

1-les plantes légumineuses

Les légumineuses, superfamille des plantes dicotylédones dialypétales superovaries, herbacées ou arborescente, annuelles, bisannuelles ou pérennes dont le fruit est une gousse (Marouf, 2000), et se sont un groupe botanique à grand intérêt économique avec des espèces alimentaires (pois : *Pisum*, S. Hortense, Fèves : *Vicia faba*, haricot : *Phaseolus vulgaris*) ornementale (Arbre de Judi) et fourragère (luzerne : *Médicago sativa*) (Encarta, 2005).

Les légumineuses sont considérés comme des aliments, fourrage et impliquées dans la production des composées médicales et industriels (Somers et *al.* 2003) ; elles se subdivisent en trois familles ; l'une primitive : les céasalpinacées, les deux autres plus évoluées, les mimosacées et les fabacées (Gobat et *al.* 1998). Cette dernière famille est la plus large avec 476 genres et 14000 espèces (Doyle et Luckow, 2003). Le pourcentage de nodulation dans ces trois familles est différente (Vanhijn et Vonderbeyden, 1995).

1-1-Les caractères morphologiques des plantes légumineuses :

On vu précédemment que cette famille, l'une des plus importantes du règne végétale (10000 espèces environ) est caractérisée par un ovaire formé d'un seul carpelle qui se transforme en un fruit d'un type particulier appelé autrefois légume et que l'on désigne plutôt actuellement sous le nom de gousse c'est un fruit sec, déhiscent par deux fentes longitudinales dont l'une suit le bord ventral (le long duquel sont insérés les graines) et l'autre le nervure dorsale. En général, la gousse est allongée, longuement saillante hors du calice qui persiste à sa base, un peu aplatie dans le plan dorso – ventral et présente l'aspect bien connu du Haricot. Sa forme peut toute fois s'écarter notablement de la précédente: chez de nombreuses genres la gousse est ovoïde, parfois plus courte que la calice et ne peut ne contenir qu'une seule graine, d'autres fois elle se déforme considérablement au cours de maturation est chez la luzerne par exemple elle s'enroule en tire bouchon; souvent aussi décloisant la recoupe transversalement en article monosperme qui peuvent se séparer à maturité comme chez Hippocrepis. Les graines sont toujours dépourvues d'albumen. Les caractères floraux permettent de distinguer trois sous familles assez différentes entre elles, mais dont chacune est relativement homogène (Paul Ozanda, 2000) :

1-2-les caractères morphologiques des papilionacées dans le Sahara :

La corolle est plus nettement irrégulière encore; les deux pétales inférieurs sont soudés en pièce unique dite carène qui enveloppe les étamines et le pistil; l'ensemble de cette corolle présente souvent un aspect rappelant un peu celui d'un papillon, d'où le nom de papilionacée.

La sous famille de papilionacée est la plus importante des légumineuses car elle compte plus de 300 genres dont une vingtaine de la flore Saharienne. Cette dernière est divisée en trois groupes :

GROUPE I :

I.-Plante à rameaux épineux ; fruit divisé par des étranglements; ***Alhagi***.

II.-Plante n'ayant pas ces caractères.

A. Gousse allongée,déhiscente, donnant plusieurs graines ; fleurs insérées isolément sur les rameaux ;***Genista***.

B. Gousse courte, indéhiscente, brune ou jaune pâle, contenant une ou deux graines ; fleurs insérées sur les rameaux par petites grappes de 3à15 fleurs ;***Retama***.

GROUPE II :

I.-Plante liaoïde, du Sahara méridional;***Rhynchosia***.

II.-plante non liaoïde.

A. Gousse contournées en hélice à tours serrés ;***Medicago***.

B. Gousse non contournée en hélice.

I- Gousse courte, une à deux fois plus longue que large.

a) Plantes revêtues de poils argentés abondants, leur donnant un aspect soyeux.

1- Folioles sensiblement égales entre elle ;étamines très inégales, cinq d'entre elles étant plus longues que les cinq autre;***Crotalaria***.

2-Foliole terminale beaucoup plus grande que les latérales ; étamines égales entre elles;
Anthyllis.

b) Plantes à feuilles vertes ou d'un vert grisâtre ou jaunâtre, mais non argentées.

1- Gousse parcourue d'un réseau de nervures saillantes ;***Melilotus***.

2- Gousse lisse, non veinée.

α.Plante couchée , à tige herbacées grêles;***Lotononis***.

β.Plante à tiges dressées, un peu ligneuse à la base.

-Carène terminée en rostre;***Ononis***.

-Carène carène obtuse ;***Psoralea***.

II- Gousse allongée, au moins deux à trois fois plus longue que large (sauf dans quelques *Trigonella*).

a) Etamines toutes soudées entre elles ; plante fortement velue soyeuse; **Argyrobium**.

b) Neuf étamines soudées entre elles par leurs filets, la dixième libre.

1° Stipules semblables aux folioles de sorte que celles-ci paraissent être au nombre de cinq;

Lotus.

2° Stipules de forme différente des folioles et beaucoup plus petites qu'elles.

α. Fleurs jaunes, plantes herbacées à folioles arrondies; **Trigonella**.

β. Fleurs roses ou pourpres ; folioles arrondies, plante portant des poils en forme de navette;

Indigofera.

GROUPE III :

I. Feuilles digitées, c'est -à- dire à folioles partant d'un même point, comme les doigts d'une main.

A. Fleurs à court pétiole, plante à courts, blanchâtres , fleurs jaunes ; **Crotalaria**.

B. Feuilles à long pétiole, plante à long poils fauves, fleurs bleues ; **Lupinus**.

II. Feuilles pennées, c'est -à- dire à folioles espacées le long du pétiole.

1. Gousse divisée en articles successifs.

a) Gousse généralement arquée en fer à cheval ou même tirebouchonnée, profondément divisée par des échancrures; **Hippocrepis**.

b) Gousse droite ou faiblement arquée, recouverte extérieurement;
Hedysarum

2. Gousse non divisée transversalement en articles successifs.

a) Gousse divisée longitudinalement en deux loges par une cloison ou un profond sillon; **Astragalus**.

b) Gousse non divisée longitudinalement en deux loges.

1° Pédoncules floraux opposés aux feuilles; **Tephrosia**.

2° Pédoncules des fleurs ou des grappes naissant à l'aisselle des feuilles;

Indigofera.

2-La rhizosphère :

La rhizosphère est une zone où se développe des rhizobactéries qui sont capables de multiplier et de rivaliser avec les autres micro-organismes sous l'effet des exsudats racinaires (Loper et *al.* 1998). Parmi les microorganismes de la rhizosphère : les rhizobactéries, sont capables de transformer l'azote moléculaire de l'air en ammoniac grâce à une enzyme particulière la nitrogénase ; cette caractéristique est la propriété de bactéries dites fixateurs d'azote figure (01). ces dernières sont :

- **Les bactéries libres** : du genres *Azotobacter*, *Clostridium* et *Klebsiella*. Elles sont capables de réduire l'azote (N_2) en vivant librement dans le sol.
- **Les bactéries associatives** : parmi celles-ci les bactéries du genre *Azospirillum* et *acetobacter*, intimement associées aux racines.
- **Les bactéries symbiotiques** : il existe six genres de bactéries, mobiles par des flagelles et à Gram négatif, forment des symbioses fixatrices d'azote avec les légumineuses (Hill, 1992).
 - *Rhizobium* S. Str. (ex : *R. léguminosarum*, *R. fredii*) ;
 - *Azorhizobium* (ex : *A. caulinadans*), ce dernier formant des modules épigés dans les tiges de *sesbania grandiflora*, une *Fabacée* tropicale ;
 - *Bradyrhizobium* (ex : *B. Japonicum*) ;
 - *Mesorhizobium* (ex : *M. Loti*, *M. Cic*)
 - *Sinorhizobium* (ex: *S. Meliloti*)
 - *Allorhizobium* (ex: *A undicola*)

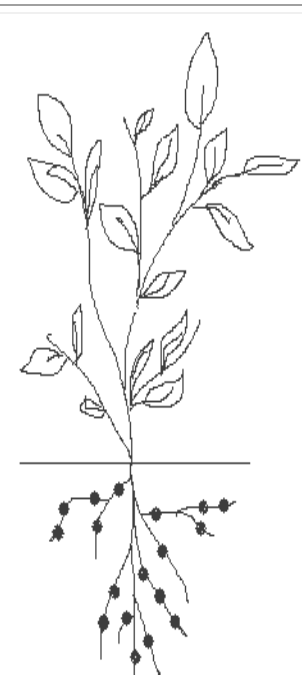
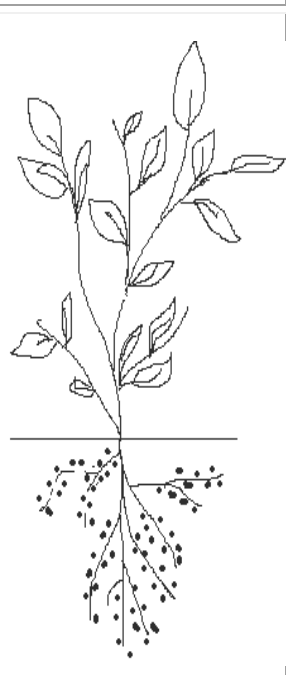
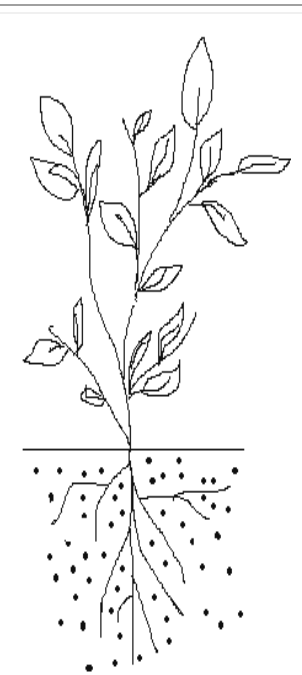
Système de Fixation de N_2	Symbiotique	Associatif	Libre	
N_2  NH_3				
Localisation de l'activité	Intérieur du système racinaire de la plante hôte	Rhizosphère	Sol	
Exemples d'organisme impliqués	<i>Rhizobium</i> Actinomycètes	<i>Azospillium</i> <i>Azotobacter</i>	<i>Azotobacter</i> <i>Klebsiella</i>	<i>Rhodospirillum</i> <i>Chlorobium</i>
Source d'énergie	Photosynthèse de plante hôte	Exsudats racinaires	Résidus végétaux	Photosynthèse Bactérienne
Quantité d'azote fixée (kg /ha/an)	Légumineuses (50 – 400) Non légumineuses (20 – 300)	10 – 200	1 – 2	10 – 80

Figure (01) : les systèmes de fixation biologique de l'azote moléculaire (Hill,1992).

3- Plantes légumineuses nodulants :

3-1-Macrosymbiotes (les plantes) :

Les plantes de famille des légumineuses sont capables d'utiliser indirectement l'azote de l'atmosphère quand elles présentent des nodosités sur leur système racinaire. Les nodosités contiennent des bactéries appelées : les *Rhizobia* (Stevens ,1992). Figure (02)

La nodosité des légumineuses est le résultat d'interaction forte et complexe entre le partenaire *Rhizobia* et la racine à laquelle il s'est spécifiquement associé (Guy, 1987)

Figure (03).

3-2-Microsymbiote : *Rhizobia*

Rhizobium signifie étymologiquement : ce qui vie dans les racines, crée en 1889 par Frank pour les bactéries qui nodulent les racines des légumineuses et dans laquelle elles vivent comme des endosymbiotes (Gillis, 1991). Les *Rhizobia* sont des bactéries libres , bâtonnets, Gram négatif, mobiles grâce à des flagelles polaires ou péritriches, aérobies strictes, même si certains peuvent supporter les faibles pressions d'oxygène (Vincent, 1982), de 0.5 à 0.9µm en largeur et en 1.2 à 3µm en longueur (Hiller et *al.* 2002).

Elles contiennent souvent des granules de poly β - hydroxybutyrat et deviennent pliomorphe dans des conditions adures (Prescott et *al.* 2003). Ils se transforment en bactéroïdes sur un million de cultures ou dans les nodules des légumineuses (Larpen et *al.* 1970). Ces bactéroïdes assurent essentiellement l'étape de réduction de N_2 en NH_3 grâce à sa nitrogénase (Guy, 1987).

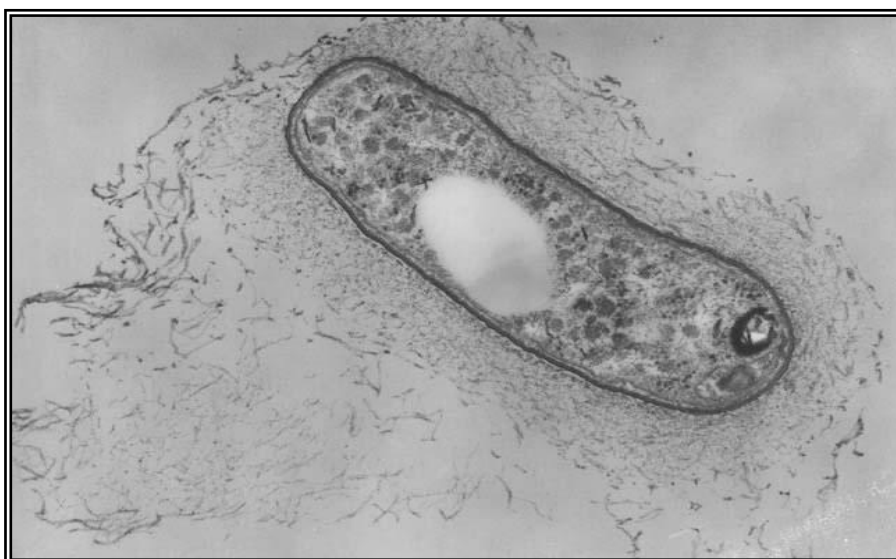


Figure (02) : Représentation microscopique du *Rhizobium trifolii* (Vincent, 1982)



Figure (03) : Des Racines contiennent des nodules de *Rhizobium sp.* (Stevens, 1992)

3-3 -Taxonomie de *Rhizobia* :

Les *Rhizobia* sont des bactéries qui forment des symbioses avec les plantes légumineuses, des régions tempérées et tropicales (Tordan 1984). Suite à l'adaptation de la Taxonomie poly-phasique comme critère de caractérisation leur classification a subi de nombreux remaniements ces dernières années. Zakhia et Philippe (2001), regroupe les *Rhizobia* en 6 genres et 28 espèces Présentés dans le tableau 1 (Annexe 01).

3-4-La symbiose : *Rhizobia* – légumineuses

Les légumineuses établissent une relation symbiotique avec la bactérie du sol, le *Rhizobium*. Cette symbiose se manifeste par la formation de nodosités racinaires, organes spécialisés dans lesquelles l'azote atmosphérique est réduit en ammoniac suite à l'infection par les *Rhizobia*. Ce processus de fixation symbiotique permet à la plante de survivre dans les sols pauvres en azote. De même les bactéries profitent de l'interaction symbiotique par l'acquisition de molécules carbonées produites par la plante pendant la photosynthèse. Dans l'interaction *Rhizobium* – légumineuses on observe un haut niveau de spécificité d'hôte. Cette spécificité est basée sur un dialogue moléculaire, c'est-à-dire un échange de signaux entre les partenaires symbiotiques.

Les *Rhizobia* répondent à des signaux flavonoïdes excités par la racine de la plante hôte qui vont induire en retour l'expression des gènes de la nodulation (gènes Nod) (Levage et al. 1990 ; Bergen et al., 2001). Les gènes de nodulation se répartissent en trois catégories :

- 1) Gènes commun (Nod ABC), présentés sont identiques chez toutes les espèces de *Rhizobium* (Pieternel et vanderleyden 1995 ; Bladergroen et Spaink 1998).
- 2) Gènes Nod spécifique (hsn), déterminent le spectre d'hôte de chaque espèce de *Rhizobium*, (Spaink, 1994 ; Bladergroen et Spaink 1998) chez *Rhizobium léguminosarum*, on rencontre les opérons Nod FEL et Nod. MN.
- 3) Gènes Nod régulateurs (Nod D), activent l'expression des gènes Nod communs et spécifique en présences de flavonoïdes (Schultze et Kon dorsi. 1998 ; Spaink , 2000)

3-5-Nodulation et fixation d'azote :

Les nodules racinaires formés sur les légumineuses par les bactéries *Rhizobia* constituent une association symbiotique permettant la fixation de l'azote atmosphérique ; le nodule étant l'élément fondamental de la symbiote. Les nodosités fonctionnelles se forment cinq phases selon Prescott (1999), regroupe ces phases dans le tableau (01).

Tableau (01) : les cinq phases de la nodosité (Prescott, 1999).

Phase	Evènements correspondants
Préinfection de la racine	- Multiplication des <i>Rhizobia</i> dans la Rhizosphère. - Déformation des poils absorbants (Vincent, 1967).
Reconnaissance spécifique entre la bactérie et la plante hôte.	- Echange de signaux moléculaires (Young, 1993). - Les graines en germination et la partie apicale des racines extraites des flavonoïdes qui servent de chéno – attracteurs et induisent l’expression d’un ensemble des gènes de modulation spécifiques (Lawson, 1996).
Infection du système racinaire	- L’adhésion des bactéries à la surface des poils absorbants est assurée par des lectines spécifiques (glycoprotéine d’origine végétale) ces lectines s’uniraient sélectivement avec les polysaccharides de la paroi bactérienne. - En prenant une forme en Grass caractéristique dans lequel les bactéries pénètrent dans les cellules de la plante-hôte (Hirsch, 1992. Mylona et al. 1995). - Formation d’un canal infectieux qui se dirige vers un prémordium.
Libération des bactéries à l’intérieur des cellules. (Maturité du nodule)	- Libération des <i>Rhizobia</i> en dehors du cordon d’infection et formation ou persistance de la membrane enveloppante. - Multiplication des <i>Rhizobia</i> libérés. - Conversion sous la forme bactéroïde. - Etablissement de la symbiose fonctionnelle. - Réduction et assimilation de la l’azote.
La nodulation proprement	- La différenciation de certaines cellules du cortex racinaire interne (présence des bactéries déclenche l’expression des gènes dans les produits). - Multiplient et forment une excroissance ; la nodosité (Truchet et Denarie, 1993). - La nodosité élaborant une molécule proche de la légghémoglobine, de couleur brun – rouge : la légghémoglobine (assure le transport et la régulation de l’oxygène vers les bactéroïdes). (Prescott et al. 1999).

3-6-Mécanismes de la fixation de l'azote atmosphérique :

L'activité dans une nitrogénase est limitée par la présence de molécule d'ATP, source d'électrons et les ions de magnésium (Mg^{++}).

L'obtention des molécules d'ATP chez les *Rhizobia* est fait à partir de l'oxydation des produits carboniques par le cycle de Krebs (Denarie et Truchet, 1979).

Selon Brill (1980), la protéine ferredoxine ou la protéine flavodoxine, sont eux donnent les électrons à l'enzyme nitrogénase.

Les molécules d'ATP se réagissent avec les ions de magnésium (Mg) et donnent un complexe qui se lie typiquement avec le complexe (Fe-Mo) qui a comme résultat le changement de son activité réductrice qui se transmette de 0.29 à 0.40 Volt. Donc il y aura un changement dans sa structure moléculaire (Stryer, 1985), ce changement de l'activité réductrice du complexe (Fe- Mo) permet de transmettre les électrons au complexe (Mo- Fe -Fe).Où ce dernier va prendre une forme qui permet de réduire l'azote moléculaire, figure (03).

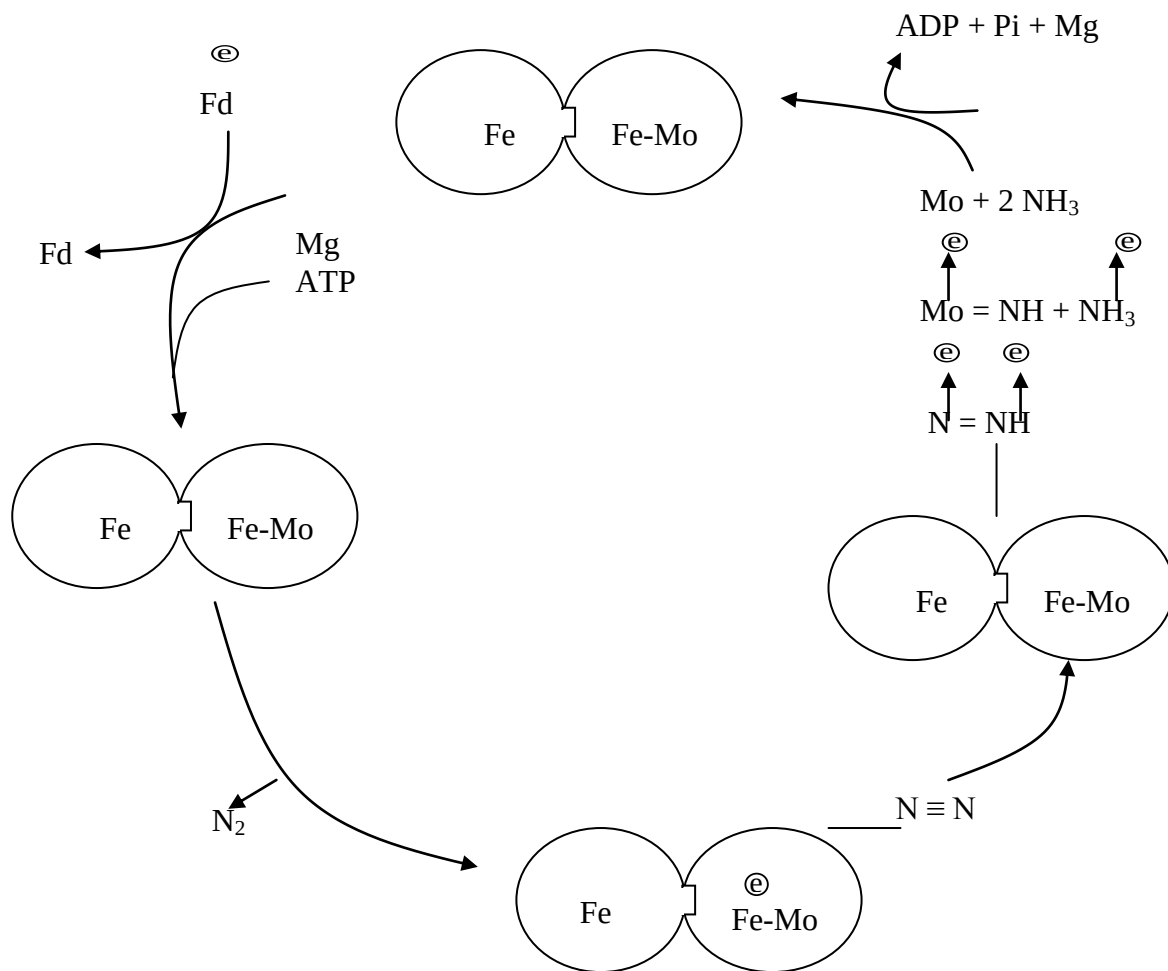
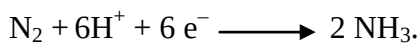
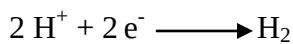


Figure (03) : Les étapes de réduction de l'azote atmosphérique (Blondeau, 1980).

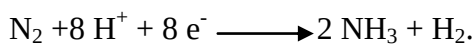
-Enzyme nitrogénase réduit l'azote moléculaire selon la réaction :



Et au même temps ça fonctionne sur la réduction des protons (H^+) au hydrogène :



Donc la réaction de la réduction d'azote atmosphérique dans les conditions optimales :



4-les plantes légumineuse non nodulantes :

4-1-Fixateurs libres d'azote :

Les bactéries non symbiotiques des genres *Azotobacter*, *Azotococcus*, *Beijerinckia* et *Clostridium* sont capables de fixer l'azote.

Les trois premiers genres sont des bactéries saprophytes fréquentes dans le sol, l'oxydation de la matière organique est utilisée comme source d'énergie pour la fixation. On estime que ces bactéries apportent environ 7 kg d'azote par hectare et par an. un autre groupe important comprend de nombreuses bactéries photosynthétique, comme les *Cyanobactérie*.

Certains *Clostridium* le plus célèbre est *Clostridium Pasteurianum*, sont fixateur d'azote. Ils sont chimiorganotrophe fermentatifs anaérobies stricts, la nitrogénase n'est spécialement protégée d'oxygène.

On rappelle que les clostridiiums sont des bacilles Gram⁺, capables de sporuler en spores Thermorésistants fermentatifs anaérobies stricts.

Certaines cyanobactéries (des bactéries photolithotrophes qui réalisent une phototrophie très semblable à celle des plantes vertes avec photolyse de l'eau et de photosystème) sont azototrophe (Peter et al.2000).

Remarque : l'azototrophie des *cyanobactérie* est généralement libre mais on trouve des symbioses, par exemple chez *l'anabaena azollae* qui s'associe à la petite fougère aquatique *Azolla* au niveau des cavités des feuilles. En Asie du sud – est, *azolla* est utilisée comme « engrais vert » dans les rizières.

4-2-La fixation non symbiotique par *Azotobacter* :

4-2-1-Définition et morphologie d'*Azotobacter* :

Les *Azotobacter* sont sans doute les plus fréquentes, les plus abondantes, et les plus actives, ce sont des bactéries ovoïde ou en bâtonnets de 1.5 à 2 μm ou plus, groupées par paires ou en amas ou encore en chaînettes de longueur très variée, elles sont mobiles grâce à des cils pérétriches ou immobiles Figure (04) (Starr, 1981).

Elles ont un taux de respiration extrêmement élevé, sont considérés comme aérobies mais préfèrent un environnement avec une basse concentration d'oxygène (Ronald, 1997).

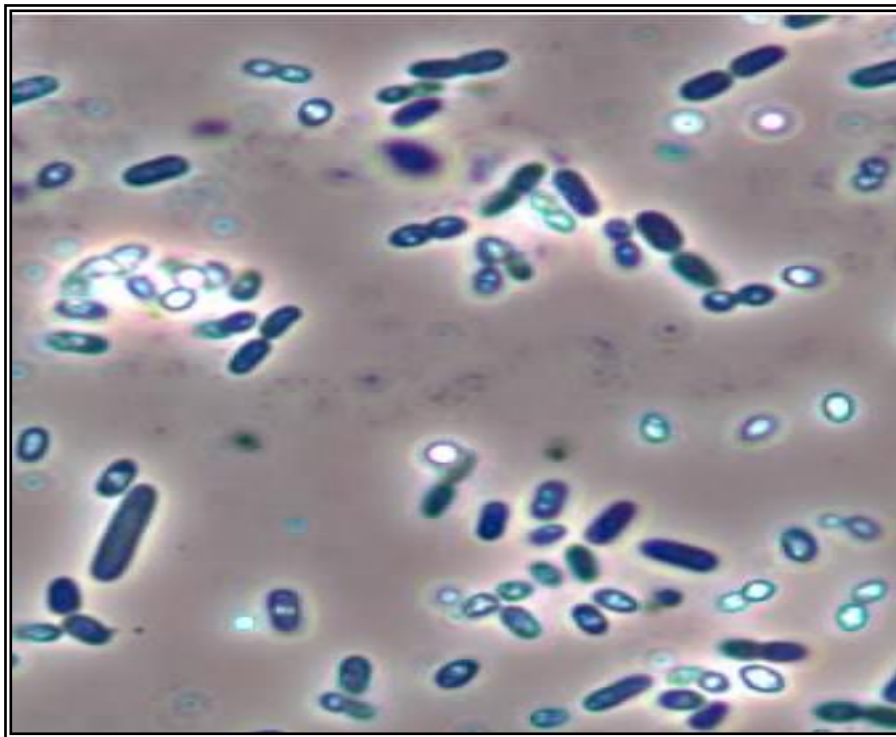


Figure (04): *Azotobacter chroococcum* (0.2 μm) (Becking, 1981).

4-2-2-Caractéristiques d'*Azotobacter* :

- Aérobie mais peu se développer dans des états réduits en l'oxygène.
- Gram négatif.
- Catalase positif.
- Fixateur non symbiotique d'azote.
- Le pourcentage : G + C = 63 % à 66 %.
- Peuvent se développer à des pH : 5.5 à 8.5 mais l'optimum est de 7 à 7.5.
- La gamme de température est de 20 à 30 C°.
- Peuvent produire des pigments hydrosolubles vert jaunâtre florissante ou rouge violet (Madigan et al. 1997).
- Elles sont incapables de former les endospores, mais elle forment des kystes pour le protéger contre le séchage et le rayonnement (Holt et Staley, 1994).

4-2-3-Les différentes espèces d'*Azotobacter* :

Le genre *Azotobacter* a six espèces qui sont les fixateurs d'azote atmosphérique mais peuvent se développer sur des sources alternatives de l'azote tel que l'ammoniaque, l'urée et le nitrate (Buchanan et Gibbons, 1974).

2-3-1-*Azotobacter chroococcum* : est caractérisé par :

- Des cellules polymorphes ; bâtonnets ovales, ou coccus.
- Les dimensions variées de 3 à 7 µm de long et de 1.5 à 2.3 µm de large.
- La forme cellulaire varie selon le temps et selon les conditions de croissance.
- La disposition des cellules est en paire.
- Les cellules jaunes sont mobiles par des flagelles pérétriches.
- Les microcystes sont formées.
- Les colonies sont entourées par une gaine noire.
- Les pigments produits sont insolubles dans l'eau (Becking, 1961).

2-3-2-*Azotobacter nigricans* : est caractérisé par :

- Les cellules sont bâtonnets à des extrémités arrondies.
- La disposition est en paire ou singulier.
- Les dimensions sont de 4.1 à 4.9 µm de long et de 1.5 à 2.7 µm de large.
- Certaines espèces sont isolées des sols Européens, pratiquement à l'est de l'Europe (Becking, 1962).

2-3-3-*Azotobacter armeniacus* : est caractérisé par :

- Les cellules sont bâtonnets à des extrémités arrondies.
- La disposition est en paire au singulier.
- Les dimensions sont : de 5 à 5.7 μm de long et de 1.7 à 2 μm de large.
- Peut utiliser le citrate ou D-galacturonate comme source de carbone.
- L'*azotobacter armeniacus* est incapable d'utiliser l'ammonium et le nitrate ou le glutamate comme source d'azote pour la croissance. (De Smedt et al, 1980).
- Il n y a pas un milieu spécifique pour l'isolement d'*azotobacter armeniacus* mais probablement peut être isolé par l'utilisation de caprylate comme seule source de carbone (Derx , 1951).

2-3-4-*Azotobacter beijerinckii* : est caractérisé par :

- Les cellules sont bâtonnets avec des extrémités arrondies.
- La disposition est en paire ou singulier mais des fois en petite chaînette.
- Les dimensions sont de 3.2 à 5.3 μm de long et de 1.7 à 2.7 μm de large (Buchanan et Gibbons, 1974).

2-3-5-*Azotobacter vinelandii* : est caractérisé par :

- Les cellules sont bâtonnets avec des extrémités arrondies
- La disposition est singulière ou en paire
- Les dimensions sont variées de 3 à 4.5 μm de long et de 1.5 à 2.4 μm de large
- Les cellules sont mobiles par des flagelles pérétriches
- Les colonies ne sont pigmentées
- L'excrétion des pigments verts jaunâtres, florissants solubles dans l'eau (Bagyaraj et Menge, 1987).

2-3-6-*Azotobacter paspali* : est caractérisé par :

- Des cellules longues, bâtonnets avec des extrémités arrondies.
- Les dimensions sont : de 7 à 10.9 μm de long et de 1.3 à 1.7 μm de large, mais des fois inférieurs à : 3.2 à 4.2 μm de long et de 1.6 à 1.9 μm de large.
- Excrétion de pigments vert jaunâtres, florissants ; ou rouge violette soluble dans l'eau (Becking, 1962).

4-2-4-Isolement et écologie d'*Azotobacter* :

L'*azotobacter* est trouvé dans les sols alcalins, dans les environnements aquatiques, dans les rhizosphères des plantes et la phyllosphère (Perry, 2002).

L'*Azotobacter* a été découvert la première fois en utilisant une culture riche en une source d'azote combinée ; elle est capable de croître dans des milieux qui à l'azote atmosphérique, mais se développe le plus rapidement sur l'ammoniaque (Balows, 1992).

Différentes méthodes ont été employées pour l'isolement de l'*azotobacter* tel que la solution d'élément nutritif et le milieu d'agar.

L'*azotobacter* est trouvé dans les sols alcalins, dans les environnements aquatiques, dans les rhizosphères des plantes et la phyllosphère (Perry, 2002).

4-2-5-Aspect physiologique et biochimique :

Azotobacteraceae sont des aérobies, hétérotrophes, micro-organismes fixateurs d'azote, et par conséquent possède toutes les enzymes oxydatives pour la dégradation de nombreuses composées organiques utilisables par différentes espèces comme seule source de carbone et d'énergie (Becking 1981).

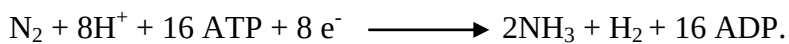
Toutes les études montrent que les taux élevés d'oxygène, même ceux atmosphériques inhibent l'activité de la fixation de l'azote chez l'*Azotobacter*. Les expériences révèlent que chez l'*Azotobacter* un mécanisme spéciale fonctionne pour minimiser les dommages contre la nitrogénase, le haut taux de respiration d'*Azotobacter* expliqué comme un mécanisme endommagent le site de nitrogénase pour la fixation de nitrogénase, ce processus appelé « la protection respiratoire de nitrogénase » et couplé avec une multitude de cytochromes et protéines redox, ainsi la maintenance des nitrogénases dans un environnement anoxique essentiellement à l'intérieur des cellules qui néanmoins dérive l'énergie de métabolisme aérobie (Dalton et Postgate, 1969). Un important argument est le complexe nitrogénase qui est constitué de deux composants, elle est extrêmement sensible à l'oxygène, rapidement et réversiblement inactivé lors de l'exposition à l'air (Beking, 1962).

La nitrogénase est l'enzyme la plus impotente chez les bactéries aérobies fixatrices d'azote tel que l'*Azotobacter*, chez de nombreux autres micro-organismes appartenants à différents groupes taxonomiques. Les principales propriétés de la nitrogénase peuvent être résumées comme suit :

- Constituées de deux protéines sensibles pour l'oxygène où il peut être détruit par l'oxygène.
- Contient les métaux transitoires Fe et Mo.
- Nécessite Mg^{2+} pour être activé, et convertie l'ATP en ADP.
- Convertie l'ATP en ADP ; et elle est inhibée par ADP.
- Réduit l'azote et autres molécules avec doubles ou triples liaisons (comme C_2H_2 et CN)
- Réduit les ions H^+ en H_2 gazeux, si N_2 sont présents (Becking, 1981).

Les deux protéines forment cette enzyme contiennent la ferredoxine et le molybdène, les protéines de la nitrogénase sont aussi nommés composant I et composant II. De plus, est intéressant que les deux protéines sont similaires dans des différents organismes fixateurs d'azote, cette similarité est grande qu'elle est possible pour les échanges avec les protéines des autres micro-organismes fixateurs d'azote (Bullen et *al.* 1966).

La nitrogénase réduit N_2 en NH_3 , pour cette fonction, elle nécessite l'adénosine triphosphate ATP, in vitro, 16 molécules d'ATP sont consommées pour convertir N_2 en deux molécules de NH_3 , et $8 e^-$ sont aussi inclus :



A part l'oxygène, H_2 est aussi intensivement étudié dans les relations avec la nitrogénase. Les azotobacters ont beaucoup d'hydrogénase, et par conséquent, dans ces organismes le rôle d'hydrogénase dans la fixation d'azote est en particulier intéressant (Becking, 1981).