

dans la zone de courbure des poils et sont encapsulées à l'intérieur. Un prénodule se forme alors. Il contient de larges cellules corticales infectées par les Actinomycètes qui commencent à fixer l'azote. Les hyphes vont ensuite progresser du prénodule vers les cellules corticales du lobe nodulaire en formation pour donner le primordium nodulaire. Ce dernier se développe en nodule mature formé par plusieurs lobes nodulaires (Figure 4).

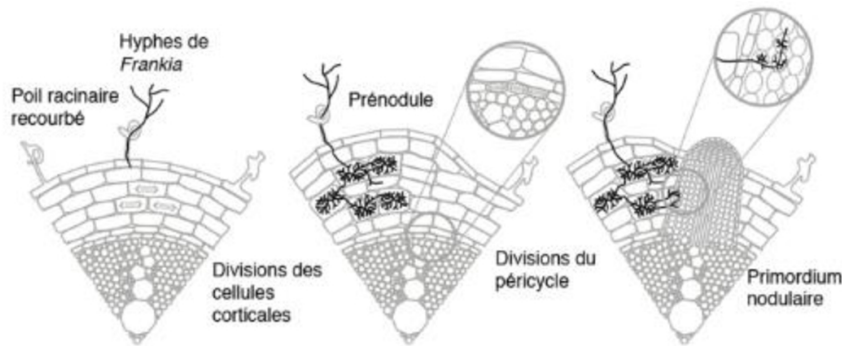


Figure 4 : Les étapes de formation des nodules contenant les Actinomycètes (Benabdoun et al. 2012).

7. Lutte biologique pour le traitement des phyto-pathogènes :

La lutte biologique représente l'utilisation d'un organisme vivant ou ses produits pour combattre un autre organisme néfaste. Dans notre cas, on s'intéresse à l'utilisation des microorganismes pour inhiber les agents phyto-pathogènes (germes, insectes, etc.).

La lutte biologique est une alternative à l'utilisation des pesticides qui causent une grande pollution dans l'environnement et des pathologies non négligeables chez l'homme et l'animal.

Les microorganismes utilisés en lutte biologique limitent et éliminent les pathogènes en usant des interactions suivantes : l'antibiose (l'amensalisme), la compétition, le parasitisme et la prédation. De plus, ils stimulent les systèmes de défense de la plante et réduisent la pathogénicité du phyto-pathogène en inhibant sa production des toxines et autres molécules d'altération des plantes.

Les moisissures sont largement utilisées en lutte biologique car en plus de repousser les germes pathogènes avec leurs molécules de défense, elles éliminent les insectes et les organismes néfastes pour les plantes en les paralysant. Les espèces les plus utilisées sont *Beauveria bassiana*, *Verticillium lecanii* et les Entomophthorales (notamment *Entomophthora planchoniana* et *Pandora neoaphidis*) (Figures 5 et 6).

Ces moisissures sont commercialisées sous forme de spores ou de cellules uniques obtenues par fragmentation du thalle. Elles sont pulvérisées sur le sol où sont cultivées les plantes à protéger ou même directement sur le tronc et tout autour (au dessus des racines). Les espèces insecticides produisent des substances paralysantes afin de mieux attaquer leurs proies. Et les espèces antimicrobiennes déclenchent le métabolisme secondaire pour avoir un maximum de toxines, d'antibiotiques et autres molécules qui inhiberont les microorganismes phyto-pathogènes.



Figure 5 : Activité insecticide de *Beauveria bassiana* sur quelques insectes phyto-pathogènes (Lee et al. 2018).



Figure 6 : Une mouche de la famille des Sciaridae inhibée par *Entomophthora planchoniana* (Taxateca.com).

Les avantages de la lutte biologique sont les suivants :

- diminuer la pollution et les dangers sanitaires dus à l'utilisation des engrais chimiques.
- la facilité de produire des engrais microbiens : les espèces utilisées sont faciles à obtenir car elles sont répandues dans la nature et sont aussi faciles à cultiver (non exigeantes).

- la possibilité de cibler un ou quelques pathogènes en particulier : plusieurs moisissures et bactéries sont spécifiques à un pathogène précis. Ils ne nuisent pas les autres organismes et ne perturbent pas la flore naturelle du sol.
- une large gamme de phyto-pathologies peut être traitée grâce aux microorganismes : certains sont actifs sur des vers de terre, d'autres sur les insectes, d'autres encore sur les moisissures et les bactéries, etc. → les microorganismes utilisés en lutte biologique offrent un grand champ d'applications.

Les microorganismes utilisés en lutte biologique doivent répondre aux conditions suivantes :

- être non pathogènes pour les plantes ciblées.
- avoir un faible coût (facile à obtenir et/ou à cultiver).
- être résistants aux conditions de commercialisation (surtout au séchage).
- être résistants aux moyens de défense de la plante.

Les moisissures utilisées pour lutter contre les insectes doivent en plus avoir la capacité de produire des cellules appressoriales (tubes germinatifs et appressoria) nécessaires pour l'encrage et l'amollissement de la cuticule (couche externe de l'épiderme des insectes) (Figure 7).

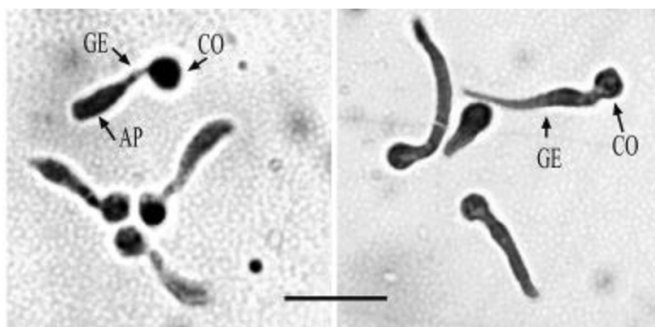


Figure 7 : Formation des cellules appressoriales chez *Beauveria bassiana* prélevée sur les ailes postérieures de la cigale (Zhang et al.2010).

AP: appressorium; GE: germ tube (tube de germination); CO: conidium (conidie).

Remarque:

L'appressorium (au pluriel : appressoria) est une structure formée par le gonflement et l'épaississement de l'extrémité du tube germinatif. Il a la capacité d'exercer une pression sur la cuticule et la pénétrer.

Le mode d'action des moisissures insecticides est le suivant :

- L'adhésion : elle se fait après la reconnaissance et la compatibilité avec l'insecte pathogène.
- La germination des spores.
- La différenciation du thalle pour former les tubes de germination et les appressoria.
- La pénétration des hyphes avec des enzymes diverses, notamment les protéases.
- Stopper le métabolisme de l'hôte (le paralyser et le tuer).
- Produire des substances antimicrobiennes pour inhiber les bactéries et autres microorganismes intestinaux de l'insecte, de même que les germes environnementaux (la moisissure s'assure de garder sa proie pour elle).

Les microorganismes utilisés pour inhiber la croissance des autres germes pathogènes ont souvent une action spécifique contre une espèce ou une maladie en particulier. Exemples :

Pythium oligandrum : utilisée pour prévenir la pourriture des racines.

Trichoderma harzianum et de *T. viride* utilisées pour traiter l'anthracnose.

Bacillus subtilis : utilisée contre l'agent de la pourriture grise (*Botrytis cinerea*).

8. Les microorganismes et la transgénèse végétale :

La transgénèse consiste à modifier le DNA d'une espèce par l'ajout de nouveaux gènes.

En microbiologie, certaines bactéries sont connues pour leur capacité à introduire des gènes dans le génome végétal. Le meilleur exemple étant celui d'*Agrobacterium tumefaciens*. Cette espèce phyto-pathogène contient un plasmide porteur du gène *ADN-T*. Une fois à l'intérieur de la cellule végétale, ce gène se déplace et intègre le noyau des cellules végétales où il s'exprime pour la production d'une protéine dite « opine ». Cette dernière est une source d'énergie inestimable pour la bactérie (c'est une protéine énergisante qui sera réabsorbée par la bactérie) (Figure 8).

En réponse à cette agression, la plante enclenche la production des facteurs de croissance, dont le plus important est l'auxine. Ces facteurs servent à cicatriser les blessures causées à la plante par la formation des structures tumorales dites « galle » (Figure 9).

⇒ Le gène *ADN-T* est donc responsable de la production de l'opine et des facteurs de croissance.

D'autres espèces du genre *Agrobacterium* sont capables de causer la galle chez les végétaux. Exemples : *A. fabrum*, *A. radiobacter* et *A. vitis*.

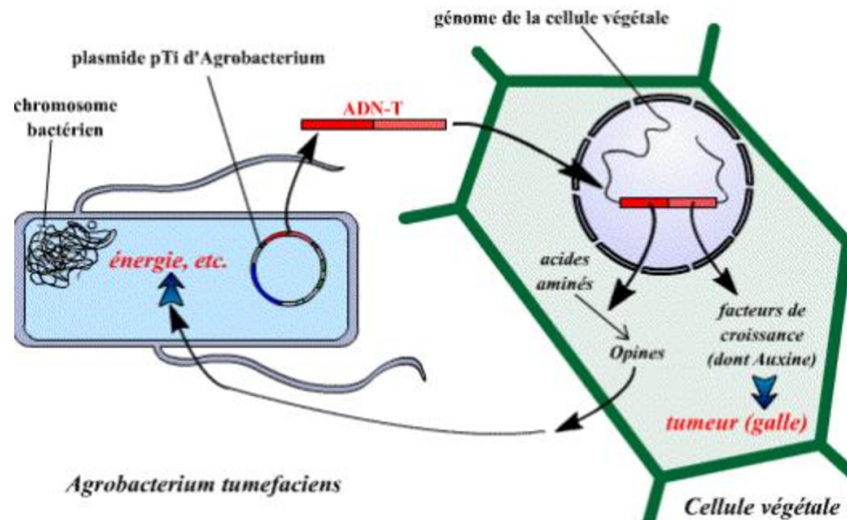


Figure 8 : Introduction du gène *ADN-T* dans les cellules végétales et son expression.



Figure 9 : Aspect des tumeurs végétales causées par la pénétration d'*Agrobacterium fabrum* (Diel 2017).

Actuellement, le gène *ADN-T* est remplacé par d'autres gènes qui induisent chez la plante la production de plusieurs molécules bénéfiques pour la croissance, le développement, la reproduction et la résistance contre les pathogènes. Exemples : la production des gibbérellines, des vitamines, des arômes, etc.

L'inoculation des bactéries modifiées aux plantes se fait après blessure de l'écorce végétale.

Remarques :

En temps normal, l'infection des plantes se fait par pénétration des pathogènes à travers des blessures ou par les insectes.

A. tumefaciens s'introduit dans la plante à travers les blessures car elle est attirée par les composés phénoliques libérés.