيضاً وليس في الخلايا الحزمية كما في النباتات الأخرى.

ليلاً :

$$(OAA) \longrightarrow \text{malate} \longrightarrow CO_2 + (PEP)$$

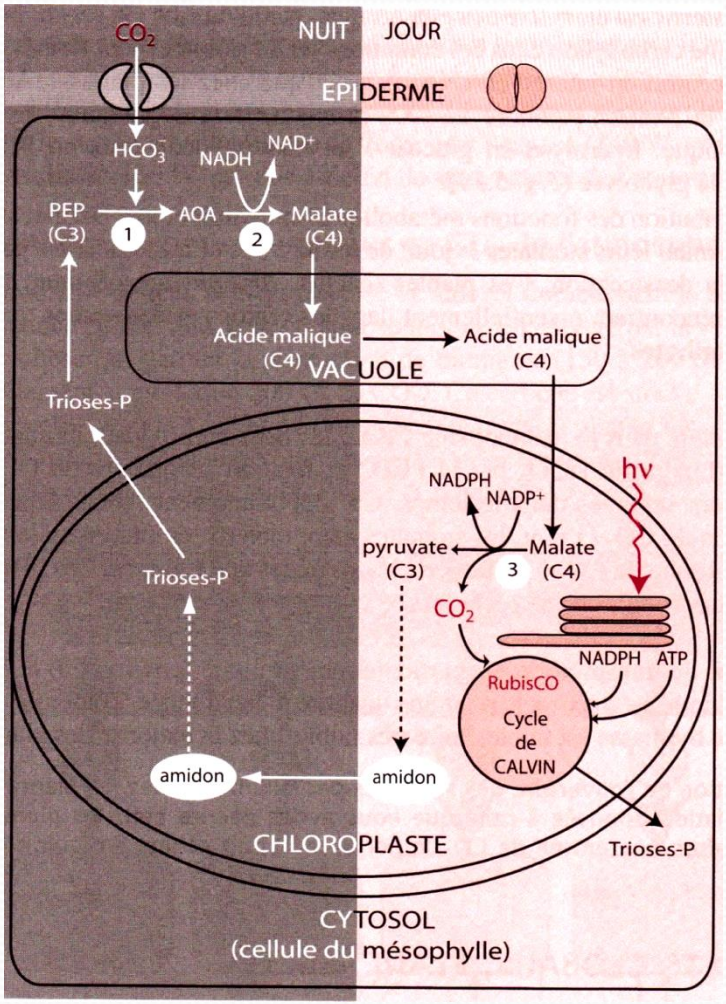
Oxaloactic acid — Posphoenol pyruvate

نهاراً:

$$\text{Malate} \longrightarrow (OAA) \longrightarrow CO_2 + (PEP)$$

تمتاز هذه النباتات بعدة صفات منها:

1. نباتات جفاقية (تعيش في بيئة جافة).
2. تمتلك النباتات أوراقاً غضة وتكون نسبة مساحة سطح النبات الى حجمه صغيرة.
3. تمتاز بمعدل ضعيف من النتح.
4. تتشابه مع C_4 في جميع التفاعلات والأنزيمات.
5. تغلق ثغورها نهاراً للمحافظة على الماء القليل وتفتح ليلا لتثبيت CO_2 وتحويله الى أحماض عضوية (malate).
6. يتم تثبيت CO_2 ليلا ليتم اختزاله لتكوين حمض رباعي ذرات الكربون malate الذي يتجمع في الفجوة وفي النهار تغلق الثغور ويتم تحرير CO_2 من malate ليتم اختزاله في دورة كالفن.



الشكل 18: مسار الكربون عند النباتات العصيرية

جدول1: مقارنة بين نباتات رباعية الكاربون C_4 ونباتات ثلاثية الكاربون C_3

نباتات C_4	نباتات C_3
الانزيم الذي يثبت CO_2 تثبيت هو **Phosphoenolepyruvate carboxylase**	الانزيم الذي يثبت CO_2 تثبيت هو **Ribulose diphosphate carboxylase**
تمتلك نوعين من الكلوروبلاست: في النسيج المتوسط وفي غمد الحزم الوعائية	نوع واحد من الكلوروبلاست
ناتج التفاعل الاول هو **Oxaloacetate**	ناتج التفاعل الاول هو **acide phosphoglycérique**
تستطيع القيام بعملية التمثيل الضوئي بفعالية في تراكيز منخفضة من CO_2	لا تستطيع القيام بعملية التمثيل الضوئي بفعالية في تراكيز منخفضة من CO_2
تستطيع القيام بعملية التمثيل الضوئي بفعالية عالية في الشدة العالية للضوء	لا تستطيع القيام بعملية التمثيل الضوئي بفعالية عالية في الشدة العالية للضوء
تستطيع القيام بعملية التمثيل الضوئي بفعالية عالية في دراجات الحرارة العالية	لا تستطيع القيام بعملية التمثيل الضوئي بفعالية عالية في دراجات الحرارة العالية
تستطيع العيش في ظروف قلت الماء	لا تستطيع العيش في ظروف قلت الماء
عملية التمثيل الضوئي لا تتأثر بوجود الاكسيجين	عملية التمثيل الضوئي تتثبط بوجود الاكسيجين
اغلب نباتاتها تعيش في المناطق شبه الاستوائية كالذرة وقصب السكر	اغلب نباتاتها تعيش في المنطق المعتدلة
عملية التنفس الضوئي **Photorespiration** فيها منخفضة	عملية التنفس الضوئي **Photorespiration** فيها عالية

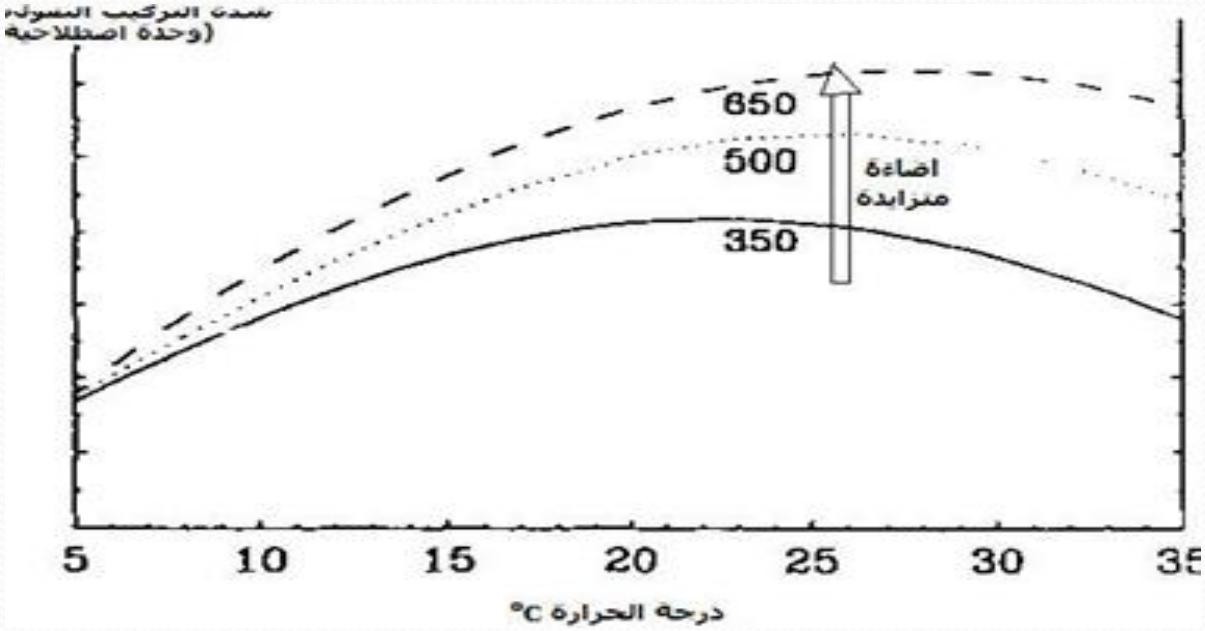
6.1. العوامل المؤثرة على التمثيل الضوئي:

1- الإضاءة:

- تزداد سرعة عملية التمثيل الضوئي بزيادة كمية الضوء
- شدة الاضاءة اليومية التي يستطيع فيها النبات أن يبني السكر اللازم لحياته تسمى شدة الإضاءة الحرجة
- تختلف النباتات في معدل التمثيل الضوئي وشدة الإضاءة حسب البيئات التي تعيش فيهات الى نباتات محبة للضوء ونباتات الظل
- نوعية الاضاءة لها تأثير في معدل التمثيل الضوئي فقد وجد ان الضوء الاحمر والأزرق هما الاساسيان في التفاعلات الضوئية
- وتعتبر شدة الاضاءة تحت الظروف الطبيعية هي العامل المحدد في هذه العملية عندما تكون العوامل الاخرى مثالية
- الضوء ينشط بعض انزيمات دورة CALVIN مثل انزيم Ribulose diphosphate carboxylase.

2- الحرارة:

- تؤثر درجات الحرارة بصورة واضحة في عملية التمثيل الضوئي
- درجات تحت الصفر تؤدي الى تجمد الماء في داخل المسافات البينية ومنع دخول غاز CO_2 وبالتالي خفض معدل التمثيل الضوئي
- درجات الحرارة العالية تؤثر سلبيا على نشاط انزيمات تفاعلات الظلام (ولا تؤثر في تفاعلات المرحلة الضوئية) مسببة خفض معدل التمثيل الضوئى ويتراوح المجال الحراري لهذه التفاعلات ما بين 2 ـ 3م° في حدود الحرارة الفيسيولوجية و ما بين 5 ـ 20م° عند اغلبية الباتات حيث ينخفض معدل التمثيل الضوئى او يتوقف عندما تنخفض او ترتفع درجة الحرارة عن هذا المجال.

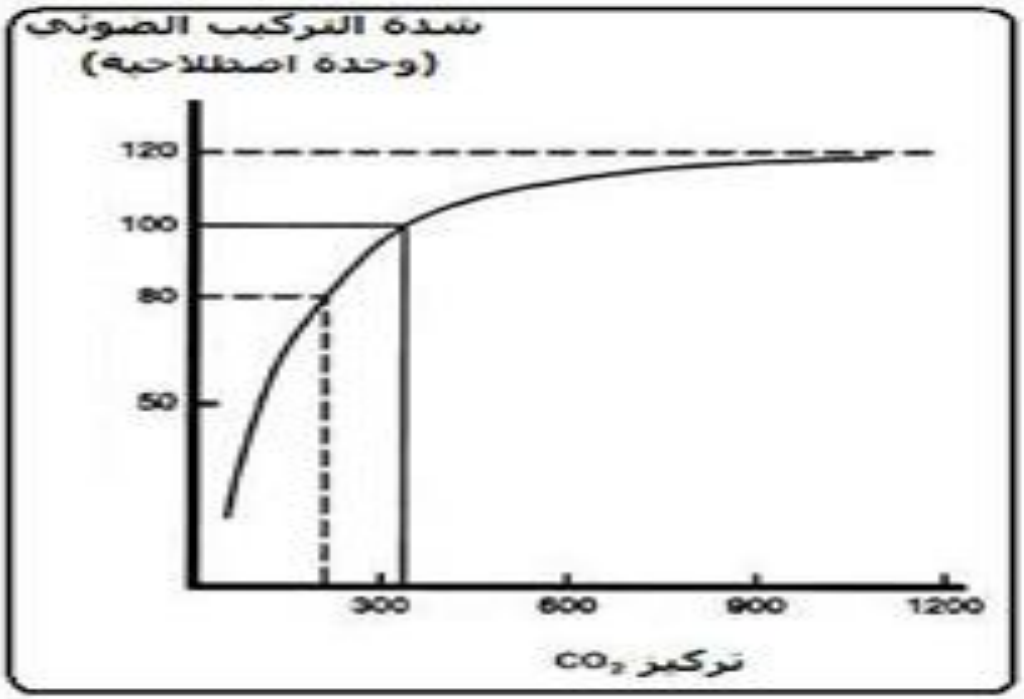


الشكل 6: تأثير الحرارة على شدة التمثيل الضوئى

3- تركيز CO_2:

- تبلغ نسبة CO_2 في الهواء الجوي 0.03 %
- زيادة تركيز CO_2 في الهواء المحيط بالنبات يؤدي الى زيادة معدل التمثيل الضوئى أعلى الى أن يصل تركيزه الى 0.15 %
- ينقص معدل التمثيل الضوئي سريعا عند تركيز أعلى من هذا المستوى ويصبح سام عند التركيز 4 %
- لوحظ أن انتشار الغاز داخل أنسجة الورقة من خلال الثغور يتأثر بسعة الثغر فهو يتناسب طرديا مع قطر الثغر

.



الشكل 7: تأثير تركيز CO_2 على شدة التمثيل الضوئى

4- تركيز الاوكسجين:

- تبلغ نسبة الأكسوجين فى الهواء الجوى حوالي 21%
- وجد أن نقص تركيز الأوكسجين في الهواء الجوي ذو تأثير مشجع على عملية التمثيل الضوئى بينما زيادة تركيزه عن هذا الحد يكون ذو أثر مثبط وذلك لأنه يعمل على:

1. التنافس مع CO_2 على H_2 وبالتالي يقلل فرص إختزال CO_2 مما يثبط التمثيل الضوئي
2. أكسدة Rudipالمستقبل لغاز CO_2 ليحوله الى مركب آخر مما يقلل كفاءة التمثيل الضوئي.
3. التأثير السلبي على نشاط إنزيم Ribulose diphosphate carboxylase

5- الماء:

- دلت الأبحاث أن كمية الماء اللازمة لاستمرار عملية التمثيل الضوئي تقدر بحوالي 1% فقط من جملة الماء الممتص بواسطة النبات
- لوحظ أن للماء تأثير على عملية التمثيل الضوئي فعند حصول الجفاف الشديد تغلق الثغور وينخفض دخول غاز CO_2 وبالتالي ينخفض التمثيل الضوئي
- الجفاف الشديد يؤدي الى سحب الماء من البروتوبلازم وهذا بدوره يؤثر سليبا في نشاط الانزيمات في الخلية ومنها انزيمات التمثيل الضوئي.

6- العناصر الغذائية:

- نقص بعض العناصر الغذائية كالنيتروجين والمغنيزيوم والبوتاسيوم والفوسفور يؤدي إلى انخفاض معدل التمثيل الضوئي لكون تلك العناصر قد تشترك في بناء الكلوروفيل a و b كما في النتروجين والمفنيزيوم
- تلعب دور العوامل المساعدة لبعض الإنزيمات الخاصة بتفاعلات الظلام
- ضرورة وجودها بكميات قليلة مثل الكلور فقد وجد أنه يؤثر على نقل الالكترونات من الماء إلى الكلوروفيل.

7- عمر الورقة:

- الأوراق البالغة هي الأوراق الأكثر كفاءة في عملية التمثيل الضوئي أما الأوراق الحديثة والأوراق التي وصلت الى موحلة الشيخوخة فإنها تكون ذات كفاءة منخفضة.