الجوى تظل ثابتة لانطلاق الغاز بصورة دائمة، نتيجة تنفس الكائنات الحية، نباتية كانت أم حيوانية، وكذلك نتيجة احتراق المواد العضوية. وتعتبر الكائنات الدقيقة التى تعيش فى التربة هى المنتج الأساسى لغاز $CO_2$.

هذا .. وتستفيد النباتات من زيادة نسبة $CO_2$ صناعيًّا فى جو الصوبات (البيوت الزجاجية والبلاستيكية) إلى أن يصبح عاملاً آخر محددًا للنمو؛ مثل شدة الإضاءة، أو درجة الحرارة.

## الأيدروجين

يحصل النبات على حاجته من الأيدروجين من ماء الرى. أما الأكسجين الموجود فى الماء، فإنه ينطلق إلى الجو أثناء عملية البناء الضوئى.

## الأكسجين

كما سبق الذكر .. فإن النبات يحصل على حاجته من الكربون والأكسجين من غاز ثانى أكسيد الكربون. وقد أوضحت الدراسات التى استخدم فيها الماء المحتوى على النظير $^{18}CO_2$ – وهو ليس بنظير مشع — أن كل الأكسجين المنتج أثناء عملية البناء الضوئى يأتى من الماء، وأن الأكسجين الذى يدخل فى بناء المواد العضوية يحصل عليه النبات من غاز $CO_2$ الجوى.

هذا .. وتحصل الجذور على حاجتها من الأكسجين اللازم للتنفس عن طريق العديسات lenticels التى توجد فيها.

# النيتروجين

## أهمية النيتروجين للنبات

يدخل النيتروجين فى تركيب البروتين الذى يعتبر المركب الأساسى فى البروتوبلازم، كما يدخل فى تركيب الإنزيمات، وكلوروفيل أ، ب، وبعض الأحماض فى النواة، وبعض الهرمونات. ومن أهم المركبات التى يدخل النيتروجين فى تركيبها:

البيورين purines، والبريمدين Pyrimidines، وهما من المركبات الأساسية فى الأحماض النووية DNA و RNA، كما يدخل فى تركيب البورفرين Porphyrin الذى يوجد فى الكلوروفيل، وفى إنزيمات السيتوكروم، وهما ضروريان للبناء الضوئى والتنفس على التوالى. كما يدخل النيتروجين أيضًا فى تركيب مرافقات الإنزيمات الضرورية لعديد من الإنزيمات.

ويعمل النيتروجين الوفير على تشجيع النمو النشط، وهى صفة مرغوبة فى الخضر الورقية.

## أعراض نقص النيتروجين

تختلف أعراض نقص النيتروجين فى نباتات الفلقة الواحدة عنها فى نباتات الفلقتين؛ حيث يتميز نقص النيتروجين فى ذوات الفلقة الواحدة باصفرار وسط نصل الورقة، مع بقاء الحواف خضراء، أما فى النباتات ذات الفلقتين، فإن الورقة تصبح متجانسة بلون أخضر مصفر. وتظهر الأعراض فى كليهما على الأوراق السفلى أولاً، فتصبح الأوراق خضراء باهتة، ثم يتحول لونها إلى الأصفر.

ويكون نمو النبات — الذى يعانى نقص النيتروجين — بطيئًا ومتقزمًا، كما يكون حجم الأعضاء النباتية الأخرى أقل من الحجم الطبيعى؛ ويصبح النبات متخشبًا (Lorenz & Maynard ١٩٨٠).

ولا تظهر أعراض نقص النيتروجين على الأوراق الحديثة إلا بعد فترة من ظهور أعراض نقص العنصر على الورقة المسنة؛ لأن النيتروجين على درجة عالية من القدرة على الحركة بالنبات. فالأوراق الصغيرة تحتفظ بالنيتروجين الذى يصل إليها، بالإضافة إلى أن جزءًا من النيتروجين ينتقل إليها من الأوراق المسنة. وفى حالات النقص الشديد تجف الأوراق السفلى وتسقط، وتأخذ الأوراق العليا لونًا أصفر شاحبًا.

وقد يصاحب نقص النيتروجين فى بعض النباتات إنتاج النبات لصبغات أخرى غير الكلوروفيل، ففى الطماطم مثلاً يصاحب نقص النيتروجين ظهور لون بنفسجى فى أعناق الأوراق وبالعروق؛ نتيجة تكون صبغة الأنثوسيانين. ويظهر هذا اللون أحيانًا كذلك على سيقان بعض النباتات عند نقص النيتروجين (Devlin ١٩٧٥).

ويكون ظهور أعراض نقص النيتروجين مؤكدًا إذا انخفض محتوى الأوراق الكلى من الآزوت عن ١,٥٪ على أساس الوزن الجاف.

أما التركيز الطبيعى للنيتروجين فيتراوح بين ٢٪ – ٣٪ حتى ٤٪ – ٥٪ على أساس الوزن الجاف، حسب النوع النباتى، ويكون التركيز العالى — فى النوع النباتى الواحد — خلال المراحل المبكرة من النمو، ثم ينخفض التركيز بشدة.

## أعراض زيادة النيتروجين

عند زيادة النيتروجين عن الحد المناسب، يصبح لون الأوراق أخضر داكنًا، ويزداد محتواها من الكلوروفيل، وتتبع ذلك زيادة فى معدل البناء الضوئى، لكن نتيجة لتوفر الآزوت، فإن الغذاء المجهز يستعمل فى بناء أنسجة جديدة، ومن ثم يكون النمو سريعًا فى الجذور والسيقان والأوراق، ويقل تخزين الغذاء وتكوين الألياف التى تدعم النبات، كذلك يقل الإزهار والإثمار؛ ومن ثم تكون السيقان رهيفة، وجدرها رقيقة، والمحصول قليلاً، سواء أكان ذلك محصول ثمار أم محصول بذور أم فى صورة أعضاء التخزين الخضرية.

ويصاحب زيادة النيتروجين تأخير النضج، نتيجة تشجيعه للنمو الزائد، ونقص صفات الجودة. كما قد تشجع زيادة النيتروجين عن الحد المناسب على زيادة الإصابة بالأمراض (Bukman & Brady ١٩٦٠).

وفى حالة زيادة الأسمدة النشادرية — وهى الأسمدة التى يوجد فيها النيتروجين فى صورة أمونيا ($NH_4^+$) — فإنه قد تظهر أعراض التسمم النباتى بالأمونيا. وتختلف الأنواع النباتية فى درجة تحملها لزيادة تركيز أيون الأمونيوم. وفى معظم النباتات

يؤدى التعرض للتركيزات العالية من الأمونيوم إلى حدوث اصفرار بالأوراق، وتَوَقُّف بالنمو، وظهور بقع متحللة فى الأوراق، وتحلل وتلون بالحزم الوعائية، كما لم تنبت بذور الخيار فى التركيزات العالية من الأمونيوم. ومن النباتات الحساسة الأخرى: الفاصوليا، والذرة السكرية، والبسلة.

هذا .. وتوجد الأمونيا الحرة طبيعيًّا فى الخلايا النباتية تحت الظروف العادية، ولكن مع زيادة كمية السماد الأمونيومى يتأثر أيض النبات؛ حيث يستنفذ النبات مخزون المواد الكربوهيدراتية ليحول أيونات الأمونيا الحرة إلى صور غير سامة على حساب التحولات الأخرى (Mills & Jones ١٩٧٩).

## الصور التى يُمتص عليها النيتروجين

تمتص النباتات النيتروجين فى صورتيه: النتراتية والأمونيومية، ويتوقف ذلك على درجة حموضة التربة؛ ففى الأراضى الحامضية يكون الامتصاص فى الصورة النتراتية أساسًا. وفى الأراضى المتعادلة والقلوية يكون الامتصاص فى الصورة الأمونيومية أساسًا. ويتساوى الامتصاص بين الصورتين فى pH أقل قليلاً من ٧.

وبرغم أن معظم النباتات تمتص النيتروجين فى صورة نترات، إلا أن النيتروجين الممتص على هذه الصورة لا يستعمل مباشرة، بل لابد من اختزاله داخل النباتات إلى أمونيا قبل أن يدخل فى تركيب أى مركب عضوى. ويتطلب ذلك طاقة يتحصل عليها النبات من التنفس. ومن المعتقد أن التحول يتم على النحو التالى:

$$NO_3 \longrightarrow NO_2 \longrightarrow HNO \longrightarrow NH_2OH \longrightarrow NH_4$$

nitrate nitrite hyponitrite hydroxylamine ammonia

وعليه .. فإن استفادة النبات من الأمونيوم الممتص تكون أسرع من استفادته من النترات لضرورة تحول النترات إلى أمونيا قبل ان تدخل فى بناء المواد البروتينية.

هذا .. وتؤدى زيادة التسميد النتراتى إلى تراكم النترات بالنبات، بينما تؤدى زيادة التسميد الأمونيومى إلى ظهور أعراض التسمم بهذا الكاتيون بعد زيادته عن الحد المناسب.

كما يمكن لعدد كبير من النباتات استخدام النيتروجين العضوى كمصدر للنيتروجين. وأهم المركبات العضوية النيتروجينية التى يمتصها النبات هى: الأحماض الأمينية، والأميدات، واليوريا.

ويوجد معظم النيتروجين فى التربة مثبتًا فى صورة بروتين. ويؤدى تحلل البروتين إلى انطلاق الأحماض الأمينية. وهذه قد تؤكسد وتعطى نيتروجينًا فى صورة أمونيوم، ثم تتأكسد هى الأخرى إلى نترات قبل أن يمتصها النبات، أو قد تقوم النباتات بامتصاص الأحماض الأمينية مباشرة، وتتعرض فى ذلك لمنافسة شديدة من جانب الكائنات الدقيقة التى تعيش فى التربة.

كما أن مد النبات باليوريا $NH_2 - \overset{\overset{O}{\|}}{C} - NH_2$ عن طريق رش الأوراق يعتبر طريقة فعالة لمعالجة نقص النيتروجين. وعند دخول اليوريا إلى النبات فإنها تتحلل مائيًّا بفعل الإنزيم يوريز إلى أمونيا وثانى أكسيد الكربون كما يلى:

$$NH_2 - \overset{\overset{O}{\|}}{C} - NH_2 \xrightarrow{\text{urease}} 2NH_3 + CO_2$$

ويعتقد البعض أن هذا التفاعل مشكوك فيه، وأن النبات يستعمل اليوريا مباشرة (Devlin ١٩٧٥).

## تيسر النيتروجين من المادة العضوية

### تحلل المادة العضوية فى التربة

لكى تستفيد النباتات من النيتروجين الموجود فى المادة العضوية، فإنه يجب أن يتحول أولاً إلى إحدى صورتيه النتراتية أو الأمونيومية، ويتم ذلك بفعل مجموعتين من الكائنات الدقيقة.

تتضمن المجموعة الأولى بعض الفطريات والبكتريا، وتسمى ammonifiers؛ لأنها تحدث ammonification للمادة العضوية؛ حيث يتحول النيتروجين العضوى إلى أحماض أمينية، ثم إلى أمونيا $NH_4^+$ وينطلق الأكسجين. وتتضمن المجموعة الثانية بعض أنواع البكتيريا فقط، وتسمى nitrifies، وتقوم بعملية النترتة nitrification؛ حيث تتحول الأمونيا إلى نيتريت $NO_2^-$، وينطلق الأكسجين، ثم إلى $NO_3^-$، وتتم هذه العمليات كما يلى:

$$NH_4^+ \xrightarrow[\text{نيتروزوموناس}]{\textit{Nitrosomonas}} NO_2^- \xrightarrow[\text{نيتروباكتر}]{\textit{Nitrobacter}} NO_3^-$$

أمونيا نيتريت نترات

وتحصل البكتيريا على الطاقة اللازمة لها من أكسدة الأمونيا أو النيتريت، ولا تعتمد على كائنات أخرى لإمدادها بالطاقة؛ أى إنها تعد من الكائنات الـ autotrophic.

وتوجد أعداد هائلة من هذه البكتيريا فى التربة؛ حيث يُقدر العلماء عددها بنحو ٤٦ بليون خلية بكتيرية فى كل جرام من المادة العضوية أثناء تحللها. أما تحت الظروف العادية، فإن التربة الخصبة تحتوى على حوالى ٢/$^{١}$— ١ طن من هذه البكتيريا/فدان، أو حوالى ٢٢٠ — ٢٥٠ بليون خلية بكتيرية لكل كيلوجرام من التربة. ويقدر العلماء أن كمية النيتروجين الميسر (النتراتى والأمونيومى) التى توفرها هذه البكتيريا تبلغ ٢٢,٥ — ١٣٥ كجم/فدان سنويًا (Edmond وآخرون ١٩٧٥).

## مثبطات النترتة

يمكن إبطاء عملية النترتة nitrification يخلط السماد الأمونيومى — وكذلك اليوريا — بمركبات مثبطة للنترتة nitrification inhibitors. ويعد النترابيرن nitrapyrin (كما يتوفر فى المركب التجارى N-serve) من أكثرها فاعلية، وتركيبه 2-chloro-6-(Trichloromethyl) pyridine، ويستخدم هذا المركب بتركيز ١٪

من النيتروجين المسمد به، أو ١٠ أجزاء فى المليون من التربة، ويزداد التركيز الفعال مع زيادة قلوية التربة، أو نسبة المادة العضوية فيها. لكن عملية تثبيط النترتة لا تتعدى ٢٥٪. ويتحلل النترابيرن فى التربة معطيًا 6-chloropicolinic acid وكلاهما قليل السمية للثدييات، ولكن ناتج التحلل أقل عدة مرات فى سميته من النترابيرن نفسه.

ويعتبر النترابيرن شديد الفاعلية ضد البكتيريا *Nitrosomonas* التى تعمل على أكسدة الأمونيا إلى نيتريت؛ حيث يثبط نشاطها بشدة عند استخدامه بتركيز ١٪ — ٢٪ من النيتروجين المضاف، بينما لا يؤثر النترابيرن على البكتيريا *Nitrobacter* والبكتيريا الأخرى والفطريات، حتى لو وصل تركيزه إلى ١٠٪ من السماد المضاف.

وتختلف الأنواع النباتية فى حساسيتها للنترابيرن. وتعتبر البقوليات أكثرها حساسية. ولم تتأثر الفاصوليا والذرة السكرية، والخيار، والبسلة، والقرع العسلى بالنترابيرن عندما أضيف إلى التربة بالتركيز الموصى به (Mills & Jones ١٩٧٩).

ومن مثبطات النترتة الأخرى المستعملة: ATC (وهو 4-amino-1,2,4-triazole)، و DCD (وهو dicyandiamide)، و $C_2H_2$ (الأسيتلين)، والـ $CS_2$ (وهو carbon disulphide). يُوجد المركبان الأخيران فى صورة غازية؛ وتوجد مشكلة فى الإبقاء على تركيزهما عالٍ فى حدود ١٪ (على أساس الحجم) من هواء التربة فى موقع حبيبات السماد المضاف. وقد عُولجت هذه المشكلة باستعمال $CaC_2$ محبب ومغلف؛ حيث يتحلل ببطء فى التربة لينطلق منه غاز الأسيتلين حسب التفاعل

$$CaC_2 + 2H_2O \longrightarrow C_2H_2 + Ca(OH)_2$$

(White ١٩٩٧).

هـذا .. ويوضـح Maynard & Lorenz (١٩٧٩) بعـض جوانـب عمليـة تثبـيط النترتة بشئ من التفصيل.

## تثبيت آزوت الهواء الجوى فـى التربـة بواسـطة الكائنـات التـى تعيش معيشة حرة

يشكل النيتروجين نحـو ٧٩٪ مـن الغـازات التـى توجـد بـالغلاف الجـوى. ويقـدر العلماء كميته فى الجو بحوالى ٣٦٣٤٨ طنًّا/ فدان من سطح الكرة الأرضية. ولكـى يمكـن للنبات استعماله، فإنـه يجـب أن يتحـول أولاً إلى الـصورة العـضوية، وهـى عمليـة تـتم باستمرار فـى التربـة تحـت كـل مـن الظـروف الهوائيـة واللاهوائيـة، ولكـن تقـوم بهـا مجموعتان مختلفتان من الكائنات الحية.

ففى الظروف الهوائية (التهوية الجيدة والصرف الجيـد) يـتم تثبيـت آزوت الهـواء الجوى فى التربة بواسطة بكتيريا تستخدم الطاقة اللازمـة لنـشاطها مـن المـواد العـضوية التى توجـد بالتربـة، وهـى: *Azotobacter chroococcum* و *A. agile*، وغيرهمـا من نفس جنس البكتيريا، وتثبت هذه البكتيريا نحو ١٨–٢٠ كجم من النـيتروجين بكـل فدان سنويًّا.

كما يُثبت آزوت الهواء الجـوى أيـضًا بواسـطة كـل مـن: الطحالـب الخـضراء المزرقـة blue-green algae، ومجموعة الفطريات الجذرية التى تسمى mycorrhiza.

وتكثر الطحالب الخضراء المزرقة فى الأماكن الدافئة الرطبة علـى سـطح التربـة، أو على سطح البرك والـبحيرات، وبـصفة خاصـة فـى حقـول الأرز. وتقـوم هـذه الطحالـب بتجهيـز الـسكريات بنفـسها، كمـا يـستخدم آزوت الهـواء الجـوى مباشـرة فـى بنـاء بروتوبلازم خلاياها.

أما فطريات الميكوريزا، فإنها تعيش معيشة وثيقة مع جذور بعض النباتـات؛ كالتفـاح، والكمثرى، والخوخ، والبرقوق، والبكان، والموالح، والكاكاو، والبصل، والفراولـة، والأزاليـا؛

حيث تحصل من جذور هذه النباتات على الطاقة والغذاء اللازمين لها. وهى لا تثبت آزوت الهواء الجوى مباشرة، ولكنها تساعد بطريقة غير معروفة على زيادة محتوى التربة من النيتروجين. وتقوم الميكوريزا أيضًا بجعل الفوسفور والكالسيوم والمغنيسيوم أكثر وفرة وتيسرًا لاستعمال النبات. وتعتبر المادة العضوية الناتجة بعد موت وتحلل هذه الفطريات بمثابة مادة مخلبية تعمل على توفير المنجنيز والحديد والنحاس للنباتات.

أما فى الظروف اللاهوائية، فإن آزوت الهواء الجوى يثبت فى التربة بواسطة نوع آخر من البكتيريا هو : *Clostridium pastorianum*.

**ومن أنواع البكتيريا – التى تعيش معيشة حرة فى التربة – وتقوم بتثبيت آزوت الهواء الجوى ما يلى (عن White ١٩٩٧):**

| المجموعة البكتيرية | | الأنواع |
|---|---|---|
| هوائية | Aerobes | *Azotobacter*, *Bejerinckia* spp. |
| هوائية قليلاً | Microaerobic | *Azospirillum brasilense* |
| | | *Thiobacillus ferrooxidans* |
| لا هوائية اختيارية | Facultative anaerobes | *Klebsiella* spp., *Bacillus* spp. |
| لا هوائية إجبارية | Obligate anaerobes | *Clostridium pasteuranium* |
| | | *Rhodospirillum* spp. |
| | | *Chlorobium* spp. |
| | | *Desulphovibrio* spp. |

ومن الطحالب الخضراء المزرقة التى تقوم بتثبيت آزوت الهواء الجوى – وجميعها هوائية وتقوم بعملية البناء الضوئى – كل من : *Nostoc*، و *Anabena* spp.، و*Gloecapsa spp*.

## العوامل المؤثرة فى نشاط الكائنات الدقيقة ذات العلاقة بتحولات النيتروجين فى التربة

يتأثر نشاط الكائنات الدقيقة التى تقوم بعمليات تحول النيتروجين فى التربة بعديد من العوامل، سواء أكان ذلك بالنسبة للكائنات التى تقوم بتثبيت آزوت الهواء الجوى، أم تلك التى تقوم بعملية النشدرة ammonification، أو بعملية النترتة nitrification. ومن هذه العوامل ما يلى:

١- درجة حرارة التربة:

يقل نشاط هذه الكائنات بشدة فى درجات الحرارة الشديدة الانخفاض والشديدة الارتفاع. ويتراوح المجال الحرارى المناسب لها بين ١٥°م و٣٠°م.

٢- نسبة الرطوبة فى التربة:

يزداد نشاط هذه الكائنات عند توفر الرطوبة، لأن الماء يساعد على تحلل المادة العضوية، كما أنه الوسط الذى تذوب فيه العناصر اللازمة لهذه الكائنات الدقيقة أثناء تكاثرها.

٣- الأكسجين:

يلزم الأكسجين لنشاط هذه الكائنات؛ ولذا كان الصرف الجيد أمرًا ضروريًّا. وعند رداءة الصرف تنشط بكتيريا *Pseudomonas denitrificans* التى تعيش فى غياب الأكسجين الحر، وتقوم بتحليل النيتروجين النتراتى إلى نيتروجين حر غازى؛ مما يؤدى إلى فقر التربة فى النيتروجين تدريجيًّا.

٤- pH التربة:

أفضل مجال pH لنمو هذه الكائنات يتراوح بين ٦ و٧، ويكون نشاطها قليلاً أو معدومًا فى الأراضى الشديدة الحموضة والشديدة القلوية.

٥- العناصر:

أكثر العناصر تأثيرًا على نشاط البكتيريا هى: الموليبدنم، والحديد، والكالسيوم، وتحتاج إليها بكتيريا تثبيت آزوت الهواء الجوى لزيادة نشاطها.

## تأثير pH التربة على تيسر النيتروجين فيها

يكثر النيتروجين فى الطبقات العليا، ويقل كلما تعمقنا فى التربة؛ ذلك لأن المادة العضوية تكثر فى الطبقات العليا من التربة. ويتوفر النيتروجين فى pH ٦ – ٨، ويقل نسبيًا فى pH ٥ – ٦، و٨ – ٩، ويصبح النقص شديدًا فى pH أقل من ٥، أو أعلى من ٩، ويكثر ظهور أعراض نقص النيتروجين فى الأراضى الفقيرة فى محتواها من المادة العضوية.

## فقد النيتروجين من التربة

يعتبر النيتروجين من أكثر العناصر الغذائية عرضة للفقد بالرشح من التربة، وخاصة فى المناطق التى تكثير فيها الأمطار. ويفقد النيتروجين فى صورة نترات بسرعة كبيرة لذوبانها فى الماء وفقدها فى ماء الصرف. أما النيتروجين الأمونيومى، فيدمص على سطح حبيبيات الطين، ويقاوم الفقد بالرشح، ولكن مع مرور الوقت يتحول النيتروجين فى التربة من الصورة الأمونيومية إلى الصورة النتراتية بفعل الكائنات الحية الدقيقة؛ ومن ثم يتعرض للفقد بالرشح، وتزداد سرعة هذا التحول مع ارتفاع درجة الحرارة، وتوفر الرطوبة الأرضية، والتهوية المناسبة.

ومن المعتقد أن النباتات تستفيد من نحو ٥٠٪ من السماد الآزوتى المضاف تحت معظم الظروف، وأن معظم الفقد يحدث بعد تحول الآزوت فى التربة من الصورة الأمونيومية إلى الصورة النتراتية.

وفى الظروف اللاهوائية تنشط بعض أنواع من البكتيريا مثل: *Pseudomonas*

*denitrificans*؛ حيث تقوم بتحويل النترات $NO_3^-$ إلى أكسيد نيتريت nitrous oxide وغاز نيتروجين؛ وبذا يُفْقَدُ النيتروجين من التربة، فيما يعرف بعملية نزع النيتروجين denitrification.

## ماء المطر كمصدر للنيتروجين

يعتبر المطر أحد مصادر النيتروجين فى التربة؛ حيث يؤدى البرق وما به من شحنات كهربائية إلى تكوين أكسيد النتروز nitrous oxide الذى يسقط مع ماء المطر إلى التربة. ويصل إلى التربة بهذه الطريقة نحو ٢ كجم نيتروجين أمونيومى، ونحو ٤/٣ كجم نيتروجينًا نتراتيًا/فدان سنويًّا. فإذا أخذنا الفقد بالرشح فى الحسبان، يكون المتوسط نحو ٤/١ ٢ كجم نيتروجين/ فدان سنويًّا. ويزيد المتوسط عن ذلك قليلاً فى المناطق الاستوائية ، ويقل قليلاً فى المناطق شبه الجافة (Buckman & Brady ١٩٦٠).

## تثبيت آزوت الهواء الجوى فى جذور البقوليات بواسطة بكتيريا العقد الجذرية

### أنواع بكتيريا الرايزوبيم وتخصصها على مختلف البقوليات

تعيش بكتيريا تثبيت آزوت الهواء الجوى فى العقد الجذرية للبقوليات، وهى تتبع الجنس ريزوبيم *Rhizobium* الذى يوجد منه نحو ١٨ نوعًا تتخصص على البقوليات المختلفة. وقد يتعايش أكثر من نوع من هذه البكتيريا مع محصول بقولى واحد، ونجد فى هذه الحالة اختلافًا فيما بينهم فى درجة كفاءة تثبيت آزوت الهواء الجوى.

وتقسم أنواع بكتيريا الجنس *Rhizobium* إلى عدة مجموعات تعرف باسم

cross inoculation groups، لا يمكن لأية مجموعة منها أن تصيب نباتات من غير مجموعتها؛ وهى كما يلى:

| المجموعة | المحاصيل التى تصيبها |
|---|---|
| البرسيم الحجازى | البرسيم الحجازى، والبرسيم الحلو الأصفر والأبيض |
| البرسيم | البرسيم الأحمر والأبيض والقرمزى |
| البسلة | البسلة، وبسلة الزهور، والفول الرومى |
| الفاصوليا | الفاصوليا |
| الترمس | الترمس |
| فول الصويا | فول الصويا |
| اللوبيا | اللوبيا، وفاصوليا الليما، والفول السودانى |

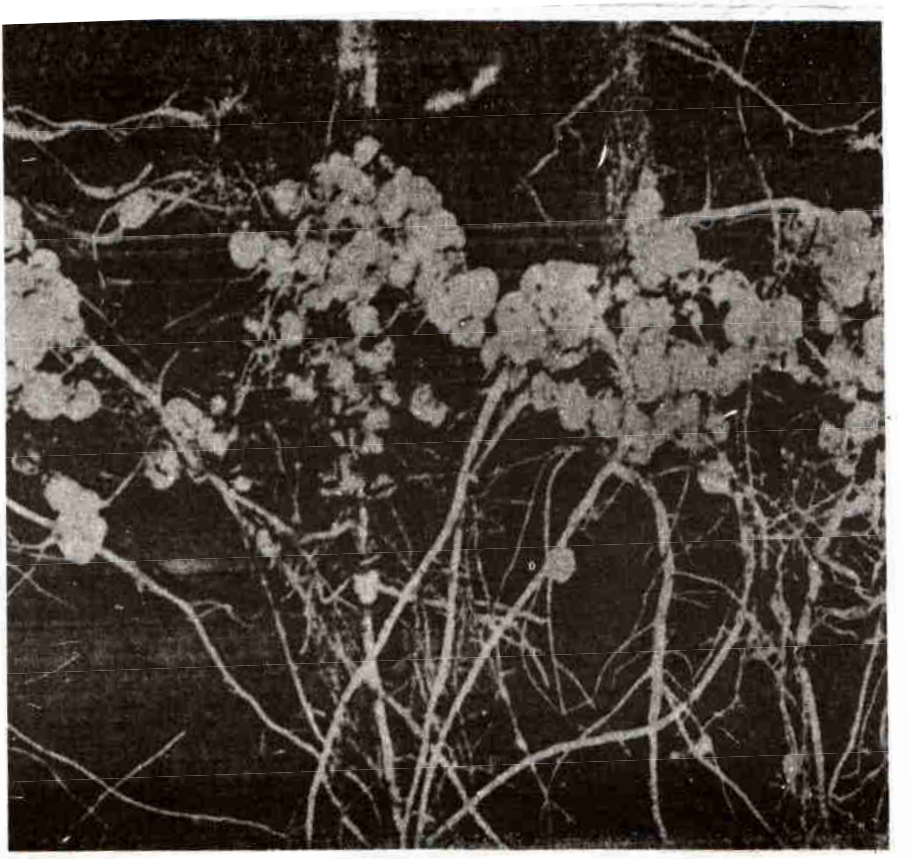
**وفيما يلى أنواع البكتيريا المتخصصة على محاصيل الخضر البقولية ( Tisdale & Nelson ١٩٧٥).**

| البكتيريا | البقوليات التى تتخصص عليها |
|---|---|
| *Rhizobium leguminosarum* | البسلة |
| *R. phaseoli* | الفاصوليا العادية |
| *R. japonicum* | فول الصويا |
| نوع لم يحدد اسمه | اللوبيا وفاصوليا الليما |

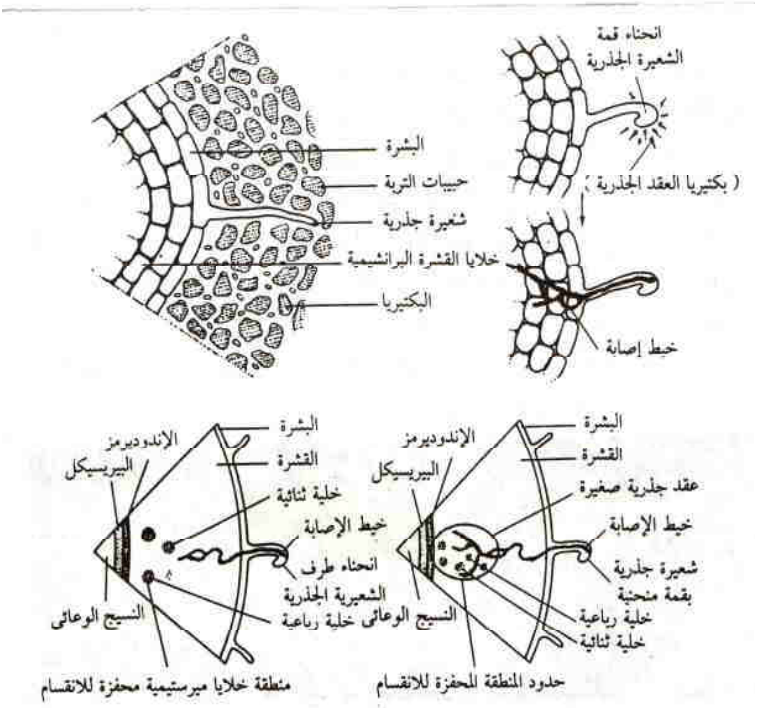
## العقد الجذرية

يختلف عدد العقد بالنبات الواحد من عدد قليل إلى ألف عقدة أو أكثر، كما تختلف فى توزيعها على المجموع الجذرى وفى حجمها حسب النوع النباتى (شكل ١–١). وتستطيع بكتيريا العقد الجذرية أن تعيش فى التربة فى غياب العائل مدة ١٠ — ٢٠ سنة،

ولكن زراعة العائل من آن لآخر تعمل على زيادة نشاطها. وتتراكم هذه البكتيريا قريبًا من جذور النباتات البقولية، وغالبًا ما يرجع ذلك إلى إفرازات خاصة من الجذور. هذا .. ويزداد تكون العقد تحت الظروف المناسبة للنمو الجيد للعائل. ويوضح شكل (١-٢) طريقة اختراق البكتيريا للشعيرات الجذرية بالبقوليات. ويلاحظ بالشكل أن الشعيرة الجذرية التى تخترقها البكتيريا تنحنى عند القمة، ويعقب ذلك تكون خيط إصابة infection thread، ثم تظهر العقدة فى النهاية.



شكل (١-١): العقد الجذرية المحتوية على بكتيريا تثبيت آزوت الهواء الجوى من جنس *Rhizobium* بجذور نبات فول الصويا ( عن Galston ١٩٦٤)




شكل(١-٢): طريقة اختراق بكتيريا الجنس ***Rhizobium*** للشعيرات الجذرية بالبقوليات، ثم تكوين العقد الجذرية **root nodules** (عن **Devlin ١٩٧٥**)

## طريقة تكوين العقد الجذرية

عندما تلامس بكتيريا العقد الجذرية جذر نبات بقولى، فإن بعض البكتيريا تخترق الشعيرات الجذرية مكونة خيط إصابة infection thread يتجه نحو قاعدة الشعيرة الجذرية، حتى يصل إلى الإندوديرمز والبيريسيكل؛ حيث تبدأ خلايا هذه المنطقة فى الانقسام النشط كرد فعل من جانب النبات؛ فيتكون نمو متدرن tuberous gorwth، أو ما يسمى بالعقدة nodule. وعليه .. فإن العقدة ما هى إلا كتلة من أنسجة الجذر تعيش فيها البكتيريا.

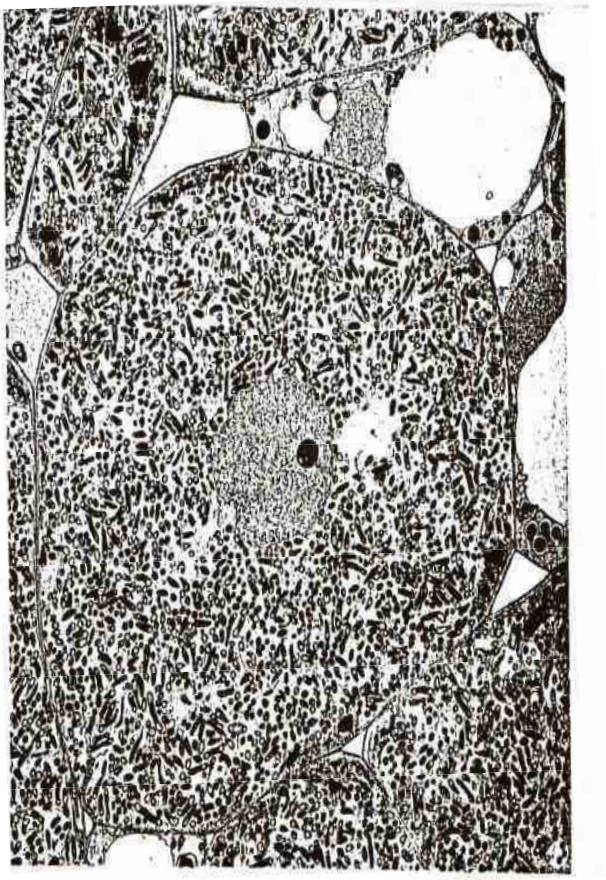
ومن المعروف أن هذه البكتيريا قادرة على إنتاج منظم النمو إندول حامض الخليك (IAA). وربما يكون ذلك هو المحفز على انقسام خلايا الجذر لتكوين العقدة، لكن من المعروف أنه يوجد عديد من البكتيريا الأخرى القادرة على إنتاج نفس منظم النمو، ولكنها لا تحدث عقدًا جذرية شبيهة بتلك التى تحدثها هذه البكتيريا.

وتبدأ أولى خطوات تكوين العقدة الجذرية سريعًا بعد إنبات البذور، ومع استمرار النمو السريع للجذور؛ حيث تكون الظروف بالمنطقة المحيطة بالجذور (الـ rhizosphere) مناسبة لنمو هذه البكتيريا؛ فتخترق الشعيرات الجذرية وتتكاثر بسرعة نتيجة لتوفر الغذاء. ويتكون من هذه البكتيريا خيط العدوى الذى يحاط بإفرازات من السيليليوز، والهيميسيليوز، يفرزها العائل. ولا تخرج البكتيريا من هذا الغشاء المحيط بها إلا بعد وصولها إلى الخلايا الداخلية بالقشرة؛ حيث تبدأ الخلايا فى الانقسام، والعقدة فى الظهور (شكل ١–٢). وتتصل العقد بالحزم الوعائية للجذور، وينتقل إليها الغذاء. وقد تحتوى العقدة الواحدة على ملايين البكتيريا (شكل ١–٣).

هذا .. وتحتوى خلايا العقد على ضعف العدد الطبيعى من الكروموسومات. وهذا التضاعف لا يحدث كرد فعل لدخول البكتيريا، ولكن البكتيريا ذاتها لا تكون قادرة على إحداث الانقسام النشط وتكوين العقد إلا إذا وصل خيط العدوى إلى خلية متضاعفة من خلايا الجذر.

## طريقة تثبيت النيتروجين فى العقد الجذرية

يمكن عند فحص خلايا العقدة الجذرية ملاحظة وجود صبغة حمراء شبيهة إلى حد كبير بالهيموجلوبين الذى يوجد فى خلايا الدم الحمراء؛ ولهذا سميت باسم "لجهيموجلوبين leghemoglobin"، ويبدو أنها ناتج من نواتج تفاعل الجذر البقولى مع البكتيريا؛ لأن أيًّا منهما بمفرده لا يكون قادرًا على إنتاج هذه الصبغة.



**شكل (١-٣): بكتيريا الرايزوبيم داخل خلايا العقدة الجذرية.**

وتدل نتائج عديد من الدراسات أن لهذه الصبغة علاقة أكيدة بتثبيت آزوت الهواء الجوى؛ لأن التثبيت لا يحدث إلا فى العقد المحتوية على هذه الصبغة، كما أن المقدرة على تثبيت آزوت الهواء الجوى تتناسب طرديًّا مع تركيز الصبغة. ولا يعرف على وجه التحديد كيف تساعد الصبغة فى عملية تثبيت آزوت الهواء الجوى، لكن ربما يكون ذلك من خلال توفيرها للأكسجين اللازم لهذه العملية؛ نظرًا لأنها ذات مقدرة عالية على اجتذاب الأكسجين؛ مما يؤدى إلى وصوله إلى البكتيريا فى الجذور، حتى لو كان تركيزه منخفضًا فى التربة.

ويستدل من الدراسات التى أجريت فى هذا الشأن على أن تثبيت آزوت الهواء الجوى فى النباتات البقولية يتم بواسطة جذور النباتات نفسها، ولكن لأسباب ما زالت مجهولة لا تستطيع النباتات القيام بهذه المهمة فى غياب بكتيريا العقد الجذرية التى تتبع الجنس *Rhizobium*. والتوازن دقيق بين بكتيريا العقد الجذرية والعائل البقولى، فلو انخفض مقدار المواد الكربوهيدراتية التى تصل إلى هذه البكتيريا لتحولت إلى بكتيريا مرضية Pathogenic تستهلك نيتروجينًا من النبات، بدلاً من تثبيته من الجو.

هذا .. وتكون الأمونيا هى أول منتج لعملية تثبيت آزوت الهواء الجوى، وهى التى قد يستفيد منها النبات مباشرة.

## كيفية استفادة النبات البقولى من النيتروجين المثبت فى جذوره

تبدأ العقد فى مد النبات بالنيتروجين ابتداء من اليوم الخامس عشر، برغم أنه يمكن رؤيتها ابتداء من اليوم التاسع للإصابة بالبكتيريا. وربما لا تتجاوز الفترة النشطة من حياة العقدة أكثر من أربعة أسابيع، ولكن تكوين العقد ربما يستمر حتى المراحل المتأخرة من نضج البذور.

ويستفيد النبات من جزء من النيتروجين المثبت مباشرة عندما يكون التثبيت بسرعة أكبر من حاجة البكتيريا بالعقد، أو قد يتسرب النيتروجين الزائد إلى التربة، ثم يمتصه النبات. وفى هذه الحالة فإن النيتروجين المتسرب يكون فى صورة بيتا آلانين B-alanine أو حامض أسباريتك aspartic acid. وقد يحصل النبات على النيتروجين بعد موت الخلايا البكتيرية فى الجذور، أو أن البكتيريا تفرز مواد آزوتية ذائبة فى سيتوبلازم خلايا الجذر. وطبيعى أن حرث النبات نفسه فى التربة وتحلل العقد والنبات بما فيه من آزوت يعمل على توفير هذا العنصر للمحاصيل التالية فى الزراعة (Millar وآخرون ١٩٦٩، و Devlin ١٩٧٥، و Cobley & Steele ١٩٧٦، Smartt ١٩٧٦).

## العوامل المؤثرة على عملية تثبيت آزوت الهواء الجوى فى جذور البقوليات

إن من أهم العوامل المؤثرة على عملية تثبيت آزوت الهواء الجوى فى جذور البقوليات ما يلى:

١- يتأثر تثبيت آزوت الهواء الوى فى العقد الجذرية بكل من: الحديد، والكوبالت، والموليبدنم، والكالسيوم، والبورون، والفوسفور؛ فالحديد يدخل فى تركيب صبغة اللجهيموجلوبين. والكوبالت جزء أساسى من فيتامين $B_{12}$، وهو مركب ربما يكون له دور فى تكوين الصبغة، والموليبدنم عبارة عن مرافق إنزيمى يعمل كمستقبل ومعط للإليكترونات أثناء اختزال النيتروجين إلى أمونيا. أما الكالسيوم، فيؤدى نقصه إلى نقص تثبيت آزوت الهواء الجوى، وربما يرجع ذلك إلى التأثير السلبى لنقص الكالسيوم على اختزال النيتروجين فى العقدة.

وتُظهر دراسات Bolaños وآخرين (١٩٩٤) أن غياب البورون فى البسلة أدى إلى نقص عدد العقد الجذرية، وحجمها، ووزنها، وتثبيط نشاط إنزيم nitrogenase. وبفحص العقد الجذرية فى هذه النباتات وجدت بها تغيرات كبيرة فى تركيب الجدر الخلوية وفى أغشية خيوط الإصابة infection thread membranes.

كما توصل Adu-Gyamfi وآخرون (١٩٨٩) من دراساتهم على بسلة بيجون (*Cajanus cajan*) إلى أن زيادة التسميد الفوسفاتى أحدثت زيادة جوهرية فى تثبيت آزوت الهواء الجوى، وأن هذه العملية تأثرت — بشدة — بقدرة النبات على امتصاص الفوسفور. كما احتوت العقد الجذرية على تركيزات عالية من الفوسفور — حتى تحت ظروف نقص العنصر — مما يعنى قدرة العقد الجذرية على الاحتفاظ بالفوسفور بدرجة أكبر عن قدرة بقية الأعضاء والأنسجة النباتية. هذا .. إلا أن العقد الجذرية لعبت دورًا — كذلك — فى نقل جزء من الفوسفور الممتص إلى الأوراق.

ويستدل من دراسات Mahmoud & Abd-Allah (١٩٩٤) على أن تواجد التوكسينات الفطرية Mycotoxins فى التربة بتركيز ١٠٠ – ٢٠٠ ميكروجرام/كجم من التربة قلل عدد العقد الجذرية ووزنها الطازج ونشاط إنزيم النيتروجينيز Nitrogenase فى جذور الفول الملقحة بالبكتيريا *Rhizobium leguminosarum*، كما ثبطت الميكوتوكسينات تمثيل صبغة اللجهيموجلوبين، والمواد الكربوهيدراتية، والبروتين فى العقد الجذرية.

٢- ويستدل من عديد من الدراسات على أن الإفراط فى التسميد الآزوتى للبقوليات يقلل من نشاط الرايزوبيم فى تثبيت آزوت الهواء الجوى. ولكن إضافة النيتروجين بكميات معتدلة فى بداية حياة النبات تكون ضرورية لتشجيع نمو البادرات. كذلك تحتاج النباتات إلى كميات أخرى معتدلة من العنصر فى مراحل النمو التالية؛ ذلك لأن عملية تثبيت آزوت الهواء الجوى لا تكون- أبدًا – بالقدر الذى يكفى لإعطاء أفضل نمو وأعلى محصول. فأقصى ما يمكن أن تقوم البكتيريا بتثبيته – تحت أفضل الظروف لذلك – لا يزيد على ٥٠٪ – ٧٥٪ من حاجة النبات الفعلية.

٣- ويمكن أن تنخفض أعداد البكتيريا كثيرًا إذا تُركت البذور الملقحة فترة كبيرة فى تربة جافة دون ريّ؛ فالتربة يجب أن تروى مباشرة عقب الزراعة، أو أن تكون رطبة أصلاً عند زراعة البذور فيها. كما أن نقص الرطوبة الأرضية أثناء نمو النباتات يقلل من عملية تثبيت الآزوت.

٤- ويقل تثبيت الآزوت عند انخفاض pH التربة؛ بسبب نقص تيسر عنصر الموليبدنم الضرورى لهذه العملية (عن Stoskopf ١٩٨١).

## كمية النيتروجين التى تثبت فى العقد الجذرية

قُدرت كمية النيتروجين التى تثبت بواسطة بكتيريا العقد الجذرية، ونسبة ما

يستفيد منه المحصول المزروع من النيتروجين المثبت كما يلى (عن White ١٩٨٧، و Herridge وآخرين ١٩٩٤).

| المحصول | كمية النيتروجين المثبت (كجم/فدان) | نسبة النيتروجين التى يستفيد منها المحصول(٪) |
|---|---|---|
| الحمص | ١,٢٥ – ٥٨,٧٥ | ٨ – ٨٢ |
| العدس | ٤,٢٠ – ٨٠,٠٠ | ٣٩ – ٨٧ |
| البسلة | ٧,١٠ – ١٠١,٧٠ | ٢٣ – ٨٣ |
| الفول | ٣٢,٥٠ – ١٣٧,٥٠ | ٥٩ – ٩٣ |
| فول الصويا | ٣٧,٥٠ – ٨٣,٣٠ | – |
| الفاصوليا | ٢٦,٧ | – |
| بسلة بيجون | ٤٠,٤٠ – ٦٣,٣ | – |

وتعد هذه التقديرات – بالرغم من تباينها الشديد – مجرد مؤشرات؛ لأن عملية تثبيت الآزوت بواسطة بكتيريا العقد الجذرية تتأثر بعديد من العوامل.

وليس لحجم العقدة الواحدة أهمية كبيرة فى مقدار النيتروجين المثبت، وإنما العامل المؤثر هو الحجم أو الوزن الكلى لجميع العقد الجذرية بالنبات. ويعد وجود ٢٠ عقدة جذرية فى نبات فول الصويا بعد شهر من الزراعة دليلاً على أن عملية التعقد الجذرى تتم بصورة جيدة.

## معاملة بذور البقوليات ببكتيريا العقد الجذرية

يجرى التلقيح ببكتيريا العقد الجذرية فى الحقول التى لم تسبق زراعتها بالمحصول البقولى، وتلك التى لم تزرع بنفس المحصول لمدة أربع سنوات خلت.

يتم التلقيح ببكتيريا العقد الجذرية من النوع المناسب للمحصول قبل الزراعة مباشرة، ويجرى ذلك بأحد التحضيرات التجارية من البكتيريا المناسبة للنوع المحصولى كما يلى:

١- تحضيرات بكتيرية فى البيت موس:

يضاف التحضير – عادة – مباشرة إلى البذور الجافة ويخلط معها، ولكن يبلل البيت موس بقليل من الماء قبل خلطه بالبكتيريا. تزرع البذور المعاملة مباشرة، ولا تعرض لأشعة الشمس المباشرة.

٢- تحضيرات بكتيرية سائلة:

تضاف هذه التحضيرات – عادة – إلى التربة قريبًا من البذور.

٣- تحضيرات محببة (مبرغلة):

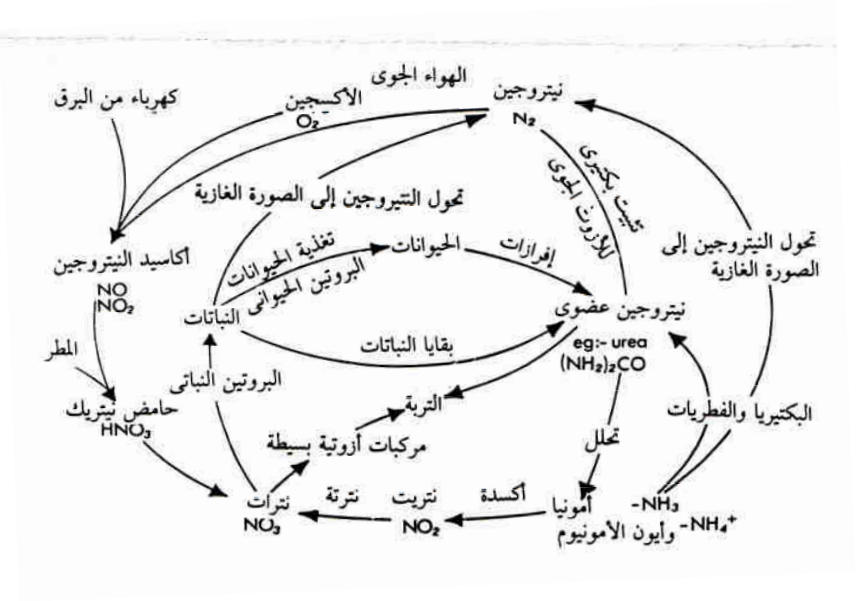
تتميز هذه التحضيرات بأنها يمكن أن تُزيد كثيرًا من أعداد البكتيريا حول البذور؛ الأمر الذى يكون له أهمية فى الحقول التى لم تسبق زراعتها بالمحصول. تضاف التحضيرات المحببة إلى التربة – مع البذور – عند الزراعة. وتزيد التحضيرات المحببة فرصة بقاء البكتيريا فى التربة الجافة.

وفى جميع الحالات .. يجب أن تحتوى التربة على نسبة معتدلة من الرطوبة قبل الزراعة.

هذا .. ولا تلزم إعادة عملية التلقيح سنويًا إذا استمرت زراعة المحصول سنويًا – أو على فترات متقاربة – فى نفس الحقل. كما أن التلقيح بسلالات بكتيرية عالية الكفاءة لا يفيد فى زيادة معدلات عملية التثبيت، لأن السلالات التى استوطنت الحقل تكون أكثر قدرة على المنافسة من السلالة الجديدة المضافة، إلا أن التحضيرات المحببة قد تفيد فى إعطاء السلالة الجديدة فرصة أكبر على المنافسة (عن Stoskopf ١٩٨١).

## دورة النيتروجين فى الطبيعة

يبين شكل (١-٤) دورة النيتروجين فى الطبيعة بين التربة والهواء، وبين النبات والحيوان (عن Fordham & Biggs ١٩٨٥).




شكل (١-٤): دورة النيتروجين فى الطبيعة

## الفوسفور

### أهمية الفوسفور للنبات

يدخل الفوسفور فى تركيب الأحماض النووية، ويلعب دورًا كبيرًا فى كثير من التفاعلات الإنزيمية. فهو يدخل فى تركيب كل الأحماض النووية (مثل: الـ DNA، والـ RNA، و tRNA، والـ ribosomal RNA)، بالإضافة إلى دخوله فى تركيب الإنزيمات اللازمة لتفاعلات الطاقة المختلفة فى عمليات التنفس والبناء الضوئى، وكذلك يدخل فى تركيب المركبات الفوسفورية ذات الروابط الغنية بالطاقة (الـ ADP، والـ ATP) وفى مرافقات الإنزيمات NAD و NADP ، وفى تركيب بعض الدهون (الـ phospholipids).

ومن ثم، فإن الفوسفور عنصر أساسى فى النبات، فهو يدخل فى تركيب الأحماض