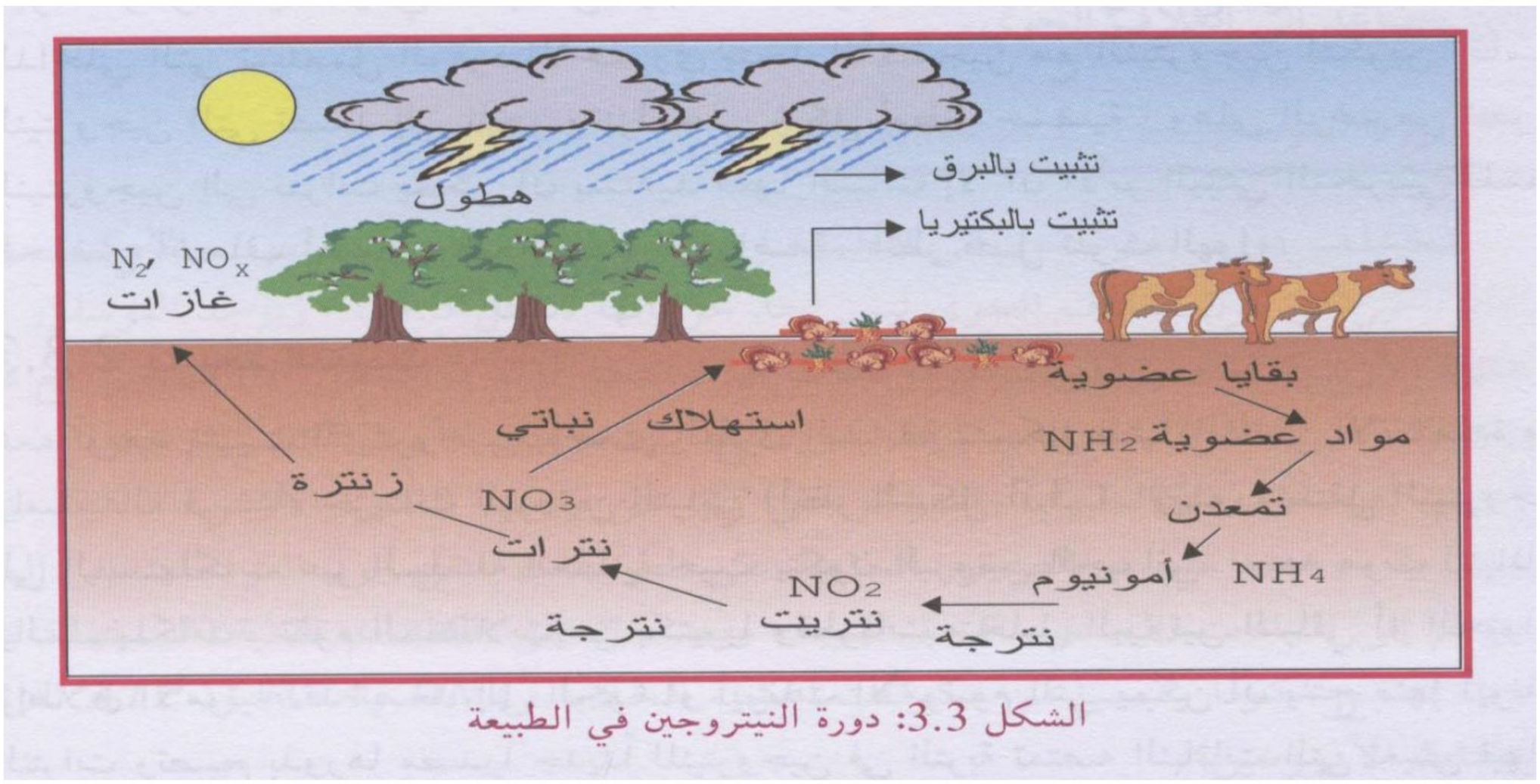
دورة النتروجين :

يعتبر عنصر النيتروجين أحد أهم العناصر التي تدخل في تركيب بروتوبلازم الخلايا الحية فهو يشترك في تكوين الأحماض النووية والأمينية والببتيدات والبروتينات والأنزيمات والهورمونات. النيتروجين والمركبات التي يشترك في تركيبها أحد أكثر المركبات تعرضاً للتغيرات البايولوجية.

يشكل النيتروجين الجوي حوالي 78% من حجم الهواء وعلى الرغم من ذلك فأن غالبية الأحياء لا تستطيع الإستفادة منه بشكل مباشر بإستثناء بعض الأحياء الدقيقة ، كذلك لا بد من تحول النيتروجين من الصيغة الجزيئية N_2 أو NO_2 إلى صيغ أخرى كصيغة NH_4^+ وذلك بفعل إختزاله أو إلى صيغة NO_3^- وذلك بتأكسده وفي كلتا الحالتين فأن هذه التحولات في التربة تحصل بفعل الأحياء الدقيقة.

النباتات تمتص النيتروجين على شكل NH_4^+ أو NO_3^- حيث تجري بعد ذلك عدة تحولات منها إختزال البروتينات والببتيدات والأحماض النووية والأحماض الأمينية.

يمكن ان يضاف النيتروجين إلى التربة مع مياه الأمطار ومياه الري وعند إضافة الأسمدة النيتروجينية العضوية أو الكيميائية ، في حالة الأسمدة العضوية يجب أن تتحلل قبل أن يصبح بإمكان النبات الإستفادة من النيتروجين ، عند تغذية الحيوانات على النباتات فأن النيتروجين العضوي (على شكل بروتينات وأحماض أمينية ونووية ومركبات أخرى) سوف يمر بِعدة تحولات إلى أن يدخل في تركيب الأحماض النووية والأمينية والبروتينات الخاصة بتلك الحيوانات وعند موت وتحلل الحيوانات يعود النيتروجين المرتبط بالمركبات العضوية للإنطلاق مرة أخرى ليتحول إلى مركبات ذائبة والماء وأخرى غازية يمكن أن تتطاير وتعود إلى الجو ثانيةً. إن سلسلة التغيرات التي يمر بها النتروجين ضمن الغلاف الجوي – التربة – الأحياء يطلق عليه دورة النيتروجين في الطبيعية ، **والشكل التالي يوضح مخطط لتلك الدورة:**



الشكل 3.3: دورة النيتروجين في الطبيعة

تثبيت النيتروجين الجوي Nitrogen fixation

يقصد بتثبيت النيتروجين الجوي تحويل النيتروجين الجوي من N_2 و NO_2 إلى NH_3 أو NO_3^- وتحدث عملية التثبيت بِعدة طرق من أهمها التثبيت الحيوي:

أولا : التثبيت الحيوي Biological fixation:

أن كميـة النيتـروجين المثبتـة بهـذه الطريقـة يفـوق كميـة النيتـروجين المثبـت بـالطرق الأخـرى ، عمليـة التثبيـت تقـوم بهـا أنـواع عديـدة مـن الأحيـاء الدقيقـة التـي تمتلـك أنـزيم نيتروجينيـز Nitrogenase حيـث يساعد هذا الانزيم على إختزال النيتروجين الجوي إلى NH_3.

$$N_2 + 3H_2 \xrightarrow{\text{nitrogenase}} 2NH_3$$

يتركب أنزيم نيتروجينيز من نوعين من البروتينات الأول يحتوي على المولبيديوم Mo والحديد Fe ويسـمى بروتين Mo.Fe وهو الجزء الأكبر من الأنزيم ، أمـا البروتين الثـاني فيطلق عليـه Fe-protein ويمثـل الجزء الأصغر من الأنزيم. الأحياء المسؤولة عن عن تثبيت النيتروجين الجوي تشمل أنواع عديدة من الأحياء:

أ- **أحياء دقيقة حرة المعيشة**: تشمل الـــ *Azotobacter* وهي بكتريا هوائية كبيرة الحجم يتراوح طولها بين 5-7 مايكرون وعرضـها بين 3-4 ميكرون ، شكل البكتيريا شبه كروي أو بيضوي أو عصوي أحياناً ، يتواجد بشكل فردي أو في أزواج تحتوي الخلية في بعض الأحيان على جسـم يشـبه الفجوة ، موجبة لإختبار الكاتيلز، تكون حوصلة ، سالبة لصبغة كرام g^- بيضوية الشكل كبيرة الحجم تكون مفردة أو في أزواج أو تجمعات غير منتظمة وهي غير مكونة للسـبورات ولا تكوّن محفظة، وجنس *Klebsiella* الذي يمتاز بالشـكل العصـوي القصـير g^- لاهوائية أختيارية ، وجنس *Azospirillum* شـكلها حلزوني أو كروي، g^- ،غيرمكونة للسـبورات. أما أجناس البكتيريـا اللاهوائيـة الإختيـاريـة التي لهـا القدرة على تثبيت النيتروجين هي *Bacillus* و *Entrobacter*. أمـا أجناس البكتيريا اللاهوائية فتشـمل *Clostridium* و *Desulfovibrio* ، كما تسـتطيع الطحالب الخضـر المزرقة مثل *Nostoc* و *Anabaena*. تثبيت النتروجين الجوي .

ب- **أحياء دقيقة تثبت النيتروجين تكافلياً مع كائن حي آخر:** تشمل أنواع عديدة من الأحياء الدقيقة منها:
عملية تثبيت النيتروجين الجوي لا تقتصـر على الأجناس حرة المعيشـة وإنما توجد أجناس تكافلية ومن أشـهر تلك الأجناس *Rhizobium* الذي يعيش متكافلاً مع بعض أفراد العائلة البقولية كالفول والبزاليا والفول السـوداني والبرسـيم ، عند تنقية *Rhizobium* على أوسـاط زرعية تبدو عصـوية الشـكل قصـيرة سـالبة لصـبغة كرام غير مكونة للجراثيم أثناء نموها داخل العقد الجذرية تفرز منشطات نمو نباتية مثل مشتقات الأندول وحامض الجبريليك والسيتوكاينين عند عزل الـــ *Rhizobium* من العقد الجذرية فأن أشكالها تكون مختلفة وتأخذ الأشكال V , X , L , Y , T هذه الأشكال تكون تعرف بالبكتيرويد Bacteroides ، يضم جنس الرايبوزوم أنواع عديدة متخصصة بنوع معين من النباتات البقولية ، فمثلاً:

R. mliloti	الجت ، الحلبة
R. trifolii	البرسيم المصري ، البرسيم الأحمر
R. leguminosarum	البزاليا
R. phaseoli	الفاصوليا

وجـنس *Frankia* الـذي يعـود إلـى الأكتينومايسـيتات والـذي يسـتطيع تثبيـت النيتـروجين فـي عقـد جذريـة فـي نباتـات الكازورينا.تثبيـت النيتـروجين بـالطرق الصـناعية: عنـد تصـنيع الأسـمدة النيتروجينيـة بطـرق هابر بوش Haber Bosch تحت حرارة وضغط عاليين وبوجود عامل مساعد

$$N_2 + 3H_2 \xrightarrow[\text{ضغط } 250 + \text{م}^\circ 500]{\text{أوكسيد الحديد}} 2NH_3$$

ثانيـاً: التثبيـت بواسـطة التفـاعلات الكهروضـوئية: أثنـاء البـرق وسـقوط المطـر حيـث يحـدث تفاعـل بين N_2 و O_2.

$$N_2 + 2\ O_2 \longrightarrow 2\ NO_2$$

الـذي يـذوب بالمـاء ليكـون حـامض النتريـك (مطـر حامضـي) ، كمـا يمكـن أن يـذوب غـاز NH_3 الموجـود في الهواء الجوي خصوصاً في المناطق الصناعية.

معدنة النيتروجين العضوي Nitrogen Mmineralization

تسـمى عمليـة التحـول الحيـوي للمركبـات النيتروجينيـة العضـوية إلـى نيتـروجين معـدني بالمعدنـة ، وعمليـة المعدنـة تتضـمن خطـوتين همـا: النشـدرة Ammonification التـي هـي عبـارة عـن تحلـل مركبـات النيتـروجين العضـوي وإنطـلاق الأمونيـا ، ثـم عمليـة التـأزت Nitrification وهـي أكسـدة الأمونيـا إلـى نترات.

1. **<u>النشـدرة Ammonification</u>**: تسـتطيع العديـد مـن الميكروبـات تحليـل البروتينـات والأحمـاض الأمينية وتختلف نواتج التحلل تحت الظروف الهوائية عنها تحت الظروف اللاهوائية.
تـتم عمليـة تحلـل البـروتين بواسـطة انزيمـات تعـرف بـِ Proteases التـي تفـرز مـن قبـل الميكروبـات حيـث تعمـل علـى تكسـير السلسـلة الببتيديـة لجزيئـة البـروتين بالتحلـل المـائي وهـذه الانزيمـات نـوعين Exopiptedases وEndopiptedases.

protein $\xrightarrow{\text{protease}}$ **polypeptides** $\xrightarrow{\text{peptidase}}$ **Amino acid**

تسـتطيع العديد من الميكروبات الإسـتفادة من الأحماض الأمينية كمصـدر للطاقة والكربون وتتم عملية تكوين الأمونيا بإنتزاع مجاميع الأمين الموجودة في جزيء الحامض الأميني بطرق مختلفة:-

أ- نزع مجموعة الكربوكسيل وتكوين الأمينات Amines التي تتحلل مائياً لتكوين الأمونيا.

$$\mathbf{R}\text{-CH(}NH_2\text{)-COOH} \longrightarrow \mathbf{R}\text{-}CH_2 + CO_2$$

amine

$$\mathbf{R}\text{-}CH_2(NH_2) + H_2O \longrightarrow \mathbf{R}\text{-}CH_2OH + NH_3$$

alcohol

ب- نزع الأمونيا بالأكسدة وتكوين حامض كيتوني

$$\mathbf{R}\text{-CH(}NH_2\text{)-COOH} + 1/2\ O_2 \longrightarrow \mathbf{R}\text{-CO-COOH} + NH_3$$

حامض كيتوني

ج. نزع الأمونيا بالإختزال وتكوين حامض دهني

$$\text{R-CH(NH}_2\text{)-COOH} + H_2 \longrightarrow \text{R-CH}_2\text{-COOH} + NH_3$$

د- نزع الأمونيا بالتحلل المائي مع تكوين حامض فيه مجموعة هيدروكسيل

$$\text{R-CH(NH}_2\text{)-COOH} + H_2O \longrightarrow \text{R-CH(OH)-COOH} + NH_3$$

OR

$$\text{R-CH(NH}_2\text{)-COOH} + H_2O \longrightarrow \text{R-CHO} + \text{R-COOH} + NH_3$$

تحلل اليوريا

تتكون اليوريا في التربة نتيجة تحلل القواعد النيتروجينية في الأحماض النووية كما يمكن أن تضاف للتربة على شكل أسمدة أو في بقايا الحيوانات ، اليوريا سريعة التحلل في التربة وتتم بفعل أنزيم اليوريز Urease حسب المعادلة التالية:

$$\text{NH}_2\text{-CO-NH}_2 + H_2O \xrightarrow{\text{Urease}} \text{H}_2\text{N-COO-NH}_4 \longrightarrow 2NH_3 + CO_2$$

Ammonium carbamate

2. **عملية التأزت (النترجة) Nitrification**: عملية النترجة تتم على مرحلتين: **الأولى/** هي أكسدة الأمونيا إلى نتريت NO^-_2 بواسطة مجموعة من الميكروبات وأهمها:

Nitrosospira , Nitrococcus , Nitrosomonas , Nitrosolobus

$$NH_3 + 3O_2 \longrightarrow 2HNO_2 + 2H_2O + 66 \text{ cal .}$$

أما الخطوة الثانية/ فتتم بأكسدة النتريت إلى نترات بواسطة *Nitrosospira , Nitrococcus , Nitrobacter*

$$2HNO_2 + O_2 \longrightarrow 2HNO_3 + \text{طاقة}$$

عملية عكس النترجة Denitrification:

هي عملية إختزال للنترات بواسطة الأحياء المجهرية وتحدث تحت نفس الظروف اللاهوائية وتقوم بها عادةً أجناس محددة من البكتيريا الهوائية الإختيارية مثل: *Pseudomonas , Thiobacillus , Agrobacterium , Flavobacterium , Alcaligenes , Bacillus* ، في الغالب تكون هناك عمليات أخرى تنتهي بإنطلاق النيتروجين الجوي ، والمخطط التالي يوضح مسار عملية عكس النترجة وإنطلاق النيتروجين :

$$NO_3^- \longrightarrow NO_2^- \longrightarrow NH_3 \longrightarrow N_2$$

تتم جميع خطوات التفاعل بوجود أنزيمات ، فعملية إختزال النترات إلى نتريت تتم بواسطة أنزيم إختزال النترات Nitrate reductase ، أما عملية إختزال النتريت فتتم بواسطة أنزيم إختزال النتريت

Nitrite reductase. تلجأ الميكروبات إلى إختزال النترات بهدف أكسدة المواد العضوية للحصول على الطاقة تحت الظروف اللاهوائية ، ويمكن تمثيل التفاعلات بالشكل التالي:

الميكروبات غير ذاتية التغذية:

$$C_6H_{12}O_6 + 12KNO_3 \longrightarrow 6H_2O + 6CO_2 + 12KNO_2 + energy$$

Nitrate reduction

الميكروبات ذاتية التغذية الكيميائية: مثل *Thiobacillusade , Thiobacillus denitrificans*

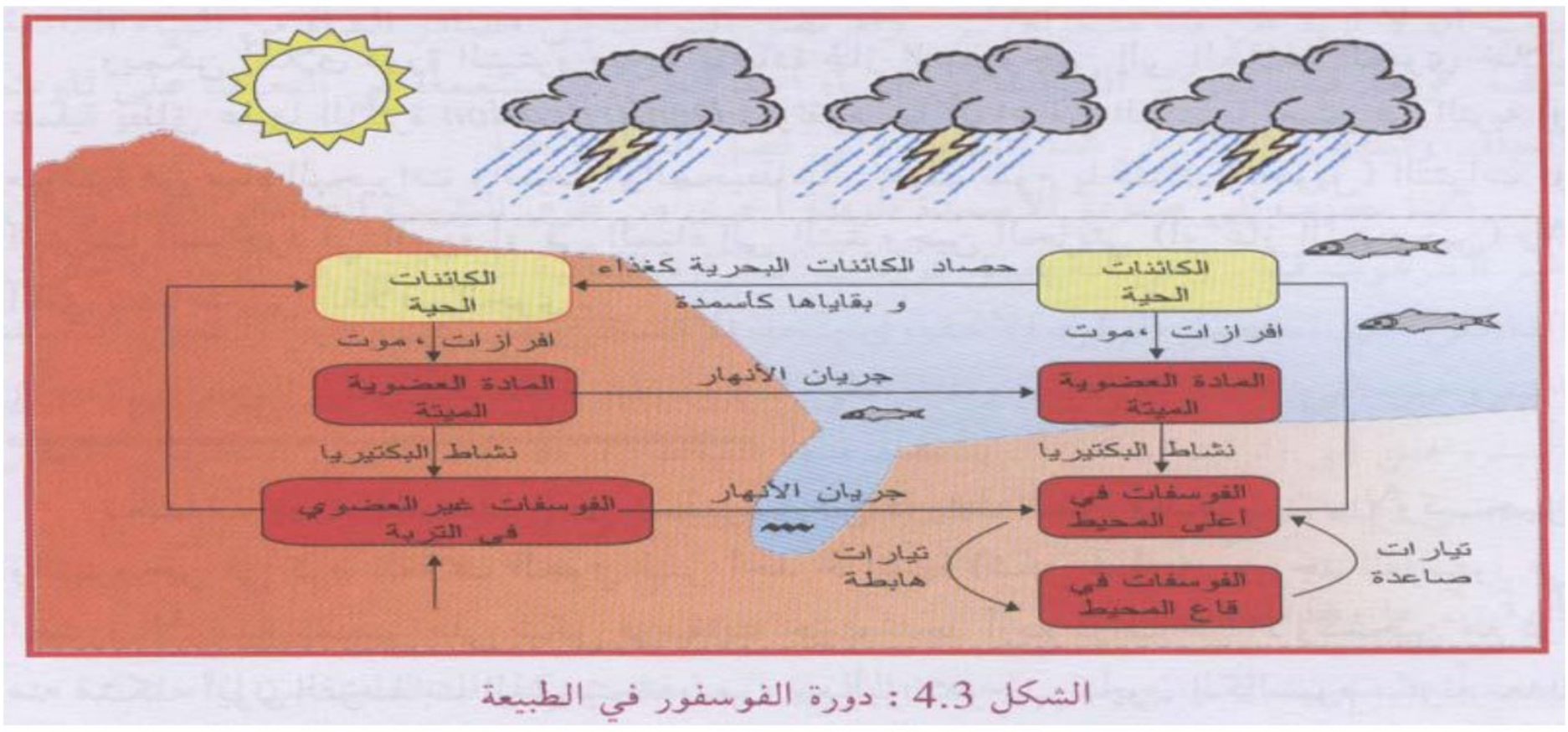
$$S + H_2O + 3KNO_3 \longrightarrow H_2SO_4 + 6CO_2 + 3KNO_2 + energy$$

Nitratereduction

تتأثر عملية النترجة بظروف التربة فهي تزداد نشاطها في الظروف اللاهوائية خصوصاً عندما تكون التربة مغمورة بالماء ، كما أن وجود نسبة عالية من المواد العضوية في التربة يشجع على عملية إختوال النترات ، أما بالنسبة لحموضة التربة فأن معظم الميكروبات المسؤولة على عكس النترجة حساسة للحموضة حيث تنخفض أعدادها في الترب الحامضية ، أما الحرارة المثلى فهي بحدود 25°م تقريباً.

دورة الفوسفور

يعتبر الفوسفور من العناصر الأساسية المهمة للكائنات الحية ، يوجد الفوسفور في التربة وفي الصخور والنباتات والحيوانات والأحياء الدقيقة على شكل مركبات عضوية وغير عضوية . تلعب الأحياء الدقيقة دوراً مهماً في التحولات التي تجري على مركبات هذا العنصر وتشمل هذه التحولات إذابة مركبات الفوسفور غير العضوي ومعدنة المركبات العضوية للفوسفور مع إنتاج الفوسفات غير اتلعضوية وتمثيل الفوسفور من قبل النباتات والحيوانات والأحياء الدقيقة وعمليات الأكسدة والاختزال ويمكن توضيح دورة الفوسفور بالمخطط التاالي :



الشكل 4.3 : دورة الفوسفور في الطبيعة

يعتبر معدن الأباتايت Apatite مصدر الفوسفور المعدني في التربة ويتواجد على شكل كلور وفلور وهيدروكسي أباتايت $Ca_5(PO_4).Cl.F.OH$ يشكل الفوسفور العضوي في التربة نسبة 15 – 85

% من الفوسفور الكلي فيها ، تحتوي أنسجة المحاصيل على نسبة 0.5 – 0.05 % فوسفور عضوي والذي يتواجد على صور مركبات عديدة منها الفايتين phytin الذي يمثل ملح الكالسيوم أو المغنيسيوم لحامض الفايتك phytic acid والفوسفوليبيدات ، وأحماض نووية وسكريات مفسفرة ومرافقات الانزيمات كما يمكن أن يتواجد الفوسفور داخل الفجوات الخلوية على شكل فوسفات غير عضوية .

تتم عملية إذابة الابتايت أو المركبات غير الذائبة بواسطة مجموعة من الأحماض العضوية التي تنتجها الأحياء المجهرية وتشمل تلك الأحماض الستريك واللاكتيك والأوكساليك كما تستطيع بعض الأحياء التي تعمل على أكسدة الكبريت والنتروجين إنتاج أحماض الكبريتيك والنتريك التي تساعد في زيادة ذوبان الفوسفور والمعادلة الكيميائية التالية توضح تحول الفوسفور غير الذائب الى فوسفور ذائب:

$$Ca_3(PO_4)_2 + 2CO_2 + 2H_2O \longrightarrow 2CaHPO_4 + Ca(HCO_3)_2$$

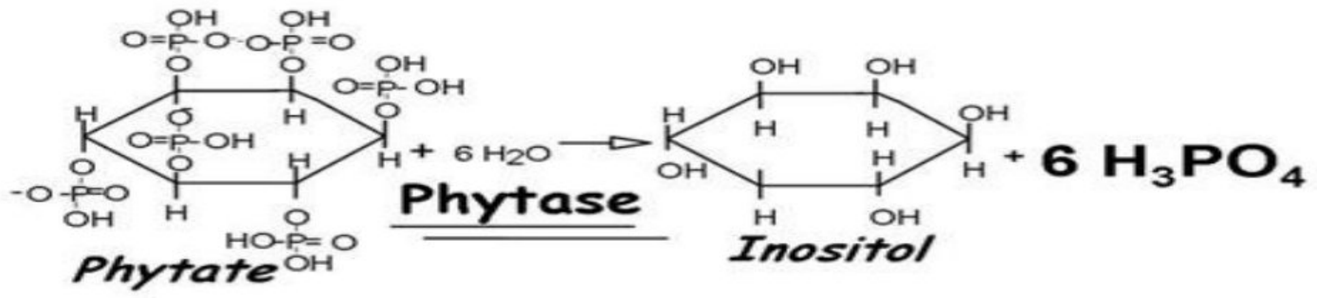
فوسفات ثلاثي الكالسيوم	**فوسفات أحادي الكالسيوم**
مركب غير ذائب	(مركب ذائب)

تستطيع العديد من الأحياء المجهرية سواء كانت ذاتية أو غير ذاتية التغذية الاشتراك في عملية إذابة الفوسفور غير الذائب ويمكن التأكد من قدرة تلك الميكروبات على إذابة المركبات غير الذائبة بتنميتها على أوساط غذائية تحتوي على $Ca_3(PO_4)_2$ أو مسحوق معدن الاباتايت كمصدر وحيد للفوسفور ومن أشهر الأحياء الدقيقة التي لها القدرة على إذابة المركبات غير الذائبة للفوسفور *Bacillus* و *Micrococcus* و *Pseudomonas* و *Mycobacterium* و *Aspergillus* و *Penicillium* و *Fusarium* .

معدنة الفوسفور :

يقصد بها تحول الفوسفور الموجود في المركبات العضوية الى مركبات معدنية وتتم بفعل إنزيمات خارجية تعرف بـ phosphatase فوسفاتيز حيث تقوم بفصل الفوسفور من المركبات العضوية.

هذه الانزيمات بعضها يستطيع العمل ضمن الوسط القاعدي والبعض الآخر ضمن الوسط الحامضي وتستطيع العمل على عدة أنواع من المركبات . بالنسبة الى حامض الفايتك phytic acid فان إنزيم الفايتيز phytase يعمل على تحليله كما في المعادلة التالية :



على عكس الكربون والنتروجين، لا يوجد الفُسفور في الجوّ، لكنّه ينشأ عن جُسيمات الصُّخور الممتزجة في التربة. النباتات تَمتصُّ الفُسفور بواسطةِ جُذورها والحيوانات تَحصُل عليه عندما تأكل النبات أو حيواناتٍ أخرى وعندما تَموتُ الكائنات الحيَّة، يَعود فسفورها إلى التربة. يتحلَّل الفسفور بسهولة، واغتسالُ التربة بالماء يتسبَّب بانجرافه إلى البحر باستمرار، فيتحوّل من جديد بعد ملايين السنين إلى صُخور فُسفوريّة.