تمثيل العناصر المغذية في النبات
Nutrient assimilation

تُعد النباتات الراقية كائنات حية ذاتية التغذية Autotrophic Organisms، أي تستطيع أن تُصنّع المركبات العضوية (السكريات، والبروتينات، والمواد الدهنية) من المكونات المعدنية (العناصر المعدنية المغذية)، التي تحصل عليها من الوسط المحيط. وتتضمن هذه العملية بالنسبة إلى معظم العناصر المعدنية امتصاصها من التربة بواسطة جذور النباتات وتمثيلها في أجزاء النباتات المختلفة إلى مركباتٍ عضوية ضرورية لنمو النباتات وتطورها.

تُسمى عملية تحويل العناصر المعدنية المغذية إلى مواد عضوية Organic molecules، مثل الأصبغة اليخضورية والبرتقالية، والأنزيمات Enzymes، والمواد الدهنية Lipids، والأحماض النووية Nucleic acids، والأحماض الأمينية Amino acids، اصطلاحاً بعملية تمثيل العناصر المغذية Nutrient assimilation.

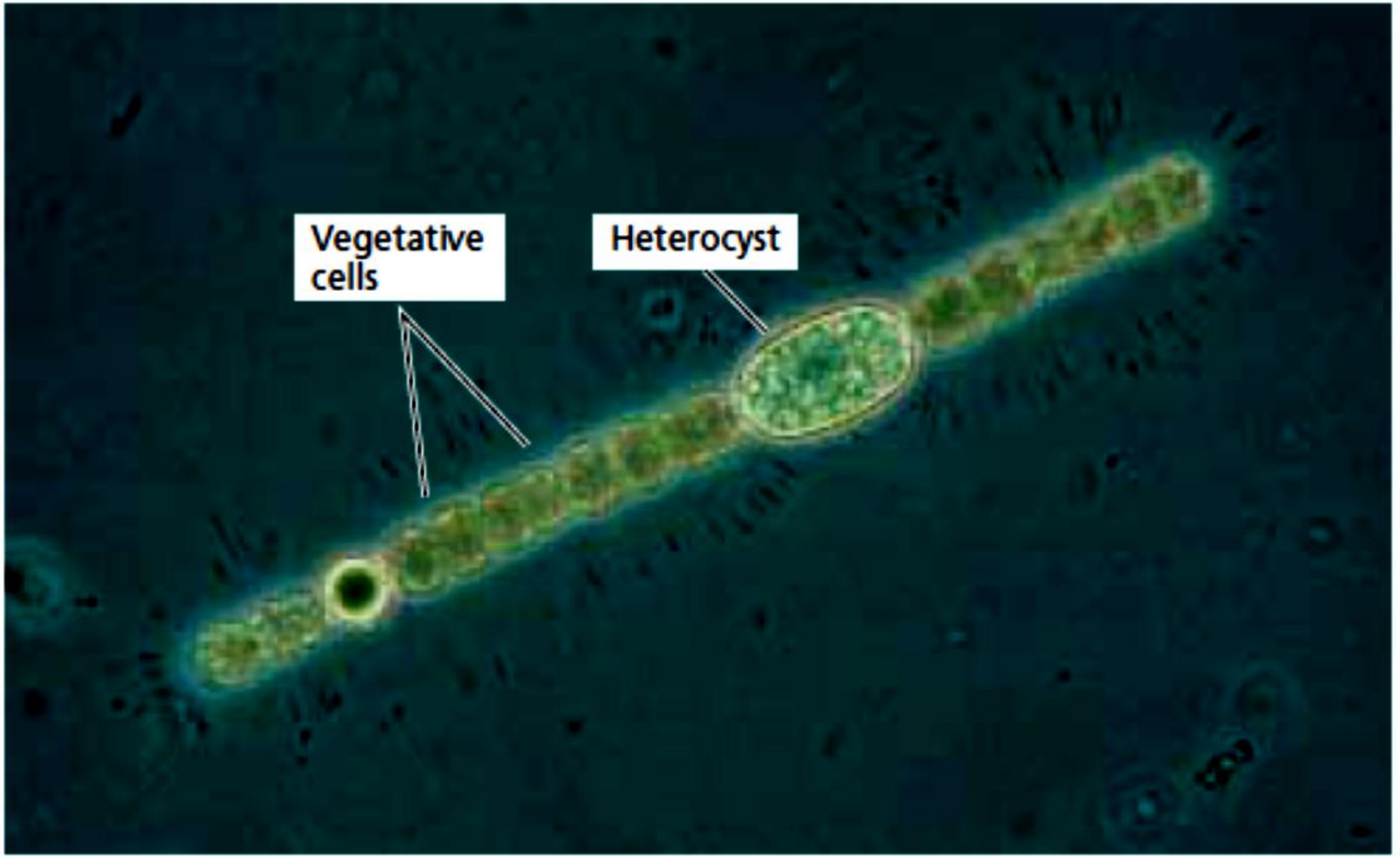
الآزوت في البيئة Nitrogen In The Environment: تحتوي العديد من المركبات البيوكيميائية في الخلايا النباتية على عنصر الآزوت. ويتواجد عنصر الآزوت (N) في النيكليوتيدات Nucleoside phosphates، والأحماض الأمينية التي تُشكل الوحدات البنائية للأحماض النووية والبروتينات على التوالي. ويُعد عنصر الآزوت الأكثر إتاحةً في النباتات بعد الأوكسيجين، والكربون، والهيدروجين. وتبدي العديد من النظم البيئية الزراعية والطبيعية زيادة كبيرة في الإنتاجية بعد التسميد بالآزوت المعدني Inorganic nitrogen، ما يُشير إلى أهمية هذا العنصر.

يتواجد عنصر الآزوت بعدة أشكال في الغلاف الجوي، الذي يحتوي على نحو 78% من الآزوت الجزيئي (N_2). ولكن هذه الكمية الهائلة من الآزوت لا تكون عادةً متاحة بشكلٍ مباشر للكائنات الحية. ويتطلب الحصول على الآزوت من الغلاف الجوي ضرورة تحطيم الرابطة التشاركية الثلاثية المستقرة بشكلٍ كبير بين ذرتي الآزوت ($N \equiv N$) لإنتاج الأمونيا (NH_3) أو النترات (NO_3^-). وتُسمى هذه التفاعلات بتثبيت الآزوت، التي يمكن أن تتم إمّا طبيعياً أو صناعياً. ويمكن تحت درجات الحرارة المرتفعة جداً (200 مْ) مع الضغط المرتفع (200 ضغط جوي) أن يتحد الآزوت الجزيئي مع الهيدروجين لتشكيل الأمونيا. وتقدر كمية الأسمدة الآزوتية المُصنّعة سنوياً على مستوى العالم بهذه الطريقة بنحو 80×10^{12} غ.

أو يمكن أن يُصنع طبيعياً خلال حدوث البرق Lightning، الذي يؤدي إلى تثبيت 8% من الآزوت الجوي، أو من خلال تفاعلات كيميوضوئية Photochemical reactions بين أول أوكسيد النتريك (NO) والأوزون (O_3) الذي يُعطي حمض النتريك (HNO_3)، ويتم بواسطتها تثبيت نحو 2% من الآزوت الجوي. أمّا 90% من الآزوت المثبت طبيعياً فيتم حيوياً بواسطة بعض أنواع من البكتيريا، أو بواسطة الطحالب الخضراء المزرقة المُسمّاة Blue-green algae (Cyanobacteria) القادرة على تكسير الروابط الكيميائية عند درجات الحرارة والضغط العاديين. وتُشير التقديرات إلى أنّ كمية الآزوت الجوي المثبت حيوياً أكبر بكثير مما تنتجه مصانع الأسمدة الآزوتية حالياً. ويمكن تثبيت الآزوت الجوي بواسطة بكتيريا التربة بطريقتين، إما تكافلياً عن طريق التعايش مع النباتات، حيث تزود الأخيرة البكتيريا بالطاقة (السكريات) اللازمة لها، أو بشكلٍ حر، حيث تعتمد البكتيريا على نفسها في الحصول على مصدر الطاقة.

التثبيت الحيوي للآزوت الجوي Biological nitrogen fixation: تتطلب عملية تثبيت الآزوت حيوياً ظروفاً لاهوائية Anaerobic conditions، وذلك لأنّ الأكسيجين يتفاعل بشكلٍ غير عكوس مع أنزيم النيتروجيناز Nitrogenase، الأنزيم المسؤول عن تثبيت الآزوت، مثبطاً عمله، ولذلك فإنّ جميع الأنواع الأحيائية المثبتة للآزوت إمّا أنّها تعمل بشكلٍ طبيعي تحت الظروف اللاهوائية، أو أنّها تُخلّق أو تصطنع هذه الظروف بوجود الأكسيجين بطرقٍ مختلفة.

تصطنع السيانوباكتيريا، على سبيل المثال، الظروف اللاهوائية ضمن خلايا متخصصة يُطلق عليها اسم **Heterocyst**، التي هي عبارة عن خلايا متمايزة سميكة الجدران تفتقر للنظام الضوئي الثاني **PSII** المسؤول عن تحرير الأكسجين الناجم عن الأكسدة الضوئية للماء(الشكل). ولا تتمكن أنواع السيانوباكتيريا التي لا تحتوي خلايا **Heterocyst** من تثبيت الآزوت الجوي إلاّ تحت الظروف اللاهوائية، وفي مناطق عديدة من قارة آسيا، تشكل السيانوباكتيريا سواءً المحتوية على خلايا **Heterocyst** أو غير المحتوية عليها، مصدراً مهماً للآزوت في حقول الرز، حيث تقوم بتثبيت الآزوت عندما تكون الحقول مغمورة بالماء وتموت هذه البكتيريا عندما تجف الحقول محررةً بذلك كمياتٍ كبيرة من الآزوت في التربة. كما يرتبط السرخس المائي ***Azolla*** مع السيانوباكتيريا ***Anabaena*** في حقول الرز المغمورة، ويتم نتيجة ذلك تثبيت قرابة **0.5** كغ **N**. هكتار$^{-1}$. يوم $^{-1}$، ويُعد هذا معدلاً كافٍ من التسميد الآزوتي للحفاظ على غلة متوسطة نوعاً ما من محصول الرز (***Oryza sativa*** L.).


Vegetative cells
Heterocyst

حالما يتم تثبت الآزوت الجزيئي إلى أمونيوم أو نترات، سوف يدخل الآزوت ضمن حلقة Biogeochemical ويمر بالعديد من الأشكال المعدنية العضوية قبل أن يعود بشكلٍ نهائي إلى الآزوت الجزيئي. وإنّ شوارد الأمونيوم (NH_4^+) والنترات (NO_3^-) التي تتشكل من عملية تثبيت الآزوت، أو تنتج من عملية تفكيك المادة العضوية في التربة تصبح موضع منافسة كبيرة جداً بين النباتات والكائنات الحية الدقيقة. وبعد التسميد المعدني بالأسمدة الآزوتية، يصبح تركيز تلك الشوارد مرتفعاً جداً، وتمتص جذور النباتات كمية من الأمونيوم والنترات تفوق مقدرة النباتات على تمثيلها بالكامل، ما يؤدي إلى تراكمها في أنسجة النبات. ويمكن للنباتات أن تخزن كمياتٍ كبيرة من شوارد النترات أو تنقلها من نسيجٍ لآخر دزن تأثيراتٍ ضارة. ولكن إذا ما استهلك الإنسان أو الحيوان كمياتٍ كبيرة من تلك الأجزاء النباتية فسوف يعانون من مرض Methemoglobinemia، وهو مرض يقوم فيه الكبد liver باختزال النترات إلى نتريت، الذي يتحد مع خضاب الدم ما يُقلل من كفاءته على الاتحاد مع جزيئات الأوكسيجين. ويمكن أيضاً أن تحول أجسام البشر والحيوانات النترات إلى Nitrosamines الذي يُعد من المواد المسرطنة بشكلٍ كبير Carcinogens. لذلك تمنع العديد من الدول بيع النباتات التي تحتوي على النترات المعدّة للاستهلاك البشري. وبشكلٍ معاكس للنترات، فإنّ الأمونيوم سام لكلٍ من النباتات والحيوانات.

دورة الآزوت Nitrogen cycle: يُعد الآزوت من العناصر الكبرى الضرورية لنمو النباتات، إذْ يتطلبه النبات بكمياتٍ كبيرة، وهو يدخل في تركيب الأحماض الأمينية، والبروتينات، والأنزيمات، والكلوروفيل، والأحماض النووية.إلخ. تحصل النباتات الخضراء على الآزوت من محلول التربة على شكل أمونيوم NH_4 أو نترات NO_3. يُعد الآزوت الجوي المصدر الرئيس لمركبات الآزوت في الطبيعة، هذا الآزوت الجوي غير متوافر بشكلٍ مباشر للكائنات الحية باستثناء بعض البكتريا المثبتة للآزوت، وبعض الطحالب Blue green algae. وبشكلٍ عام، تتضمن دورة الآزوت الخطوات التالية:

1- تحويل الآزوت الجوي الحر (N_2) إلى مركبات آزوتية Nitrogen fixation: وتتم هذه الخطوة بتثبيت الآزوت حيوياً Biological nitrogen fixation، أو تثبيت الآزوت لاحيوياً Physio-chemical nitrogen fixation.

2- تمثيل المركبات الآزوتية الممتصة بوساطة النبات على صورة (NH_4, NO_3) وتحويلها إلى مركبات آزوتية عضوية (أحماض أمينية وأميدات)، وتحصل الحيوانات على الآزوت اللازم لها من خلال تغذيتها على النباتات.

3- تحرير الأمونيا Ammonification: يتم مهاجمة البقايا العضوية للنباتات والحيوانات بوساطة العديد من الكائنات الحية الدقيقة، ولاسيما الـ Actinomycetes- وبكتريا الـ Bacillus- ، حيث تستخدم هذه الكائنات المركبات العضوية في عملياتها الاستقلابية وتحرر الأمونيا.

4- التأزت Nitrification: تقوم بعض البكتيريا مثل Nitrosomonase، Nitrococcus..الخ، في المحيطات والتربة بتحويل الأمونيا إلى آزوتيت (NO_2)، حيث تستعمل هذه البكتيريا الطاقة المخزنة في أجسام النباتات والحيوانات الميتة في عملياتها الاستقلابية.

$$NH_4^+ + 2O_2 \rightarrow NO_2^- + 2H_2O + energy$$

تقوم بكتريا أخرى مثل Nitrobacter، Nitrocystis..الخ، بتحويل الآزوتيت إلى آزوتات (NO_3) وتحصل على الطاقة.

$$2NO_2^- + O_2 \rightarrow 2NO_3^- + energy$$

5- تطاير الآزوت Denitrification: يتحول جزء من الأمونيا والآزوتات إلى آزوت حر (N_2) بواسطة بعض الكائنات الحية الدقيقة مثل pseudomonase aeruginosa، Thiobacillus denitrificans..الخ.

$$2NO_3^- \rightarrow 2NO_2 \rightarrow 2NO \rightarrow N_2O \rightarrow N_2$$

6- الترسيب والترشيح Sedimentation and leaching: يتم غسل جزء من الآزوتات في التربة إلى البحار أو ترشح عميقاً في التربة مع ماء الرشح Percolation water، هذه الآزوتات المفقودة بالرشح تُحبس في صخور التربة وهذا ما يُسمى بترسيب الآزوت، هذا الآزوت المحتبس في الصخور لا يتحرر إلا إذا تعرّضت هذه الصخور إلى عمليات الحت والتعرية.

إذاً هناك كمية كبيرة من الآزوت يتم تثبيتها في أجسام النباتات والحيوانات والكائنات الحية الدقيقة، وهناك توازن دائماً بين هذه الكمية والكمية المثبتة من الجو (Input and outflow of nitrogen) ضمن النظام البيئي، ويوضح الشكل دورة الآزوت في الطبيعة.

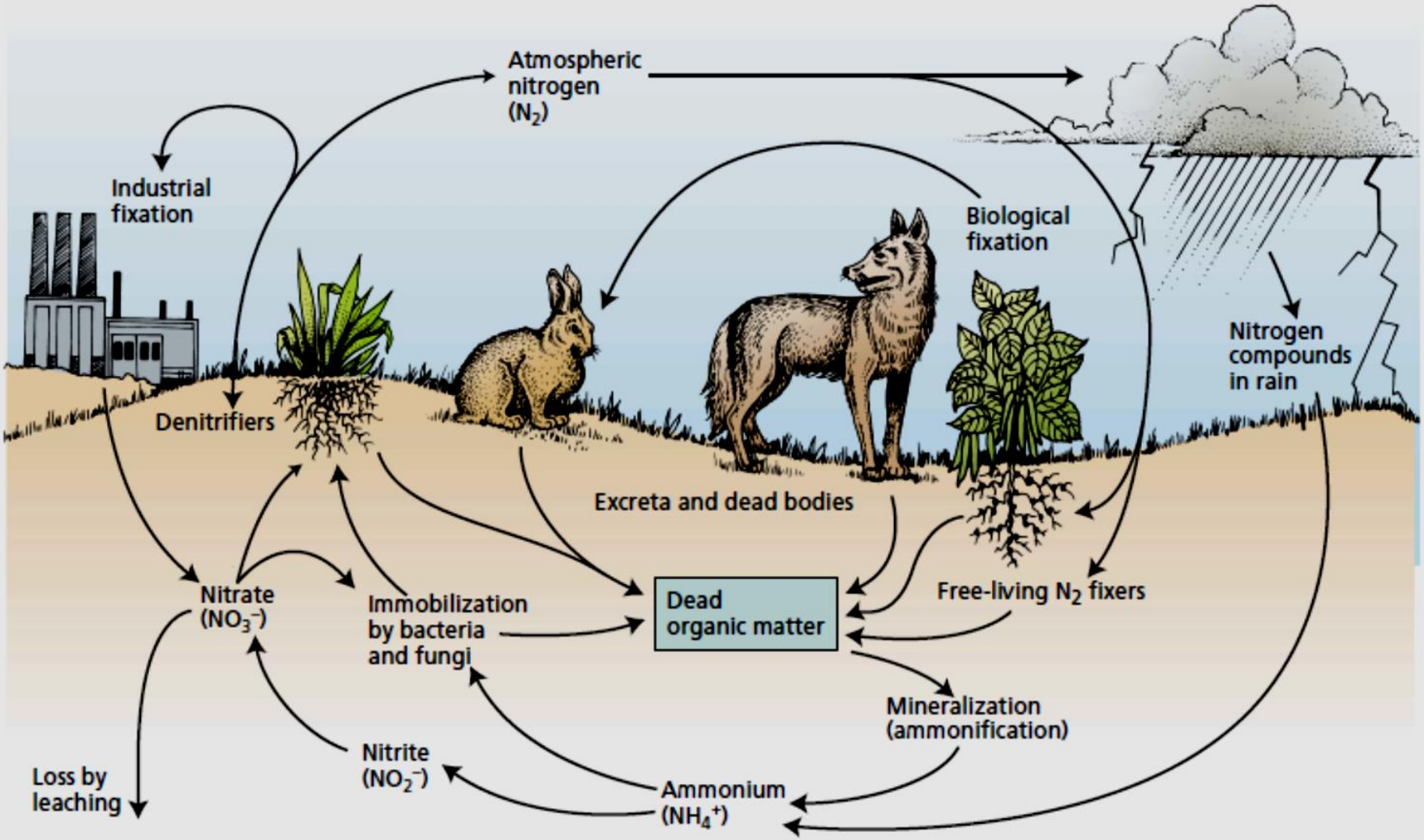


FIGURE 12.1 Nitrogen cycles through the atmosphere as it changes from a gaseous form to reduced ions before being incorporated into organic compounds in living organisms. Some of the steps involved in the nitrogen cycle are shown.

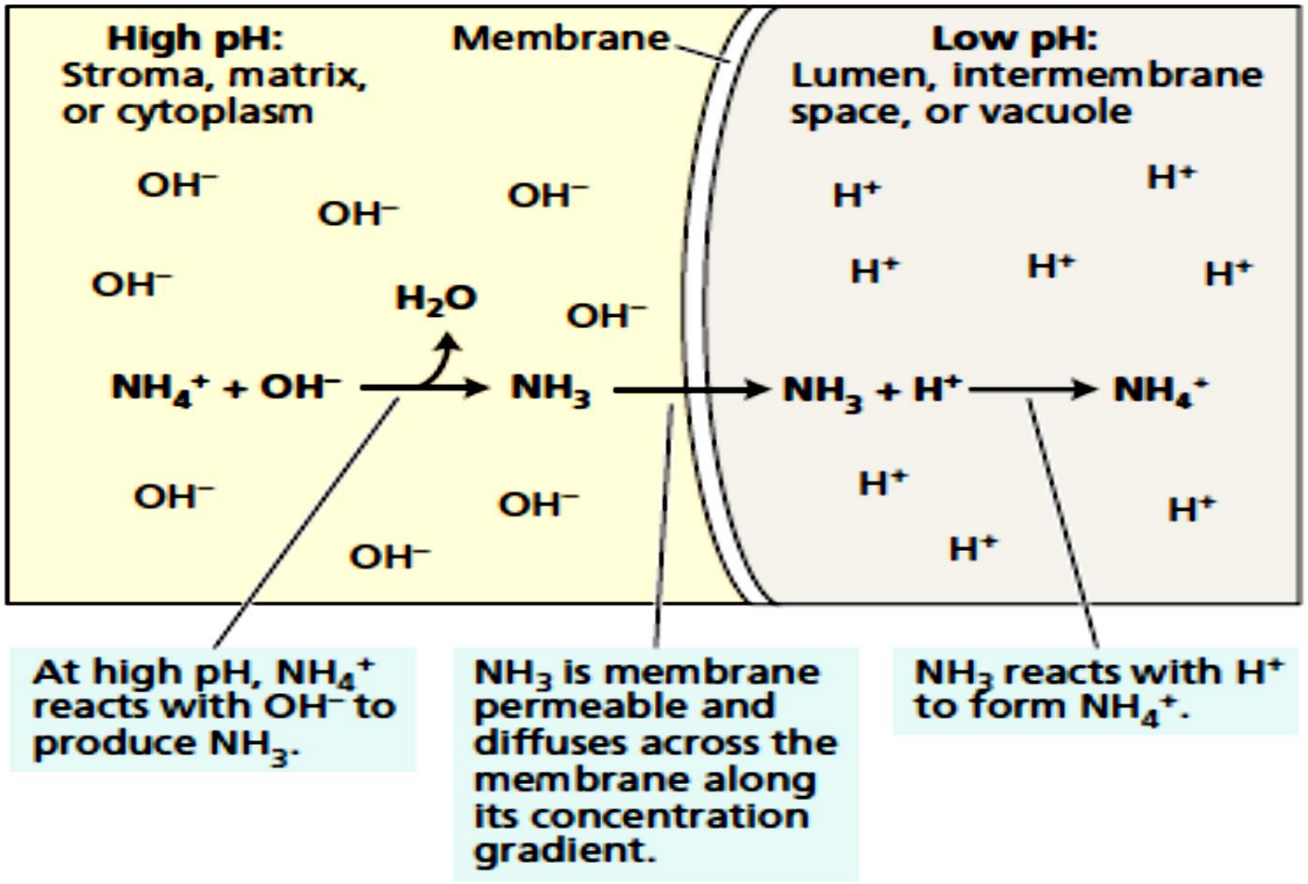
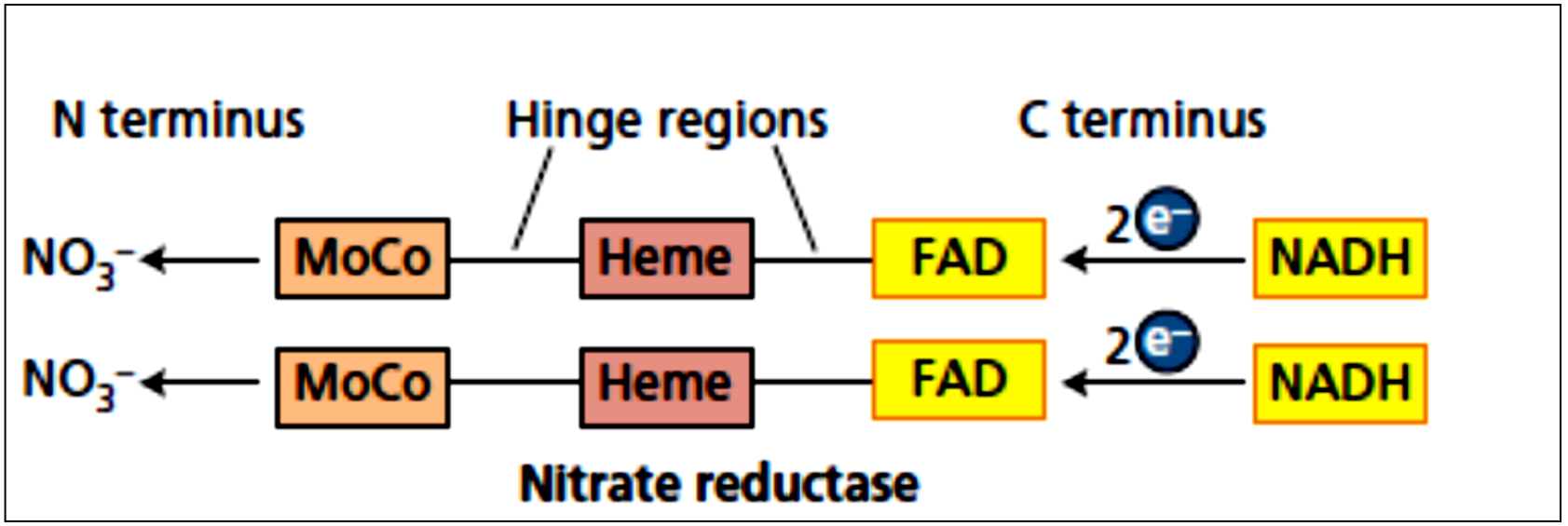


FIGURE 12.2 NH_4^+ toxicity can dissipate pH gradients. The left side represents the stroma, matrix, or cytoplasm, where the pH is high; the right side represents the lumen, intermembrane space, or vacuole, where the pH is low; and the membrane represents the thylakoid, inner mitochondrial, or tonoplast membrane for a chloroplast, mitochondrion, or root cell, respectively. The net result of the reaction shown is that both the OH^- concentration on the left side and the H^+ concentration on the right side have been diminished; that is, the pH gradient has been dissipated. (After Bloom 1997.)

تمثيل النترات Nitrate Assimilation: تقوم النباتات بتمثيل معظم النترات الممتصة من قبل الجذور إلى مركباتٍ عضوية ومعدنية. وتتمثل الخطوة الأولى من هذه العملية بإرجاع النترات Nitrate إلى نتريت Nitrite في السيتوبلاسم، ويُسمى الأنزيم الذي يتوسط هذا التفاعل Nitrate reductase: ويُعد أنزيم Nitrate reductase من البروتينات التي تحتوي على عنصر الموليبدنيوم في الأنسجة النباتية الخضراء، لذلك تؤدي أعراض نقص الموليبدنيوم إلى تراكم النترات نتيجة تراجع نشاط هذا الأنزيم.

$$NO_3^- + NAD(P)H + H^+ + 2\,e^- \rightarrow NO_2^- + NAD(P)^+ + H_2O$$



ويعمل ألأنزيم المُسمّى Nitrite Reductase على تحويل النتريت (NO_2^-)، -الذي يُعد من الشوارد ذات المقدرة التفاعلية المرتفعة والسّامة بشكلٍ كبير- إلى أمونيوم. حيث تعمل الخلايا النباتية بشكلٍ مباشر وسريع على نقل النتريت السام من السيتوبلاسم إلى الصّانعات الخضراء في الأوراق، والبلاستيدات في الجذور.

$$NO_2^- + 6\,Fd_{red} + 8\,H^+ + 6\,e^- \rightarrow NH_4^+ + 6\,Fd_{ox} + 2\,H_2O$$

where Fd is ferredoxin, and the subscripts *red* and *ox* stand for *reduced* and *oxidized*, respectively. Reduced ferredoxin derives from photosynthetic electron transport in the chloroplasts.

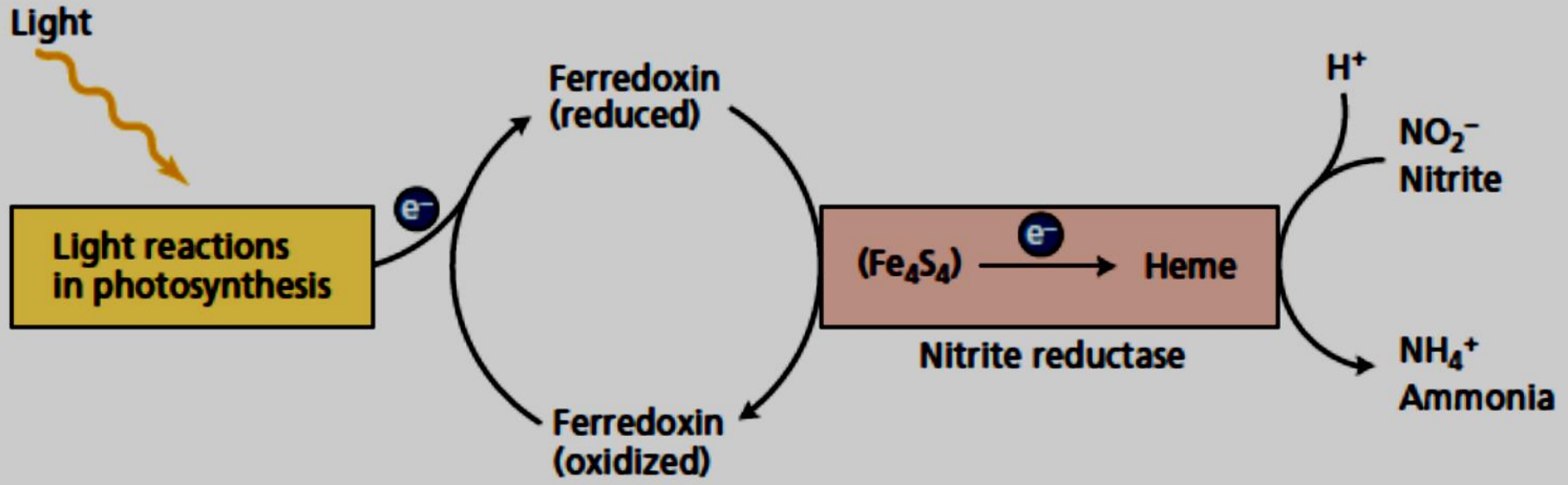


FIGURE 12.5 Model for coupling of photosynthetic electron flow, via ferredoxin, to the reduction of nitrite by nitrite reductase. The enzyme contains two prosthetic groups, Fe_4S_4 and heme, which participate in the reduction of nitrite to ammonium.

تمثيل الأمونيوم Ammonium Assimilation: حتى تتمكن الخلايا النباتية تجنب سمية الأمونيوم تعمل على تحويلها بشكلٍ سريع – تحويل الأمونيوم الناتجة من إرجاع النترات، والتنفس الضوئي photorespiration– إلى أحماضٍ أمينية Amino acids، بوجود أنزيم Glutamine synthetase (GS) على النحو الآتي:

$$Glutamate + NH4 + + ATP \rightarrow glutamine + ADP + Pi$$

ويعمل وجود تركيز مرتفع من الغلوتامين glutamine في الصّانعات على تحريض أنزيم Glutamate synthase، الذي ينقل مجموعة الأميد Amide group من الغلوتامين إلى مركب 2-oxoglutarate لتشكيل جزيئتين من مركب الغلوتامات Glutamate، وفق الآتي:

$$Glutamine + 2\text{-}oxoglutarate + NADH + H^{+} \rightarrow 2\ glutamate + NAD^{+}$$

$$Glutamine + 2\text{-}oxoglutarate + Fd_{red} \rightarrow 2\ glutamate + Fd_{ox}$$

ويمكن تمثيل الأمونيوم من خلال طريق بديل: يستطيع الأنزيم **Glutamate dehydrogenase (GDH)** أن يتوسط التفاعل العكوس الذي يتم فيه تصنيع أو نزع مجموعة الأمين من الغلوتامات وفق التفاعل الآتي:

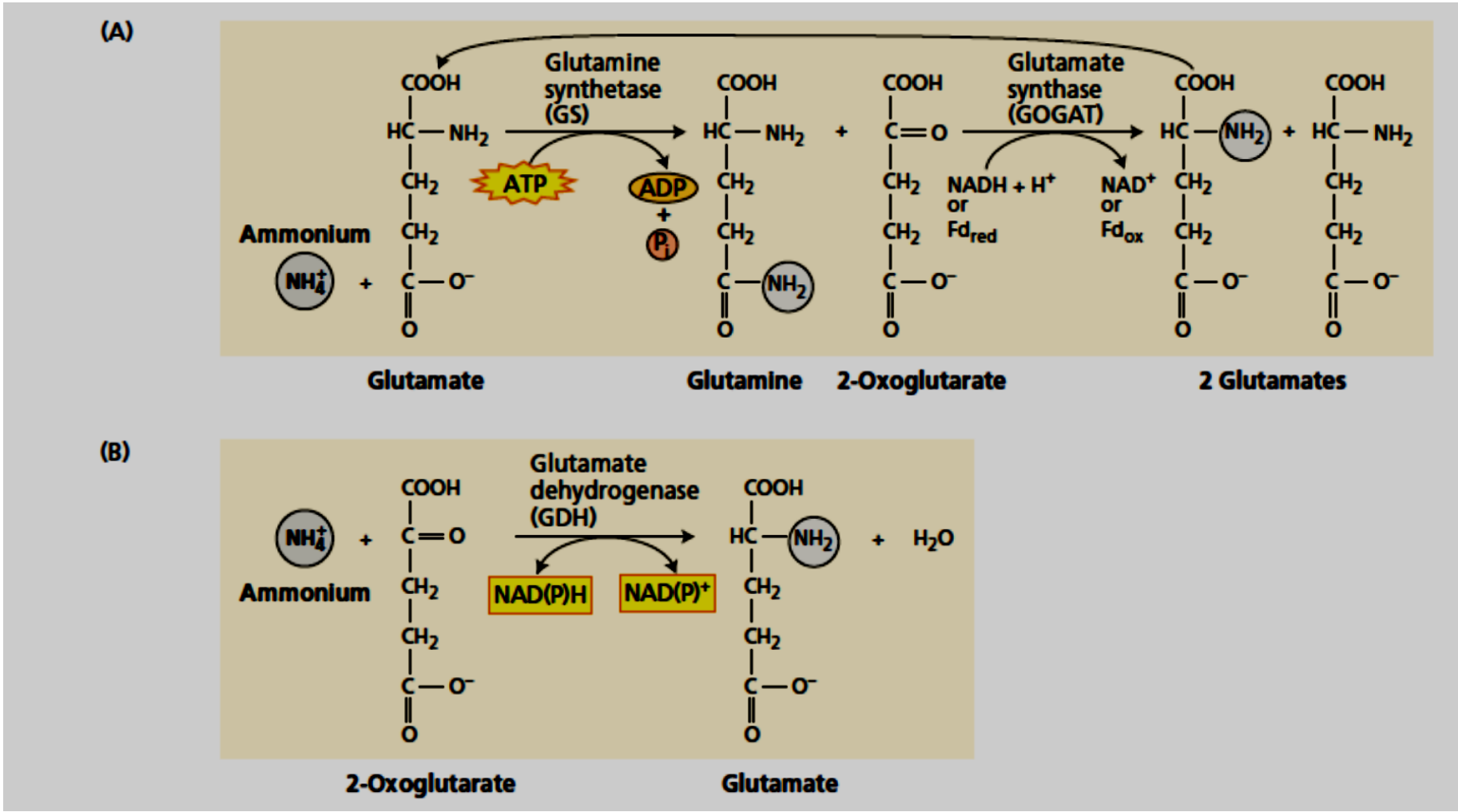
$$\text{2-Oxoglutarate} + NH_4^+ + NAD(P)H \leftrightarrow \text{glutamate} + H_2O + NAD(P)^+$$

ويتوسط الأنزيم **Aspartate aminotransferase** التفاعل الآتي:

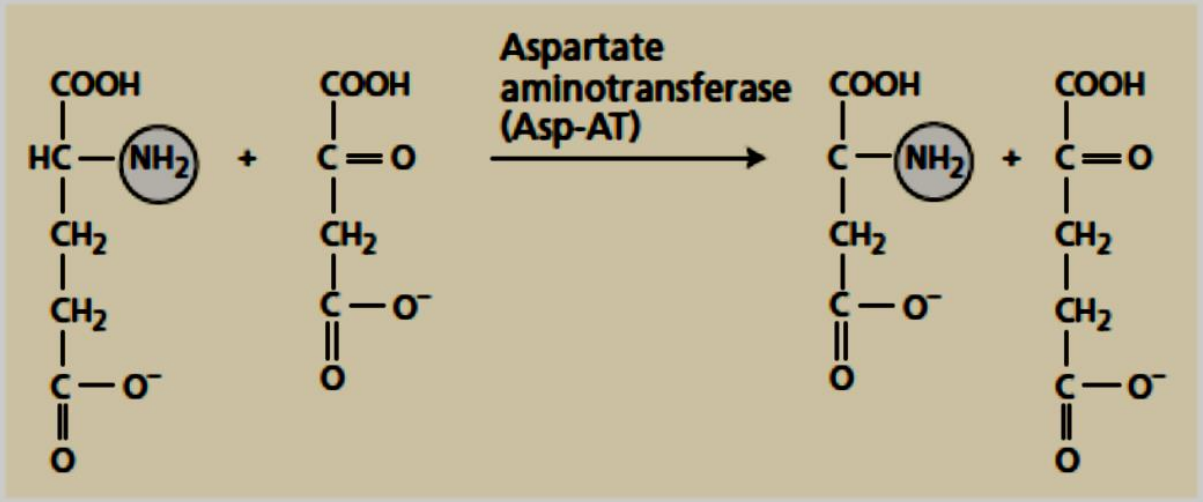
$$\text{Glutamate} + \text{oxaloacetate} \rightarrow \text{aspartate} + \text{2-oxoglutarate}$$

$$\text{Glutamine} + \text{aspartate} + \text{ATP} \rightarrow \text{asparagine} + \text{glutamate} + \text{AMP} + \text{Ppi}$$

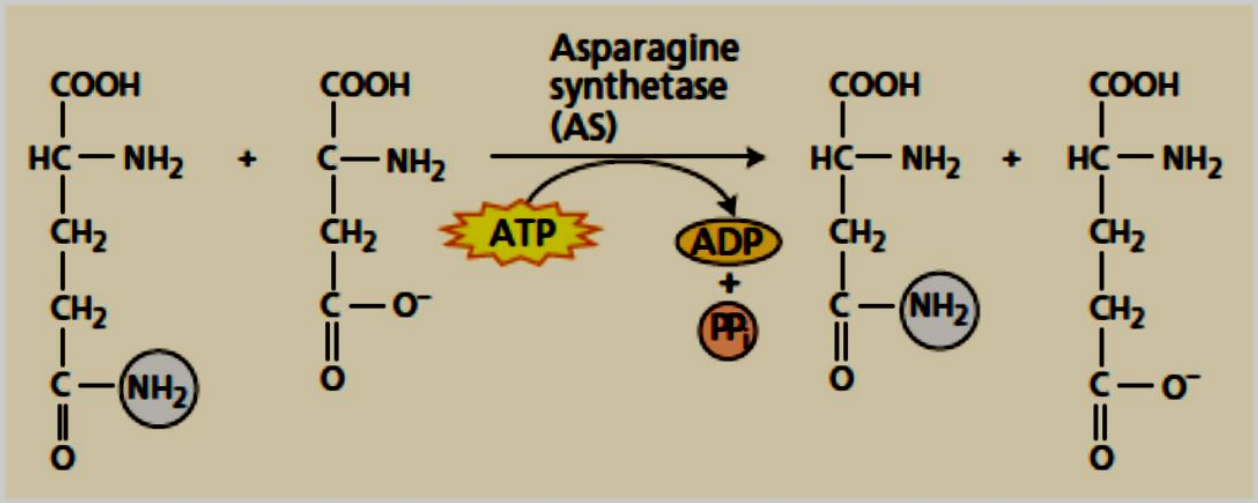
وإنّ الأنزيم الذي يتوسط هذا التفاعل يُسمى **Asparagine synthetase (AS)** يوجد في السيتوبلاسم في الأوراق والجذور، وفي العقد البكتيرية المثبتة للآزوت الجوي **Nitrogen-fixing nodules.**


(A)
Glutamine synthetase (GS)
ATP
ADP
+
P_i
Ammonium
NH_4^+
+
Glutamate synthase (GOGAT)
NADH + H^+
or
Fd_{red}
NAD^+
or
Fd_{ox}
+
Glutamate
Glutamine
2-Oxoglutarate
2 Glutamates
(B)
Glutamate dehydrogenase (GDH)
NH_4^+
Ammonium
+
NAD(P)H
$NAD(P)^+$
+ H_2O
2-Oxoglutarate
Glutamate

(C)


Aspartate aminotransferase (Asp-AT)
Glutamate
Oxaloacetate
Aspartate
2-Oxoglutarate

(D)


Asparagine synthetase (AS)
ATP
ADP
PPi
Glutamine
Aspartate
Asparagine
Glutamate

تثبيت الآزوت الجوي Biological Nitrogen Fixation

تُشكّل الجذور مصدراً مهماً للكربون والطاقة للعديد من أحياء التربة الدقيقة، التي قد يكون بعضها ممرضاً للنبات، في حين يدخل بعضها الآخر في علاقةٍ تبادلية تكافلية (تعايشية) Symbiotic relation مفيدة لكلا الطرفين تؤدي إلى تحسين النمو في كلٍ منهما.

يتم تثبيت الآزوت الجوي في تراكيب أو خلايا متخصصة تُدعى Nodules (العقد البكتيرية) (وهي عبارة عن خلايا من النبات العائل تنغلق على البكتيريا المثبتة للآزوت الجوي).

بالنسبة للعلاقة التعايشية في البقوليات وفي الأنواع النباتية Actinorhizal، فإنّ البكتيريا المثبتة للآزوت تقوم بتحريض تشكيل هذه العقد على الجذور. وتقوم هذه الأنواع النباتية بتنظيم التبادل الغازي في العقد الجذرية بحيث تُحافظ على مستوى من الأوكسيجين كافٍ لاستمرار عملية التنفس في خلايا العقد، ولكن يكون في الوقت نفسه منخفضاً بحيث لا يؤدي إلى تثبيط عمل أنزيم النيتروجيناز في البكتيريا.

عموماً، فإنّ عدد العقد البكتيرية على جذور النبات يحددها العلاقة بين بكتيريا الريزوبيا والنبات العائل، ومدى التنافس بين العقد على نواتج التمثيل الضوئي، ومدى انتشار وتوزيع هرمونات النبات.

ويوجد عدة أشكال للعقد كالشكل الكروي أو البيضوي أو المستطيل أو المفصص. ويتم تكوين العقدة فى مدّة لاتقل عن 15 يوماً من بدء الإصابة، ثمّ يتم ارجاع الآزوت الجوي حيوياً ضمن البكتيريا ليتشكل الأمونيا وفقاً للمعادلة الآتية:

$$N_2 + 8\ e + 8\ H^+ + 16\ ATP \rightarrow 2\ NH_3 + H_2 + 16\ ADP + 16\ Pi$$

يتوسط التفاعل معقد أنزيم النيتروجيناز **Nitrogenase enzyme complex**، ويتطلب هذا التفاعل كمية كبيرة من الطاقة لكسر الرابطة الثلاثية القوية لجزيء الآزوت، وبالرغم من أنّ كمية الطاقة الحرة اللازمة غير معروفة بالتحديد، إلاّ أنّه بالاعتماد على استقلاب الكربون، فقد أشارت الحسابات إلى أنّ النبات يصرف حوالي 12 غ من الكربون العضوي لكل غ من الآزوت المثبت **Fixed nitrogen**.

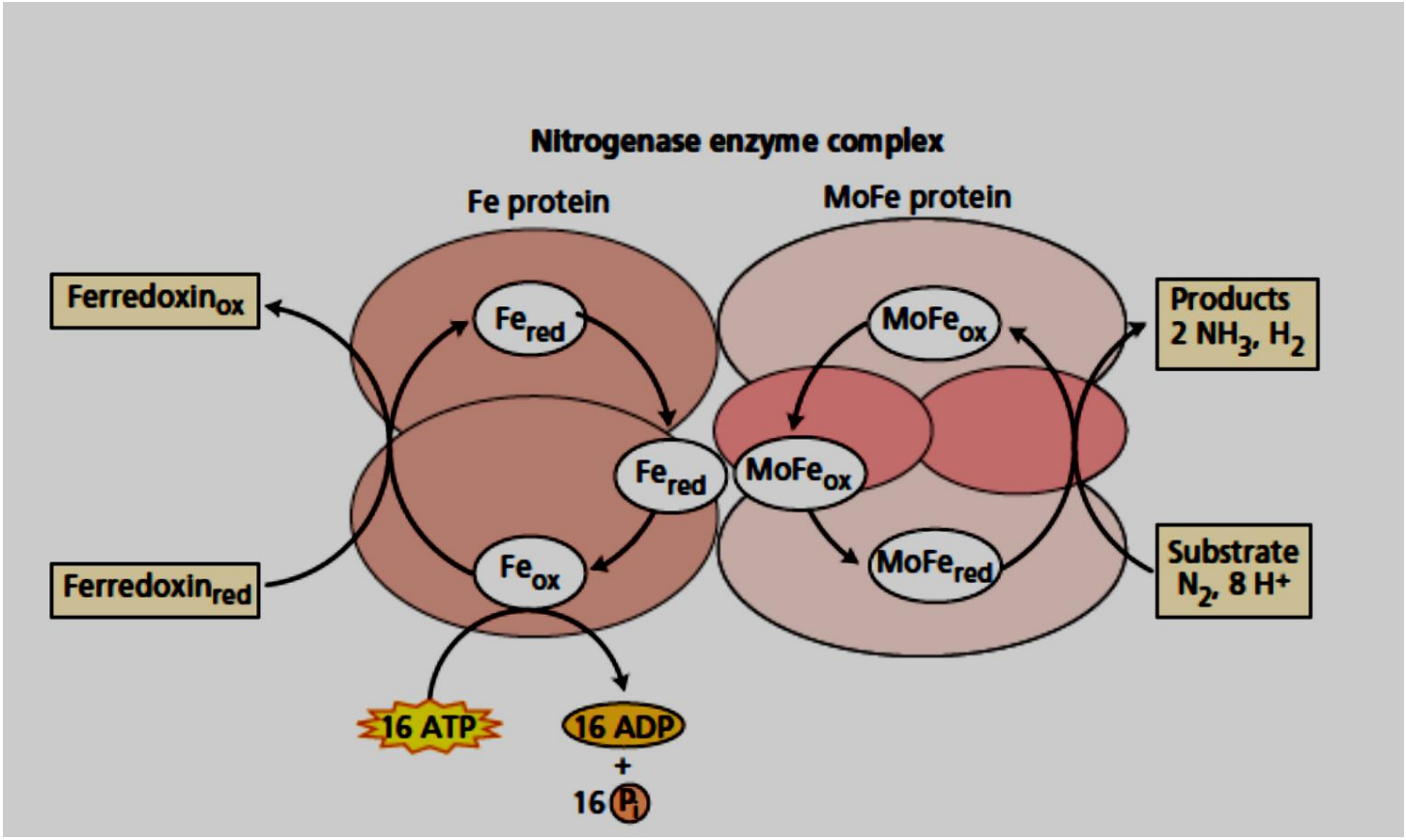
يُعد تنظيم تركيز الأوكسيجين داخل العقد الجذرية من الأمور المهمة جداً، لأنّ عمل أنزيم النيتروجيناز يتثبط بشكلٍ غير عكسي بوجود الأوكسجين، ويقوم البروتين حامل الأوكسيجين **Leghemoglobin** الذي يتم انتاجه في النبات البقولي داخل العقد الجذرية بهذه المهمة، بحيث يحافظ على تركيز منخفض للأوكسيجين داخل العقد الجذرية دون المستوى الذي يمكن أن يؤثر في عمل الأنزيم نيتروجيناز، ولكن يؤمن في الوقت نفسه الأوكسيجين اللازم لتنفس خلايا العقد الجذرية.

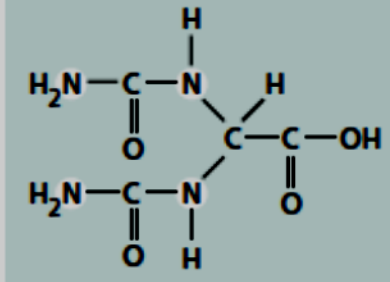
تتشكل الأمونيا نتيجة ارجاع الآزوت الجوي ضمن العقد الجذرية، ولكن بسبب سمية الأمونيا، فلا بدّ من تحويلها بشكلٍ سريع إلى مركبات عضوية في العقد الجذرية قبل أن يتم نقلها عبر الأوعية الخشبية إلى المجموع الخضري للنبات. وتقسم الأنواع النباتية البقولية تبعاً لنوع هذه المركبات إلى:

مصدرات الأميدات Amide exporters،

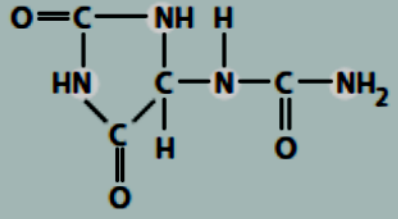
ومصدرات اليوريدات Ureide exporters.

ويعتبر الأسبارجين Aspargine والغلوتامين Glutamine من أهم الأميدات المصنّعة والمنتقلة عبر النسيج الخشبي في الأنواع البقولية المنتشرة في المناطق المعتدلة كالبازلاء، والفول، والعدس، والبرسيم وغيرها. أما البقوليات ذات المنشأ الاستوائي كفول الصويا، والفول السوداني، والفاصولياء فتعتبر اليوريدات كالسيترولين Citrollin، وAllantoin، وAllantoic acid المصادر الأساسية للمركبات العضوية الآزوتية في هذه الأنواع.

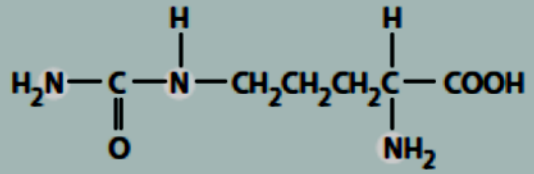




Allantoic acid

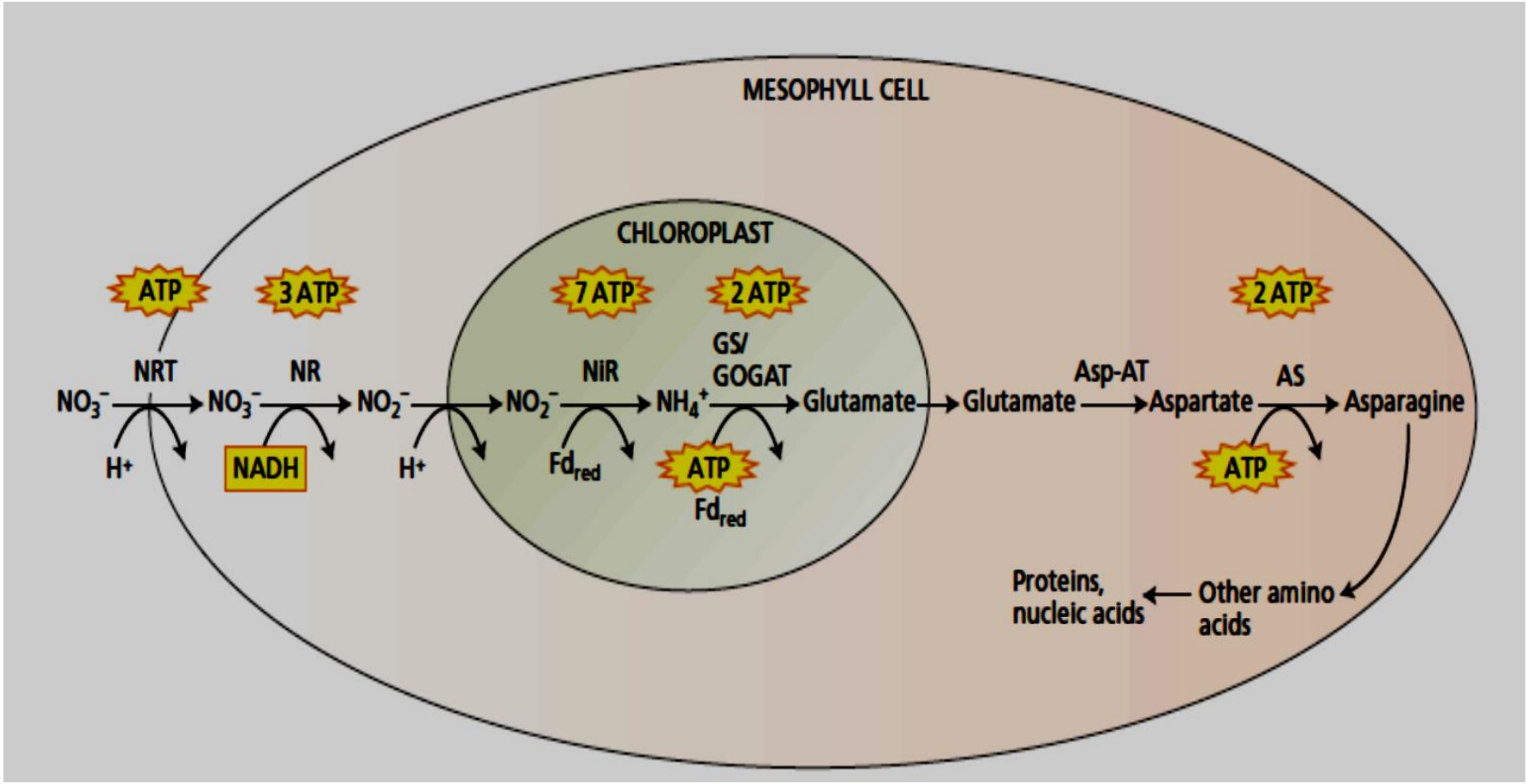


Allantoin



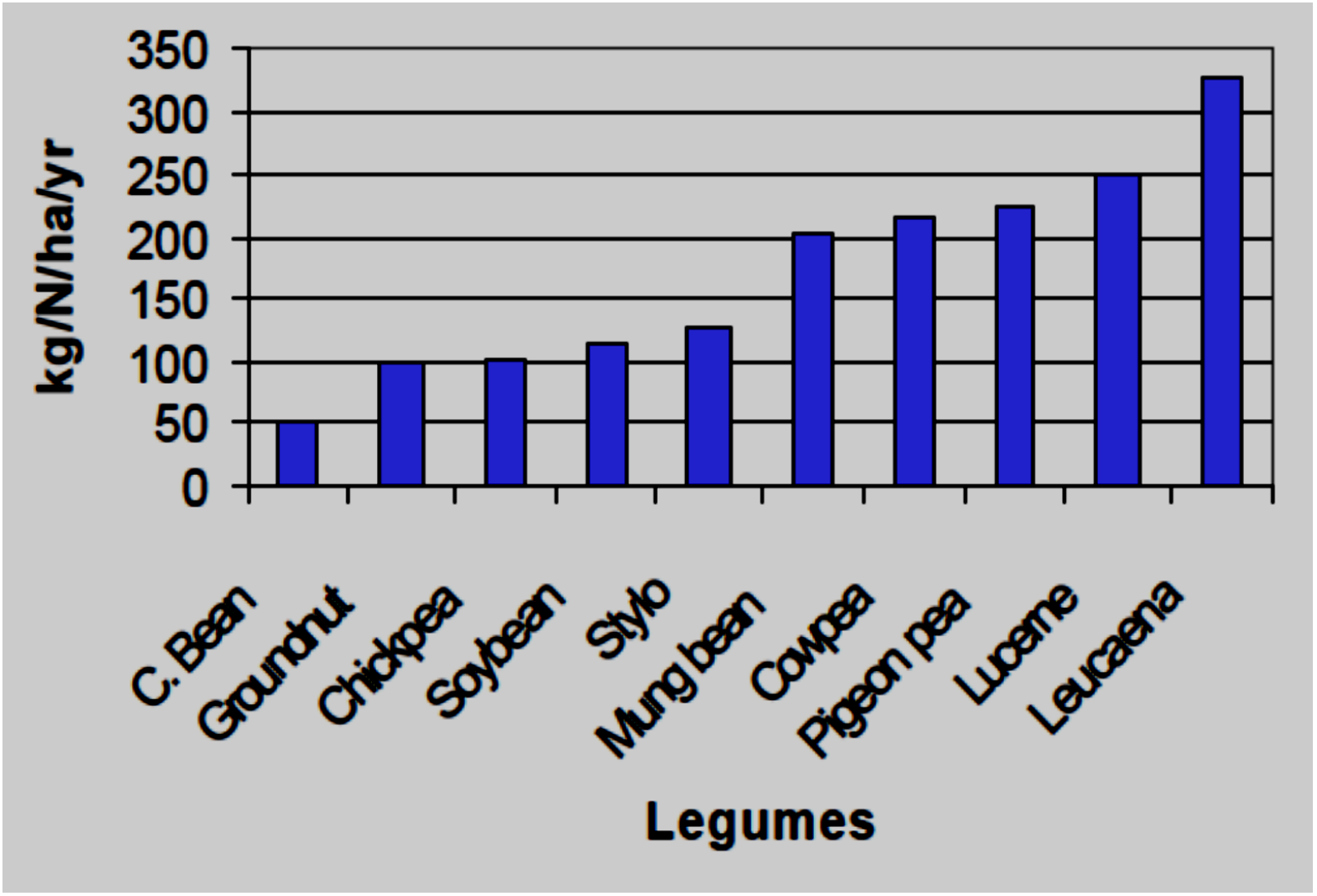
Citrulline

THE ENERGETICS OF NUTRIENT ASSIMILATION



تؤدي عملية التثبيت الحيوي للآزوت الجوي عند البقوليات دوراً مهماً في المحافظة على استدامة الإنتاج، وتحسين خصوبة التربة، وتختلف كمية الآزوت المثبتة حيوياً بشكلٍ كبير باختلاف العوامل المؤثرة فيها، كنوع العائل البقولي وكفاءة بكتيريا الرايزوبيوم، وخصائص التربة الفيزيائية والكيميائية والحيوية والظروف البيئية المحيطة. ومع تزايد الاهتمام بتطبيق الممارسات الهادفة إلى استدامة نظم الإنتاج الزراعي، يُعد التوسع بزراعة المحاصيل البقولية وزيادة انتاجيتها من أولى الخطوات الواجب تطبيقها، وترتبط إنتاجية هذه المحاصيل بشكلٍ كبير بكفاءة عملية التثبيت التكافلي للآزوت الجوي.

تُعد عملية التلقيح البكتيري **Inoculation** بالسلالة البكتيرية الملائمة أو بمجموعة من السلالات البكتيرية، من الممارسات المهمة التي من شأنها أن تزيد من عدد العقد الجذرية وكمية الآزوت المثبتة، ومن ثمّ نمو المحصول البقولي وإنتاجيته وكمية الآزوت المتبقية في التربة التي تزيد من خصوبتها، وتُقلل من كميات الأسمدة الآزوتية المضافة للمحصول اللاحق، ما يُسهم في تقليل تكاليف الإنتاج الزراعي، وزيادة دخل المزارع وتحسين مستوى معيشته.

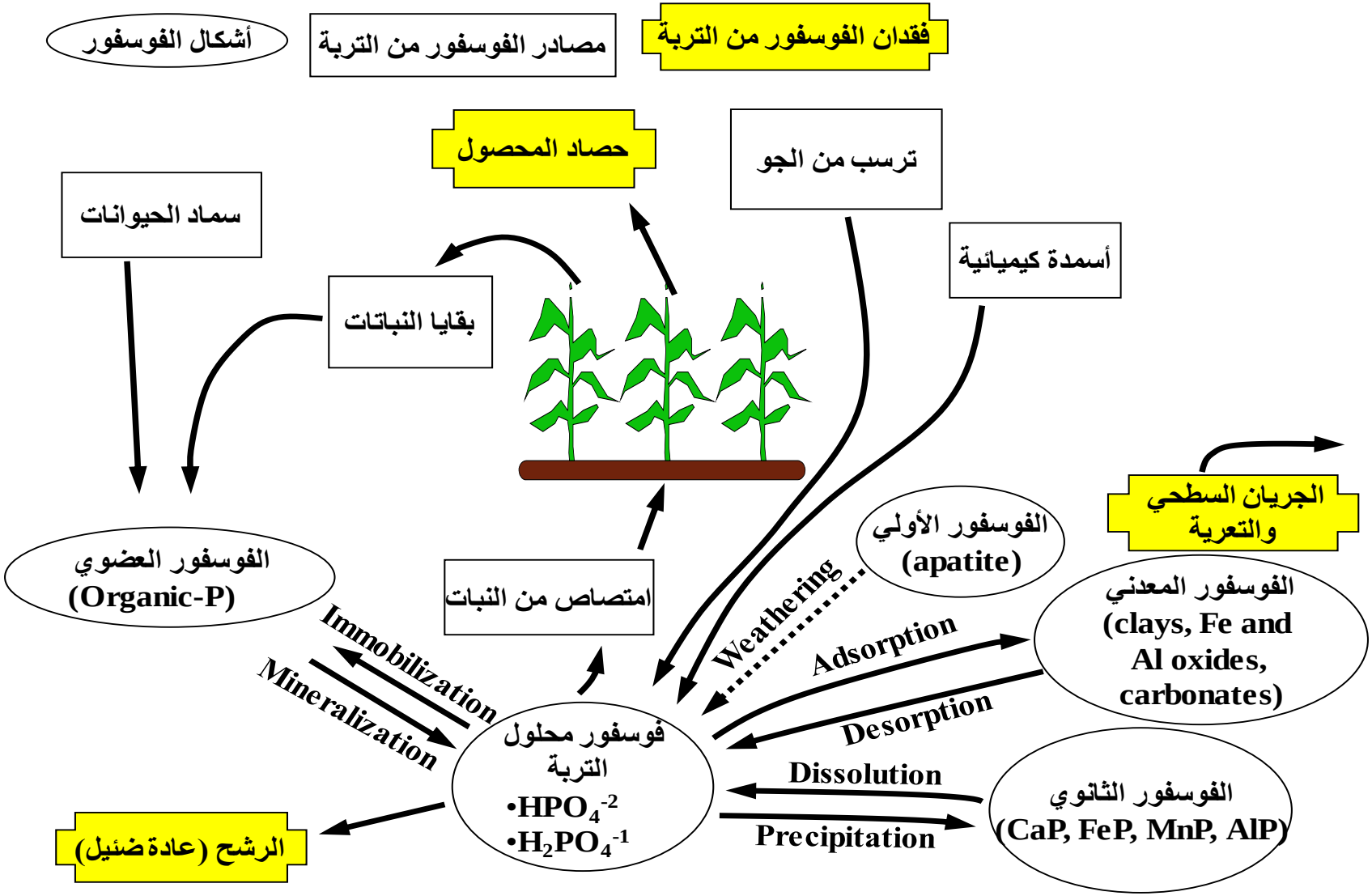

kg/N/ha/yr
350
300
250
200
150
100
50
0
C. Bean
Groundnut
Chickpea
Soybean
Stylo
Mung bean
Cowpea
Pigeon pea
Lucerne
Leucaena
Legumes

تمثيل الفوسفات Phosphate assimilation: يتم نقل جزء من الفوسفات الممتص من الجذور إلى الأوراق ويبقى جزء في الجذور، والجزء المتبقي في الجذور يتم تمثيله بعملية الفسفرة التأكسدية Oxidative phosphorylation باستعمال الطاقة المحررة خلال عملية التنفس.

$$ADP + Pi \longrightarrow ATP$$

الفوسفات المنقولة إلى الأوراق يتم تمثيلها بوساطة عملية الفسفرة الضوئية Photosynthetic phosphorylation في الصّانعات الخضراء باستعمال الطاقة الناتجة عن تفاعلات الضوء. والفوسفات التي تمّ تمثيلها إلى طاقة ATP يتم نقلها بسرعة بالعمليات الاستقلابية التالية إلى مركبات نباتية مفسفرة مختلفة مثل السكريات، والفوسفات، والفوسفوليبيدات والنيكليوتيدات..الخ.

دورة الفوسفور Phosphorus cycle: يُعد الفوسفور المكون الأساسي للأحماض النووية ومركبات الطاقة (ADP-، ATP، NADP)، والفوسفوليبيدات..إلخ. يوجد الفوسفور في التربة على شكل فوسفات صخري، الـApatite، فوسفات الكالسيوم، $\{Ca_{10}Fe_2(PO_4)_6\}$ Fluor Apatite، فوسفات الحديد وفوسفات الألمنيوم، وتُعتبر التربة ذات المنشأ من الفوسفات الصخري غنية بعنصر الفوسفور، ويوجد في التربة بشكلين أساسين هما الفوسفور العضوي Organic-P، والفوسفور المعدني Inorganic-P، ولكن يمتص النبات الفوسفور من التربة بشكله المعدني المنحل في محلول التربة. يتحول الفوسفور الممتص من قبل النبات بداخله إلى الشكل العضوي، وينتقل من النبات إلى مختلف المستويات الغذائية في النظام البيئي بشكل فوسفات عضوي، وبعد موت النباتات والحيوانات تقوم المفككات بمهاجمتها وتحرر الفوسفور إلى البيئة، وتستمر هذه العملية بطريقة دورية تُعرف بدورة الفوسفور (الشكل).



دورة الفوسفور في الطبيعة.

دور الميكوريزا في توفير الفوسفور في التربة: تُعد فطريات الميكوريزا من الأحياء التي تُساعد على انحلال عنصر الفوسفور في التربة وزيادة توافره للنبات عن طريق نموها على جذور النبات، ما يزيد من مساحة الجذور وإفراز بعض الأحماض العضوية التي تساعد في تحطيم الرابطة بين الفوسفور وغرويات التربة فيصبح الفوسفور بشكلٍ منحل قابلاً للامتصاص من قبل جذور النباتات بعلاقة تسمى العلاقة التكافلية **Symbiotic relation** بين الميكوريزا وجذور النباتات.

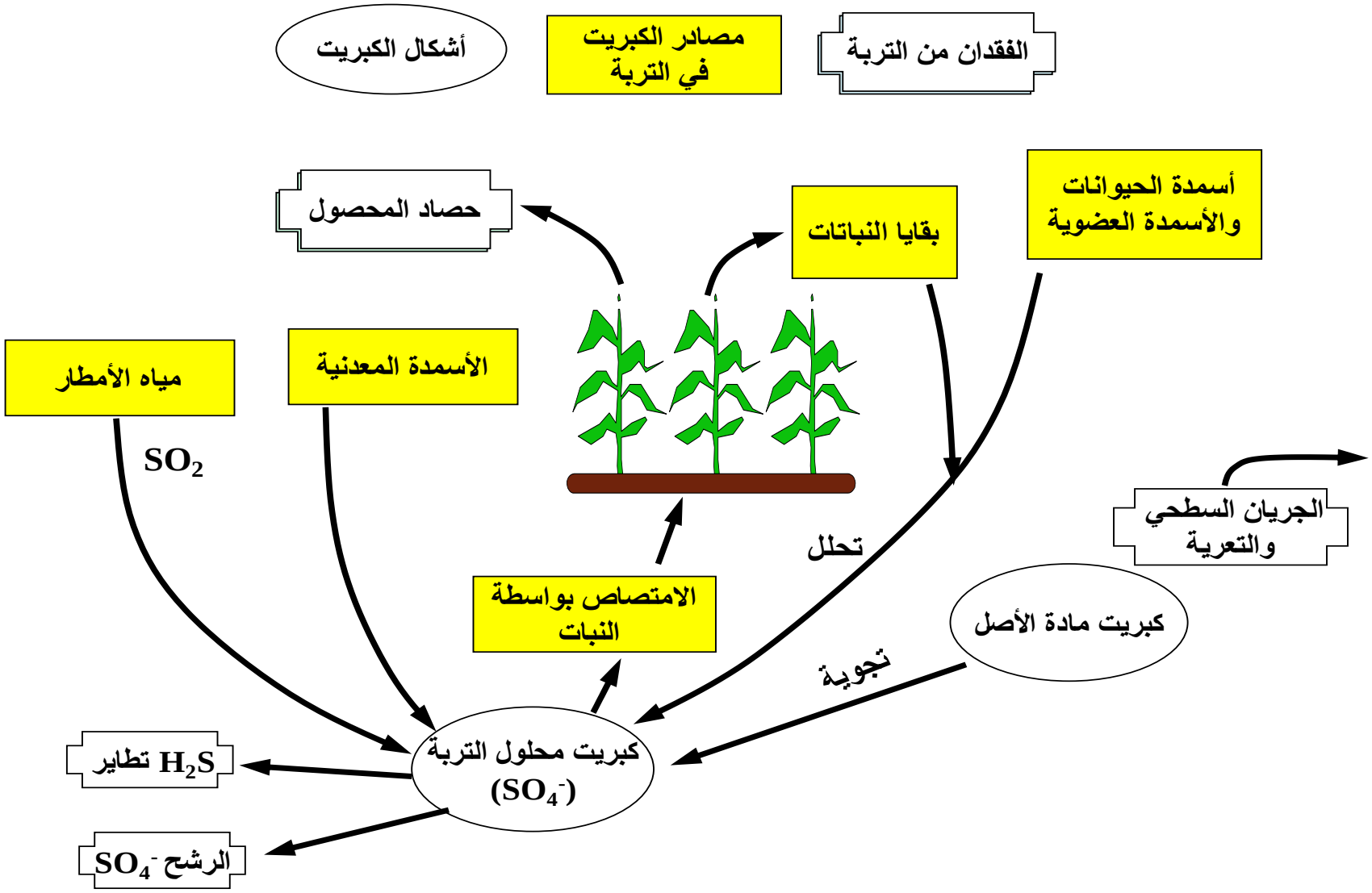
تمثيل الكبريت Assimilation of sulphate: يتم تمثيل الكبريتات في الصّانعات الخضراء باستعمال الطاقة المحررة خلال تفاعلات الضوء.

Sulphate ⟶ sulphite ⟶ sulphide ⟶ cysteine

تتفاعل أيونات الكبريتات (SO^{-}_{4}) مع الـATP ويتم تنشيطها، ثمّ يتم إرجاع الكبريتات إلى كبريتيت (SO^{-}_{2})، ومن ثمّ بمساعدة الفيرودوكسين، يُرجع الكبريتيت إلى كبريتيد (SH)، حيث يتم اندماجها مع الحمض العضوي لتشكيل الحمض الأميني السيستين.

دورة الكبريت في الطبيعة Sulphur cycle: يوجد الكبريت في التربة الزراعية في الصورة المعدنية والصورة العضوية، حيث يصل الكبريت إلى التربة، إما في صورة مخلفات زراعية أو أسمدة معدنية أو مع مياه الأمطار أو مع المكونات المعدنية للتربة والناتجة من عمليات التجوية للصخور الغنية بالكبريت. يوجد في تركيب بعض المعادن الأرضية ومنها البيريت (Pyrite FeS_2)، لاسيما في الأراضي الغدقة، في حين يوجد في تركيب الجبس أو كبريتات الكالسيوم ($CaSO_4$) في المناطق الجافة. يُعد الكبريت العضوي الصورة الأكثر وجوداً في الطبقة السطحية من الأرض الزراعية، حيث تُعد المادة العضوية مصدراً رئيساً للكبريت في الأرض الزراعية ولاسيما في المناطق الرطبة. ويوجد الكبريت في تركيب الأحماض الأمينية مثل السيستين والمثيونين، وتتحلل هذه المكونات بفعل الكائنات الحية الدقيقة وينطلق منها الكبريت المعدني في عملية تُعرف بعملية المعدنة Mineralization للكبريت.

يمكن أن يُضاف الكبريت للتربة مع مياه الأمطار والأنهار، نتيجة لاحتراق المركبات الكبريتية كالفحم والمواد البترولية، حيث تنطلق بعض الأكاسيد الكبريتية مثل أكسيد الكبريت (SO_2) إلى الهواء الجوي. يُعد الكبريت العضوي صورة غير ميسرة للنبات؛ وبتحلل المادة العضوية وحدوث عملية المعدنة للكبريت يتحول إلى كبريتيد الهيدروجين (H_2S) ثم إلى كبريتات ($SO4^{-2}$). ويبين الشكل دورة الكبريت في الطبيعة.



دورة الكبريت في الطبيعة.

ويؤدى غمر الأرض بالماء إلى نشوء ظروف لاهوائية، وبالتالي تسود ظروف الاختزال، ويتم اختزال الكبريتات بوساطة بكتريا من جنس Desulfovibrio إلى كبريتيد الهيدروجين (H_2S)، ويتحد جزء منه مع الحديد ويتكون كبريتيد الحديد، والجزء الآخر يمكن أن يحدث له فقد إلى الغلاف الجوي. تحت الظروف الهوائية يتكون أنيون الكبريتات SO_4^{2-}، وهذا الأنيون متحرك في التربة لزيادة قابلية ذوبان أملاحه في التربة، ومن المتوقع حدوث فقد للكبريت من التربة على هذه الصورة عن طريق رشح هذا الأنيون مع مياه الصرف. وتُعد الكبريتات الصورة التي يمتصها النبات، وبُعد امتصاص النبات للكبريتات يحدث اختزال لها وتدخل في تكوين المركبات العضوية.