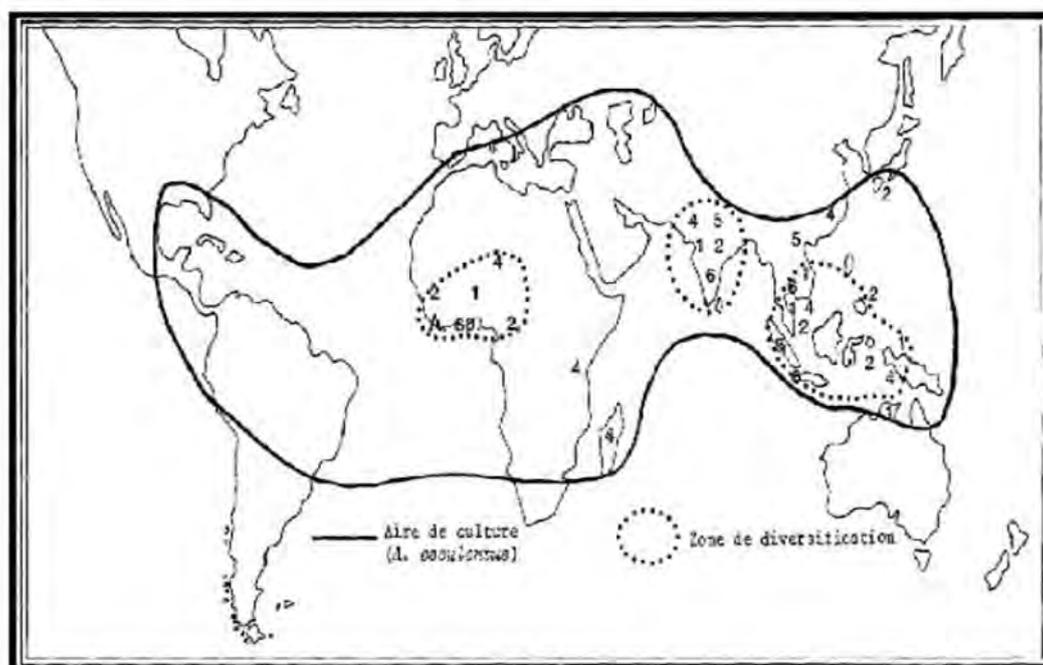


Gombo Origine et répartition géographiques

L'origine du gombo est toujours un sujet de controverse. En effet, selon Macleod et Ames (1990), le gombo est une plante originaire d'Afrique, connu depuis l'année 1216 avant J.C. pour ses fruits utilisés comme légumes. De Candolle (1883) avait proposé la même origine précisant que le gombo était déjà cultivé par les Egyptiens en 1216 avant J.C., tandis que Van Borssum Waalkes (1966), pense plutôt qu'il est originaire du Sud-est de l'Asie (Siemonsma, 1982c). Les gombos cultivés et les espèces sauvages apparentées ont été initialement classés dans le genre *Hibiscus*, section *Abelmoschus* par Linné (1737). En 1924, Hochreutiner a proposé de séparer le genre *Abelmoschus* du genre *Hibiscus*. La distinction entre les deux genres se fait actuellement sur le calice (Terrell et Winters, 1974).

Plante cosmopolite, les grands foyers de culture du gombo se localisent principalement en Asie du Sud-Est (Inde, Indonésie), en Amérique (Sud des Etats-Unis, Amérique latine), en Afrique et dans le bassin méditerranéen (Charrier, 1983).



Légende : 1 *A. moschatus* 2 *A. manihot* 4 *A. ficulneus*
5 *A. crinitus* 6 *A. angulosus* *A. sp. type Guinéen*

Figure 1. Répartition géographique des espèces du genre *Abelmoschus*

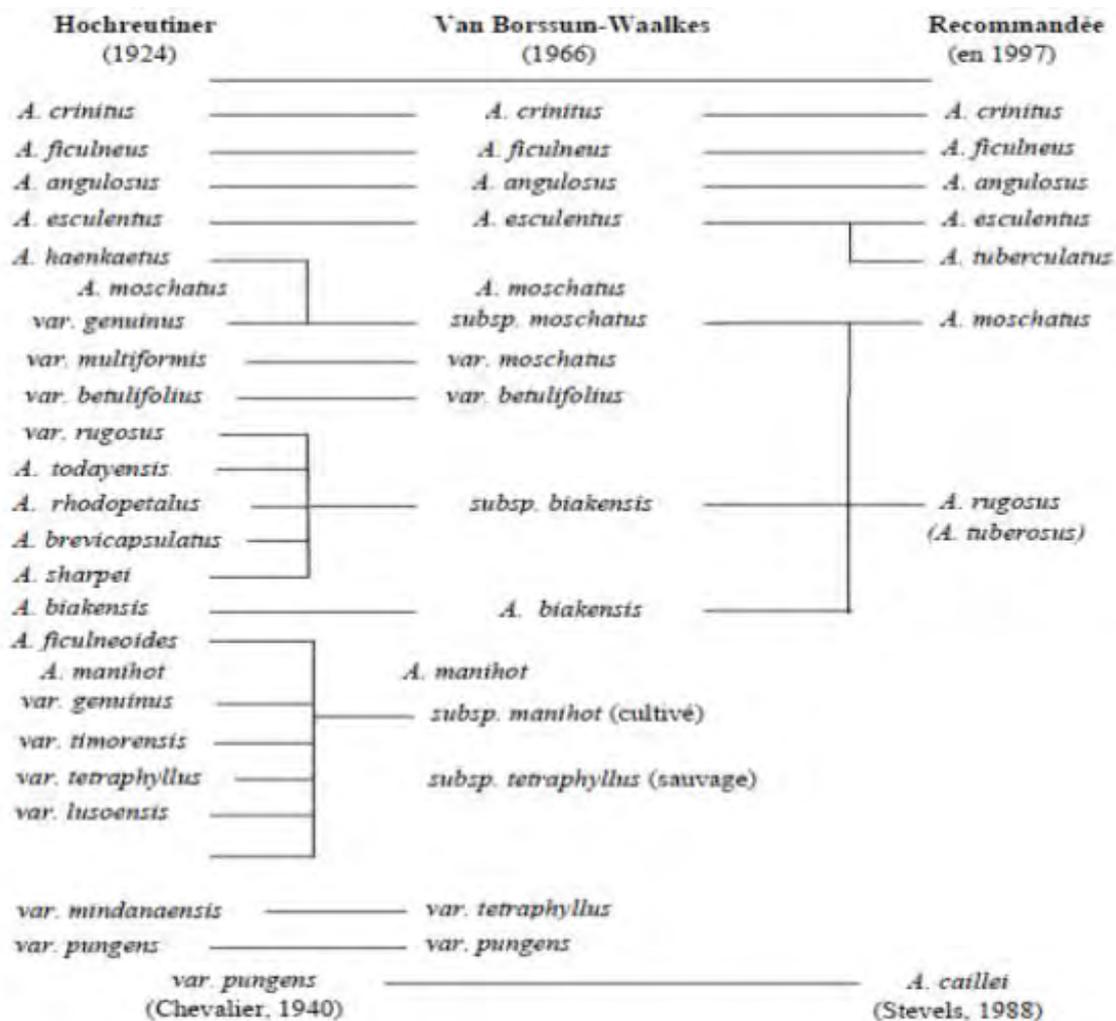
(Charrier et Hamon, 1982)

1.1.2. Systématique et description botanique

1.1.2.1. Taxonomie et diversité génétique

La systématique des gombos (tableau 1) est soumise à plusieurs modifications d'envergure quant au nom de genre (les gombos, autrefois rattachés au genre *Hibiscus*, forment aujourd'hui le genre *Abelmoschus*, au sein de la famille des malvacées) et au nombre d'espèces décrites (Hochreutiner, 1924 ; Van Borssum-Waalkes, 1966). L'étude taxonomique de Van Borssum-Waalkes (1966) retient six espèces parmi les treize proposées par Hochreutiner (1924). Ce sont les espèces *A. esculentus*, *A. manihot* et *A. moschatus* qui sont plus ou moins cultivées et les trois autres *A. crinitus*, *A. angulosus* et *A. ficulneoides* qui sont strictement spontanées. Une nouvelle espèce, *A. caillei*, découverte par Chevalier (1940) et décrite par Stevels (1988), est identifiée et a été largement étudiée par Siemonsma (1982a, 1982b).

Tableau 1. Evolution de la nomenclature des espèces du genre *Abelmoschus* (Charrier *et al.*, 1997)



Systématique de l'espèce (Classification phylogénétique APG II, 2003).

Règne	Plantae (Plantes)
Sous-règne	Tracheobionta
Division	Magnoliophyta (Angiospermes, Phanérogames)
Classe	Magnoliopsida (Dicotylédones)
Sous-classe	Dilleniidae
Ordre	Malvales
Famille	Malvaceae
Genre	<i>Abelmoschus</i>
Espèce	<i>Abelmoschus esculentus</i> L.



Photo 1. Plant de gombo (Crédit photo: Abdou Aziz GUEYE)

1.1.2.2. Description botanique

➤ Tige

L'espèce *A. esculentus* a une tige de forme cylindrique, de couleur pourpre ou verte, glabre ou légèrement pubescente. Etant érigée, la tige peut atteindre une hauteur de 1,5 à plus de 3 m et présente des ramifications dressées ou courbées vers le bas et qui sont plus ou moins importantes suivant les variétés. Elle se lignifie après un certain temps (De Lannoy, 2001 ; Siemonsma et Hamon, 2004).

Sur le plan agricole, on distingue deux groupes de variétés: les variétés à tiges courtes et celles à tiges longues. Cependant, il existe une large gamme de plantes dont la hauteur est intermédiaire (De Lannoy, 2001 ; Siemonsma et Hamon, 2004).

➤ Feuilles

Les feuilles du gombo (planche 1, photos A et A') sont alternes et présentent un limbe généralement palmatilobé (3 à 7 lobes plus ou moins divisés). Elles ont des dimensions variables pouvant aller de 20 à 40 cm. Elles sont plus souvent de couleur verte et parfois marquées de rainures rouges. Les feuilles comportent un long pétiole (jusqu'à 35 cm) et leur forme est variable sur un même pied. Leur forme est stable à partir de la huitième feuille (De Lannoy, 2001).

➤ Fleurs

Le gombo, comme la plupart des Malvacées, a des fleurs hermaphrodites, axillaires, solitaires et de grandes dimensions. Les fleurs (planche 1, photo B) sont comparables et sont de couleur crème, jaune ou jaune or avec une coloration rouge à la base des cinq grands pétales libres. Son mode de reproduction préférentielle est l'autogamie, soutenu par les indices calculés qui sont de l'ordre de 2 avec un taux très variable d'allogamie allant de 0 à 69 %. Les fleurs sont éphémères. L'anthèse se produit très tôt dans la matinée et est suivie par l'épanouissement de la fleur. Elles demeurent ouvertes toute la matinée pour se refermer qu'en milieu de l'après-midi. Ensuite, elles se fanent le soir et les pétales tombent dès le lendemain. Sous des conditions nuageuses et humides, l'ouverture de la fleur est plus souvent légèrement retardée (Dupriez et Leener, 1987 ; Charrier, 1983 ; Hamon, 1987 ; De Lannoy, 2001).

➤ Fruits

Le fruit de gombo (planche 1, photo C) est une capsule érigée, cylindrique, fusiforme, de section ronde ou anguleuse. Avec sa couleur variable (vert à rouge), il peut être légèrement

rugueux ou épineux. Les fruits sont récoltés quelques jours après la floraison. En effet, le fruit atteint sa croissance maximale dès la première semaine. Au-delà, il se lignifie et devient impropre à la consommation (Koechlin, 1989; De Lannoy, 2001).

➤ **Graines**

De forme globuleuse à ovoïde, glabres ou duveteuses, les graines de gombo (planche 1, photo D) sont assez grosses et de couleur grise. Lorsque les graines sont conservées dans les meilleures conditions, elles peuvent garder leur pouvoir germinatif pendant plus de deux ans (De Lannoy, 2001).

➤ **Racines**

Le système racinaire du gombo (planche 1, photo E) est pivotant avec de nombreuses racines secondaires. Il permet à la plante de se fixer profondément dans le sol et d'y puiser l'eau et les sels minéraux dont elle a besoin pour son développement (De Lannoy, 2001).

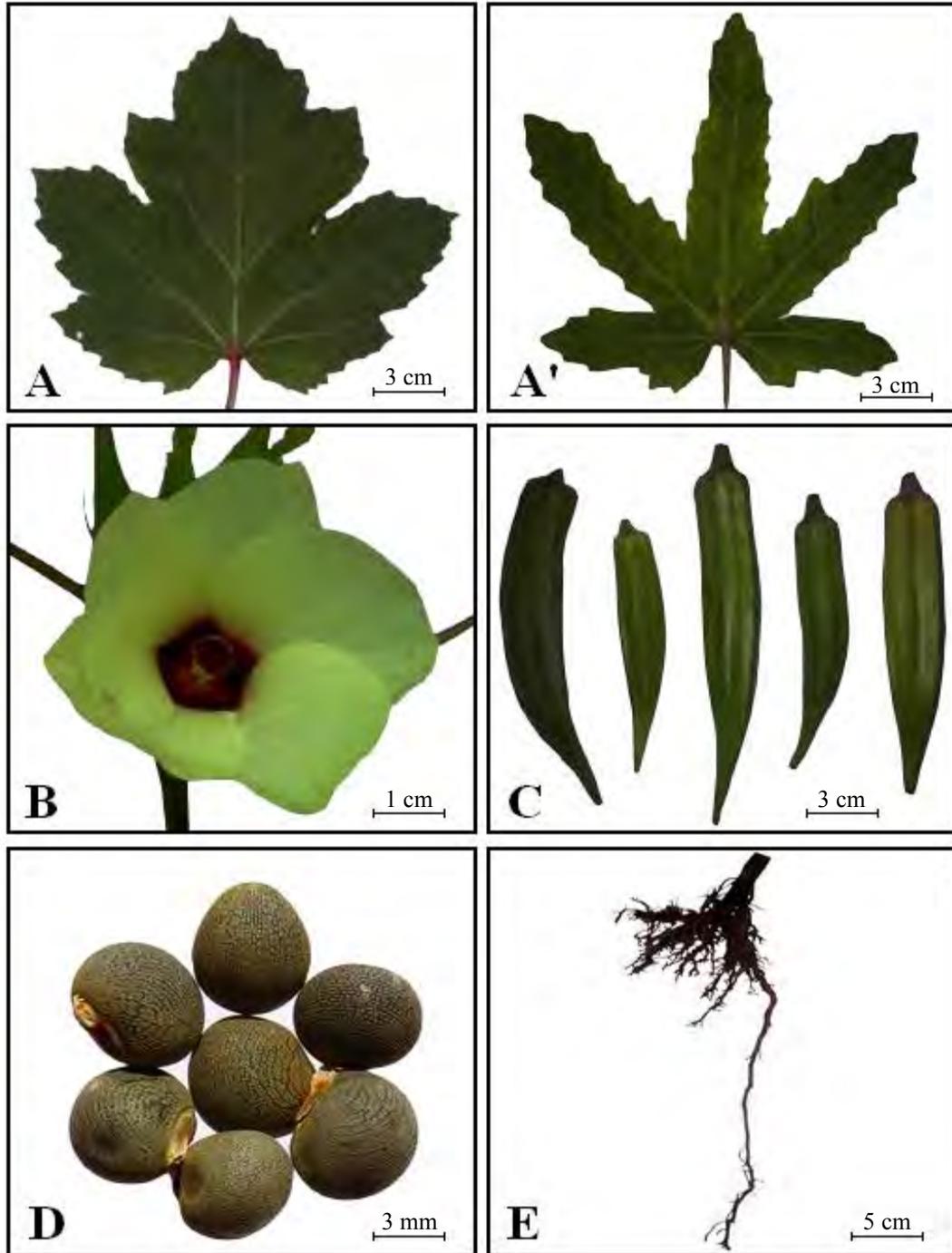


Planche 1. Quelques caractères botaniques du gombo (Crédit photo: Abdou Aziz GUEYE)

(A et A': Feuilles ; B: Fleur ; C: Fruits ; D: Graines ; E: Racines)

1.1.3. *Abelmoschus esculentus* Var. Clemson Spineless

La culture du gombo repose largement sur des variétés lignées et améliorées de *Abelmoschus esculentus*. Elles produisent des fruits sans épines dont la couleur va du blanc crémeux au rouge violacé en passant par le vert foncé. Beaucoup de variétés ont des arêtes marquées sur le fruit. Les cultivateurs portent leur choix sur les plantes précoces, de petite taille, qui résistent suffisamment aux maladies et aux insectes (Charrier *et al.*, 1997).

La variété Clemson Spineless est sélectionnée aux Etats-Unis. C'est la seule variété largement diffusée par les sociétés de production de semences. La plante est entièrement verte et atteint un peu plus de 1,5 m en fin de cycle. Ses feuilles sont assez découpées et ses fruits, présentant 6 à 7 arêtes, mesurent environ 12 cm à maturité complète.

Sa production débute environ 2 mois après le semis. Sa très grande sensibilité aux virus et aux nématodes demeure un inconvénient majeur, surtout en zone tropicale. En Afrique tropicale, son optimum de production se situe en contre-saison, où elle a un franc succès suite aux cours très élevés du gombo à cette période. Clemson Spineless est très bien adaptée aux climats méditerranéen (Egypte, Grèce, Turquie) et tropical sec (Sénégal). Selon Charrier *et al.* (1997), elle est plus chétive en climat tropical humide (Antilles, Côte d'Ivoire).

1.1.4. Biologie et mode de reproduction

Les plantes de gombo se caractérisent par une croissance indéterminée. Ils ont une floraison continue mais très dépendante des stress biotiques et abiotiques (Charrier *et al.*, 1997). Selon la variété et les conditions climatiques, la floraison se produit un à deux mois après semis (Charrier, 1983).

Pour *A. esculentus*, il y a alors émission d'une fleur, uniquement au niveau de l'axe orthotrope tous les deux ou trois jours. Le nombre de fleurs épanouies par jour peut-être d'une quinzaine pour les espèces telles que *A. moschatus*, *A. manihot* et *A. caillei* et dépend du degré de ramification, alors que leurs exigences photopériodiques sont encore mal connues. Le fruit du gombo est une capsule. Sa croissance est rapide pouvant atteindre 5 centimètres de long après 3 jours de floraison. Cette période correspond au stade de récolte le plus fréquent pour la consommation en frais du gombo (Charrier *et al.*, 1997).

Les espèces du genre *Abelmoschus* ont toutes des fleurs hermaphrodites, dont les pétales, le plus souvent de couleur jaune, attirent de nombreux insectes. Leur floraison est fugace: les fleurs s'épanouissent le matin peu avant l'aube et se flétrissent au milieu de l'après-midi. Le

style, long de 3 à 5 centimètres, est entouré d'une colonne staminale pouvant porter plus d'une centaine d'anthers. L'autopollen des anthers supérieures est mis en contact avec les stigmates par simple élongation de la colonne staminale ou par l'intermédiaire des insectes. Ces derniers sont susceptibles aussi de véhiculer de l'allopollen. La germination de l'autopollen est toujours possible ; et il n'y a pas d'auto-incompatibilité, sans que l'autogamie soit stricte pour autant. Des taux d'allogamie très variables, de 0 à 69 %, ont été observés pour *A. esculentus* (Charrier, 1984).

1.1.5. Importances du gombo: potentialités alimentaires et intérêt socio-économique

Le gombo (*Abelmoschus esculentus*) est une plante exceptionnelle et originale car toutes ses parties (racines, tige, feuilles, fruits et graines) sont valorisées sur les plans alimentaire, médicinal, artisanal et même industriel (Marius *et al.*, 1997).

Les feuilles et les fruits immatures du gombo sont consommés comme légumes. Ils confèrent aux sauces une consistance mucilagineuse gluante très caractéristique. Les fruits très parfumés gagnent à être consommés avant que les graines ne durcissent, car celles-ci sont très nutritives lorsqu'elles sont immatures (Dupriez et Leener, 1987). Les graines torrifiées de gombo sont employées dans certaines régions du Nigeria comme substitut du café (Siemonsma et Hamon, 2004). Il a été montré également que l'eau extraite à partir des polysaccharides du gombo pourrait être utilisée comme substitut de blanc d'œuf (Constantino *et al.*, 2006). La graine constitue une source de protéines (20% de la Matière Sèche: M.S) et d'huile végétale (14% de la M.S) (Martin et Ruberte, 1978 ; Shadmanov et Nigmatova, 1976 ; Charrier, 1983).

L'huile issue des graines de gombo est riche en protéines et en éléments minéraux comme le phosphore, le magnésium, le calcium et le potassium (Nzikou *et al.*, 2006). Le gombo est assez pauvre en vitamines mais sa valeur nutritive est meilleure, certes loin derrière la carotte mais devant la tomate (Hamon et Charrier, 1997).

En médecine, des études réalisées en Chine ont révélé qu'un extrait alcoolique de feuilles de gombo est susceptible d'éliminer les radicaux libres de l'oxygène, d'améliorer les fonctions rénales et de réduire la protéinurie (Siemonsma et Kouame, 2004). Il existe même des variétés qui sont recommandées pour faciliter ou enrichir la nutrition des malades. De même, ses vertus thérapeutiques ont été argumentées par Lapointe (1987) et Nacoulma (1996). Les feuilles sont parfois utilisées comme base de cataplasmes, comme émollient, sudorifique ou antiscorbutique et pour traiter la dysurie (Siemonsma et Hamon, 2004). Les jeunes fruits contiennent un mucilage ayant des propriétés variées de stabilisateurs des dispersions, substitut de plasma

sanguin, fluidifiant des systèmes liquides et sanguin (Martin *et al.*, 1981 ; Marius *et al.*, 1997). Les graines sont antispasmodiques et stimulantes et leur infusion a des propriétés sudorifiques (Chopra *et al.*, 1986).

La tige est constituée de fibres qui sont utilisées localement pour la confection de cordes, de sacs, de paniers, de lignes de pêche et de pièges à gibier. Les fibres servent aussi dans l'industrie textile et dans la fabrication de papier et de carton (Marius *et al.*, 1997 ; De Lannoy, 2001 ; Siemonsma et Hamon, 2004 ; Shamsul et Arifuzzaman, 2007). Les graines de gombo constituent une source d'huile à usage comestible après raffinage (Nzikou *et al.*, 2006).

Tableau 2. Valeur nutritive pour 100 g de gombo consommés (Grubben, 1977 ; Charrier, 1983)

Eléments nutritifs	Unités	Organes	
		Fruits	Feuilles
Matière sèche	G	10,40	10,00
Protéines		1,80	2,00
Energie	Kcal	31,00	33,00
Calcium	Mg	90,00	70,00
Fer		1,00	1,00
Carotène		0,10	0,99
Thiamine		0,07	0,10
Riboflavine		0,08	0,10
Niacine		0,80	1,00
Vitamine C		18,00	25,00

1.1.6. Production mondiale

Selon les données de la FAOSTAT (2015), la production mondiale de gombo pour l'année 2013 était estimée à 8 946 599 tonnes. Les principaux pays producteurs dans le monde étaient l'Inde (6 350 000 tonnes), le Nigéria (1 100 000 tonnes), le Soudan (263 263 tonnes), le Soudan du Sud (257 100 tonnes) et l'Irak (142 409 tonnes). Pour la même année, la production nationale de gombo au Sénégal était estimée à 23 711 tonnes soit 0,27% de la production mondiale.

Tableau 3. Principaux pays producteurs de gombo dans le monde

Pays	Production (en tonnes)	Pourcentage (%)
Inde	6 350 000	70,98
Nigéria	1 100 000	12,29
Soudan	263 263	2,94
Soudan du Sud	257 100	2,87
Irak	142 409	1,59
Côte d'Ivoire	139 094	1,55
Pakistan	108 426	1,21
Égypte	97 457	1,09
Production mondiale	8 946 599	100

(Source: FAOSTAT, 2015)

1.1.7. Les ennemis du gombo et les moyens de lutte

Noms	Dégâts	Traitements
Chenilles (<i>Xanthodes graellsii</i> , <i>Earia spp</i> , <i>Heliothis armigera</i>): plusieurs chenilles attaquent le gombo.	<ul style="list-style-type: none"> - rongent le feuillage ; - trouent les capsules et attaquent les fleurs. 	<ul style="list-style-type: none"> - Acéphate - endosulfan - cyperméthrine - deltaméthrine - cyfluthrine
Jassides (<i>Jacobiasca lybica</i>): insectes piqueurs-suceurs que l'on trouve sur la face inférieure des feuilles.	Jaunissement des feuilles, celles-ci se recroquevillent en cuillère et peuvent tomber en cas de forte attaque.	<ul style="list-style-type: none"> - Diméthoate - acéphate - endosulfan
Altises (<i>Nisotra uniformis</i>): petits coléoptères bruns clairs sur le dessous des feuilles.	Ils perforent les feuilles de petits trous. Dégâts parfois très graves sur jeunes semis et jeunes plantes.	<ul style="list-style-type: none"> - Diméthoate - acéphate - endosulfan
Cétoines (<i>Pachnoda sp.</i>): gros coléoptères.	Ils dévorent feuilles, tiges, fleurs et capsules.	<ul style="list-style-type: none"> - destruction manuelle - diméthoate - deltaméthrine
Le blanc : maladie des feuilles provoquée par un champignon (<i>Oïdium abelmoschi</i>).	Sur les deux faces des feuilles, des tâches poudreuses blanches recouvrent progressivement la plante de bas en haut.	<ul style="list-style-type: none"> - cultivars résistants - soufre - triforine - triadimefon - fenarimol - pyrazoPhos - chinométhionate
Cercosporiose : maladie des feuilles provoquée par un champignon (<i>Cercospora fuliginea</i> , <i>C. abelmoschi</i>)	<ul style="list-style-type: none"> - Tâches verts, jaunes à noirâtres sur les feuilles avec, à la face inférieure, des tâches d'abord grises puis noires - Les feuilles s'enroulent et se dessèchent. 	<ul style="list-style-type: none"> - Manèbe - mancozèbe - zinèbe - captafol - benomyl
Flétrissement : maladie provoquée par un champignon (<i>Fusarium oxysporum</i>).	<ul style="list-style-type: none"> - Flétrissement de la plante, parfois d'un côté seulement - En coupant la tige en oblique, on observe des stries brunes. 	<ul style="list-style-type: none"> - rotation culturale d'au moins 3 ans - cultivars tolérant - peltar (3kg /ha)
Nématodes (<i>Meloidogyne spp.</i>)	<ul style="list-style-type: none"> - Nodosités sur les racines - Mauvais développement de la plante - Dégâts parfois très sévères. 	<ul style="list-style-type: none"> - rotation culturale - nématicide - furandan à raison de 20 kg/ha

(Source: CDH, 1984, 1987)

1.2. Stress et salinité

1.2.1. Salinité

1.2.1.1. Salinisation

La salinisation est un processus d'enrichissement du sol en sels solubles qui aboutit à la formation d'un sol salin (Keren, 2000 ; Levy, 2000 ; Brady et Weil, 2002 ; Essington, 2004). D'après François (2008), la salinisation est un phénomène par lequel un sol devient sursalé. Elle résulte le plus souvent de l'irrigation de sols mal drainés sous climat aride. La stagnation de l'eau dans les couches superficielles du sol par défaut de drainage se traduit par une accumulation de sels dans les horizons les plus superficiels, car les mouvements ascendants, liés à la forte évaporation due au climat chaud et aride, excèdent de beaucoup l'infiltration et donc le lessivage (figure 2). Selon Mermoud (2001), ce phénomène d'accumulation des sels solubles (en particulier le sodium) à la surface du sol et dans la zone racinaire, occasionne des effets nocifs sur les végétaux qui vont induire une diminution des rendements et une stérilisation du sol.

La salinisation des sols est un processus anthropogénique, alors que la salinité du sol est un élément naturel et un facteur écologique constitué par la teneur en sel (5‰ NaCl) des eaux ou des sols (François, 2008). La salinité découle de la présence de solutés majeurs dissouts dans les eaux ou dans les sols. C'est la mesure de la totalité des sels dissouts, (Slama, 2004). C'est un facteur limitant pour de nombreux écosystèmes. L'excès de sel dans les sols empêche le développement d'une végétation normale, seules quelques plantes halophiles pouvant y croître.

La salinisation des terres est un problème majeur à l'échelle du globe. Selon les estimations récentes, elle a déjà affecté au moins 400 millions d'ha et en menace gravement une surface équivalente (Baatour *et al.*, 2004 ; IRD, 2008). Le monde perd en moyenne 10 hectares de terres cultivables par minute dont 3 ha (plus de 1,5 Mha par an) à cause de la salinisation (Kovda, 1983). En Afrique, près de 40 Mha sont affectés par la salinisation, soit près de 2% de la surface totale. Au Sénégal, sur les 3,8 M ha cultivables, plus de 1,23 M ha sont affectés par la salinisation (MEPN, 2005).

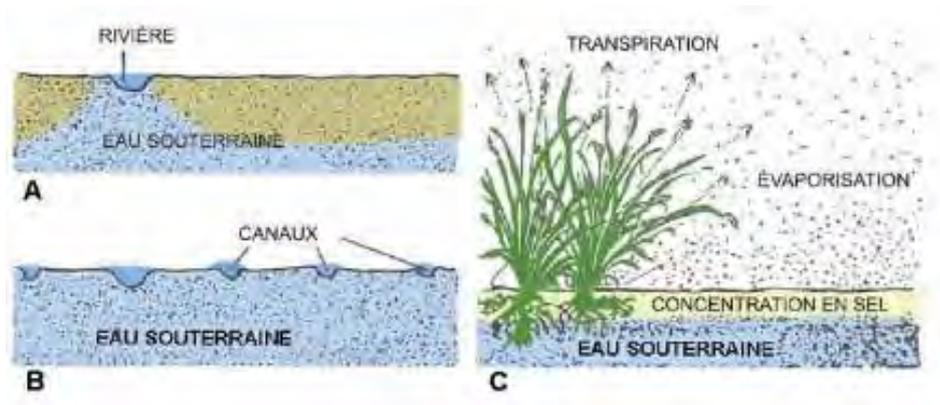


Figure 2. Le mécanisme du phénomène de salinisation des sols (François, 2008)

A: Irrigation

B: Stagnation de l'eau dans les sols due au manque de drainage

C: Accumulation des sels en surface suite à l'évaporation

1.2.1.2. Origine de la salinité

Bien que l'altération des roches et les minéraux primaires soit la principale source de tous les sels, les sols salés sont rarement formés par accumulation de sels *in situ*. Plusieurs causes sont à l'origine de ce phénomène (Maillard, 2001).

- **Salinisation primaire (ou naturelle)**

La salinisation des terres est à 80% d'origine naturelle. On parle alors de salinisation "primaire" (Mashali *et al.*, 2005). Elle est liée purement au sol, où les sels solubles se forment essentiellement d'un processus d'altération des roches mères (Le Goupil, 1974) ou à des apports naturels externes (Mashali *et al.*, 2005). Ce type de sol est très fréquent dans les zones arides dû à une évapotranspiration potentielle du sol qui dépasse largement la quantité d'eau arrivée au sol (Antipolis, 2003).

- **Salinisation secondaire (anthropique)**

Les 20% des terres salinisées ont une origine "anthropique": on parle alors de salinisation "secondaire" (FAO, 2008). Cette dernière est le résultat des activités humaines modifiant l'équilibre hydrologique du sol entre l'eau appliquée (irrigation ou pluie) et l'eau utilisée par les cultures (transpiration). Les sols peuvent être affectés par une salinisation secondaire due principalement au défrichage et au remplacement de la végétation pérenne par les cultures annuelles (Antipolis, 2003), ainsi qu'à l'irrigation des terres avec une eau de mauvaise qualité (eau saline), un lessivage insuffisant et un drainage défaillant (Le Goupil, 1974). De même,

l'emploi des engrais d'une manière excessive et sans lessivage peut aggraver le problème de salinité. Exemple: emploi du KCl sur un sol à salure chlorurée. (Bakhti, 2005).

1.2.1.3. Genèse d'un sol salin et/ou sodique

La formation d'un sol salin ou sodique résulte généralement de l'accumulation des sels dans les horizons de surface (Churchman *et al.*, 1993 ; Naidu et Rengasamy, 1993 ; Sumner, 1993 ; Keren, 2000 ; Levy, 2000 ; Brady et Weil, 2002 ; Essington, 2004). Les paramètres les plus importants qui manifestent la genèse d'un sol salin (Tableau 4) sont le régime hydrique du sol, la forme des sels, les conditions climatiques et la texture des sols. Les sels les plus communs et présents dans le sol correspondent aux cations Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , et aux anions Cl^- , SO_4^{2-} , CO_3^{2-} , NO_3^- . De même, les éléments traces tels que le bore, le sélénium, l'arsenic et le molybdène sont considérés comme d'autres sels moins courants et plus toxiques à faibles concentrations (Keren, 2000 ; Essington, 2004). De façon analogue à la formation d'un sol salin, un sol devient sodique lorsque la proportion d'ions Na^+ dépasse celle des autres électrolytes de plusieurs ordres de grandeur (Sumner, 1993 ; Levy, 2000 ; Essington, 2004). Cela dépend de la source de sels mais aussi des conditions physico-chimiques du sol.

D'après Bolt *et al.* (1978), la salinité se produit si:

$$\text{CEi} \times \text{Qi} > \text{CEd} \times \text{Qd}$$

CEi: conductivité électrique moyenne de l'eau d'irrigation.

Qi: quantité d'eau d'irrigation.

CEd: conductivité électrique moyenne de l'eau de drainage.

Qd: quantité d'eau de drainage

Tableau 4. Caractéristiques des sols salins (Maillard, 2001)

Caractéristiques	Sols salins
<i>Chimique</i>	<p>Dominés par des sels solubles neutres: chlorure et sulfates de sodium, calcium et magnésium.</p> <p>pH de l'extrait de sol saturé généralement de moins de 8,2 (8,7 dans d'autres ouvrages)</p> <p>Une électro-conductivité (EC) de l'extrait de sol saturé de plus de 4 dS/m à 25 °C est en général la limite acceptée. Cependant le « Soil Science Society of America » établit une limite à 2 dS/m.</p> <p>Généralement pas de relation bien définie entre le pH de l'extrait de sol saturé et l'ESP ou le coefficient d'absorption du Sodium (Sodium Absorption Ration ou SAR) de l'extrait de sol saturé.</p> <p>Des quantités appréciables de composés calciques solubles peuvent s'y trouver (tel que le gypse)</p>
<i>Physique</i>	<p>En présence excessive de sels solubles neutres, la fraction est floculée et le sol est stable.</p> <p>La perméabilité à l'eau et à l'air de ces sols est généralement comparable à ceux des sols « normaux ».</p>
<i>Effet sur la croissance des plantes</i>	<p>La croissance des plantes est affectée par l'action des sels solubles sur la pression osmotique de la solution du sol entraînant une diminution de la disponibilité en eau.</p> <p>Toxicité des ions tels que Na, Cl, B, etc.</p>
<i>Amélioration du sol</i>	<p>L'amélioration des sols salins se fait par le lessivage des sels solubles dans la zone racinaire du sol. L'application d'amendements n'est généralement pas nécessaire</p>

Tableau 5. Classes de la salinité des sols (Maillard, 2001)

Classes	Conductivité de l'extrait de sol saturé (dS/m)
<i>Non salins</i>	0-2
<i>Légèrement salins</i>	2-4
<i>Modérément salins</i>	4-8
<i>Fortement salins</i>	8-16
<i>Très fortement salins</i>	>16

1.2.1.4. Effets de la salinité sur les plantes

La salinité constitue l'un des facteurs abiotiques les plus répandus au niveau de la planète et qui limite fortement les rendements agricoles (Khales et Baaziz, 2006). L'effet de la salinité se manifeste généralement chez la plupart des plantes cultivées par un effet dépressif sur la croissance et le développement (Munns *et al.*, 1995). Cet effet néfaste se traduit par des changements morphologiques, physiologiques, biochimiques et moléculaires qui affecte négativement la croissance et la productivité végétale (Wang *et al.*, 2001 ; Ashraf et Harris, 2004).

- **Effet de la salinité sur la germination et la levée**

Selon Maillard (2001) et Abdelly (2006), la plupart des plantes sont plus sensibles à la salinité durant leurs phases de germination et de levée. L'effet de la salinité sur la germination des graines peut être partiellement osmotique ou dû à la toxicité des ions qui peut altérer le processus physiologique comme l'activité enzymatique (Croser *et al.*, 2001). La salinité ralentit la vitesse de germination, ce qui expose plus les semences aux risques (Slama, 2004). Il a été démontré que la salinité inhibe la germination par son effet osmotique (Karmous, 2007). Selon une étude menée par Askri *et al.* (2007), sur des graines de pastèque (*Citrullus latanus* L.), des concentrations de 50 et 100 mM de NaCl réduisent considérablement la vitesse et la capacité de germination de ces dernières.

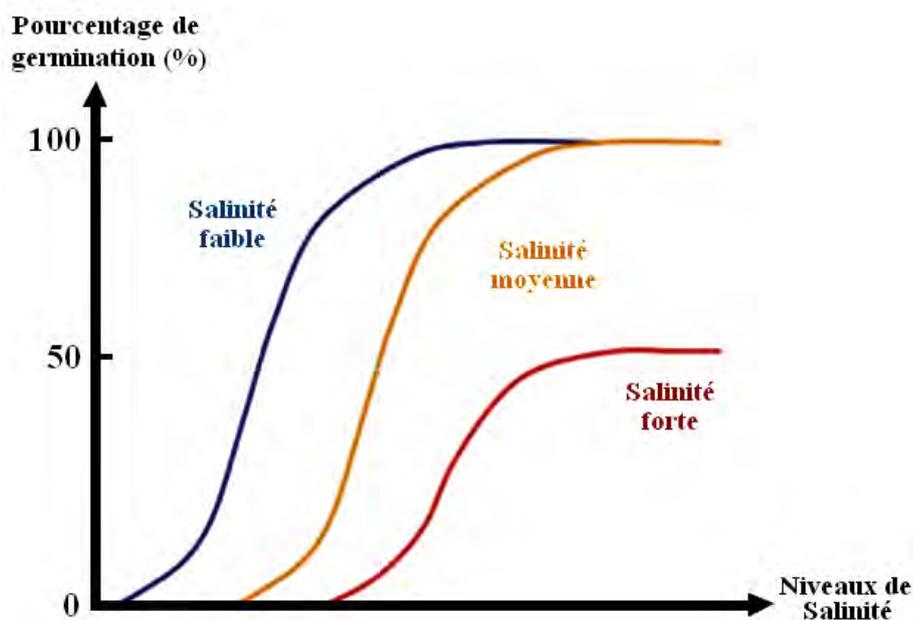


Figure 3. Diminution du pourcentage de germination avec l'augmentation de la salinité (Lauchli et Grattan, 2007)

- **Effet de la salinité sur la croissance et le développement de la plante**

Plusieurs recherches ont montré la réduction de croissance de plantes en raison du stress salin, chez la tomate (Romero-Aranda *et al.*, 2001), le coton (Meloni *et al.*, 2001) et la betterave à sucre (Ghoulam *et al.*, 2002). L'effet de la salinité s'exprime généralement, chez la plupart des plantes cultivées, par un effet dépressif sur la croissance et le développement (Munns *et al.*, 1995). Il se traduit souvent, d'après Läuchli et Epstein (1990), par une réduction de la croissance végétative, qui est fonction de la division et de l'élongation cellulaire. Selon Katerji *et al.* (2006), l'effet du sel se manifeste généralement par une réduction de la croissance en hauteur. Ceci est dû au fait que la plante utilise une proportion de ses ressources énergétiques pour la régulation osmotique et ionique nécessaire pour la turgescence cellulaire, donc moins d'énergie disponible pour les exigences de la plante (Shannon, 1984). La salinité affecte le développement de la plante en particulier la croissance des racines (Läuchli et Epstein, 1990). Il a été montré par Bayuelo *et al.* (2002) que la salinité augmente le rapport Partie Racinaire (PR)/Partie Aérienne (PA). En effet, les plantes maintiennent une croissance racinaire relativement importante sous forte contrainte saline, l'augmentation du rapport PR/PA semble être associée à une amélioration de leur tolérance au sel.

- **Effet de la salinité sur la photosynthèse et les échanges gazeux**

La salinité affecte l'activité physiologique de la feuille, et plus particulièrement la photosynthèse, qui présente la cause principale de la réduction de la productivité végétale (Alem *et al.*, 2002). D'après Munns et Tester (2008), la réduction de la photosynthèse est liée à la diminution du potentiel hydrique foliaire, qui est à l'origine de la fermeture des stomates (Price et Hendry, 1991 ; Allen, 1995). Cette fermeture conduit à une réduction de la conductance stomatique (Orcutt et Nilsen, 2000). La diffusion du CO₂ à l'intérieur des stomates devient alors limitée et sa fixation au niveau des chloroplastes diminue (Graam et Boyer, 1990), par conséquent, la régénération du RuBP (Ribulose Biphosphate) devient limitée (Gimenez *et al.*, 1992). Le contrôle et la régulation stomatique font intervenir la turgescence cellulaire mais également des hormones telles que l'acide abscissique (ABA) (Zhang et Davies, 1989).

- **Effet de la salinité sur la physiologie de la reproduction**

Selon Hu *et al.* (2005) la salinité réduit le taux de croissance de la plante et ses organes reproducteurs. D'après les études de Khan et Abdullah (2003), le nombre de pollen dans deux différents types de cultivars de blé a été réduit de 24 à 37%. L'effet de l'accumulation du sel dans le méristème du blé sur la reproduction et le développement a été étudié par Munns et

Rawson (1999). Ils ont constaté que les courtes périodes de stress salin pendant l'organogénèse peuvent avoir des conséquences irréversibles sur la fertilité de l'épi de blé, En effet, elles provoquent l'avortement des ovaires.

- **Effet de la salinité sur le rendement agronomique**

Munns et Rawson (1999) ont montré que tous les paramètres de rendement subissent une réduction sous l'action de la salinité et que, plus la salinité est élevée plus le rendement est réduit.

1.2.1.5. Tolérance des plantes à la salinité

La tolérance au sel a été définie comme étant la capacité d'une plante à s'adapter durant son cycle de vie sur un substrat à fortes concentrations de sel soluble. Toutes les plantes ne réagissent pas de la même manière aux contraintes salines. Munns et Tester (2008) ont établi les limites de tolérance à la salinité des espèces d'intérêt agronomique. Leur classification est effectuée selon le taux de réduction du rendement sous l'effet du sel à diverses concentrations mesurées en mM (Figure 4).

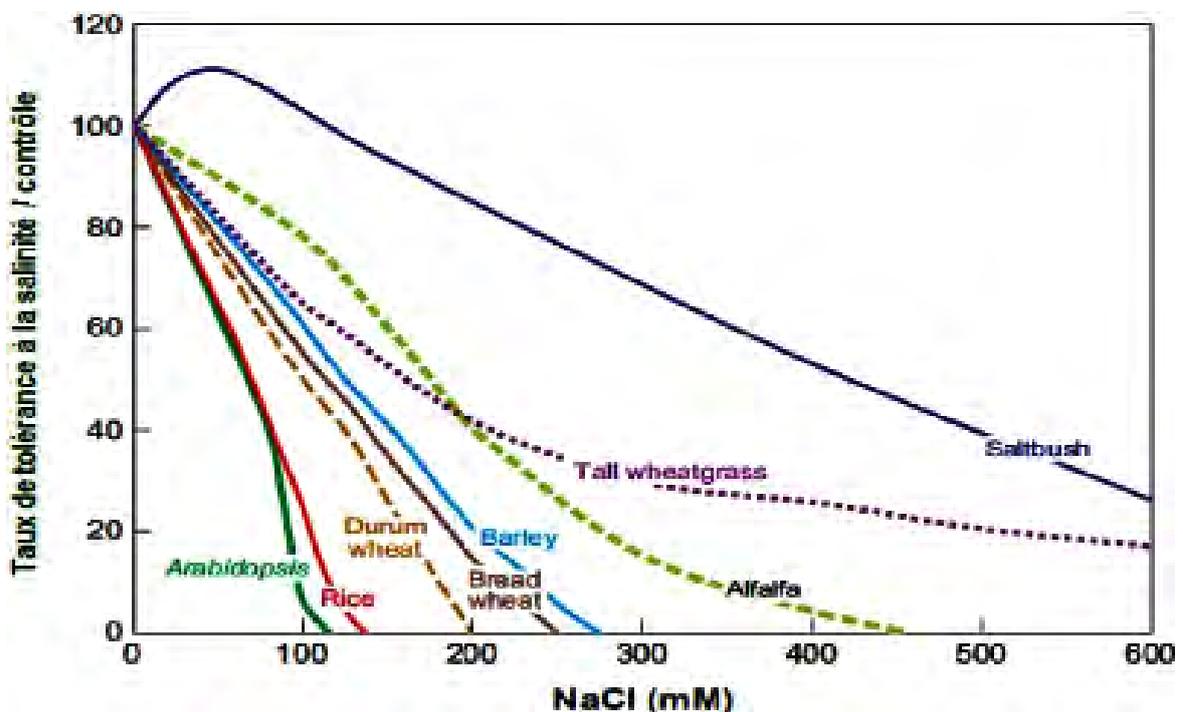


Figure 4. Classification des plantes selon leur niveau de tolérance à la salinité en fonction de la concentration en sel (Munns et Tester, 2008)

La classification révèle deux groupes : les halophytes et les glycophytes.

– **Les halophytes**

Les halophytes sont, selon Tester et Davenport (2008), des plantes capables de se développer et de croître sous un régime salin de 300 mM de NaCl. Flowers et Läuchli (1983) définissent les halophytes comme des plantes d'environnement salin dont le rapport K/Na tend à être plus bas, et la concentration ionique globale plus élevée que chez les glycophytes.

Levigneron *et al.* (1995), classent les halophytes en deux catégories:

- Les plantes de type *include* (inclusif):

Le sel montant est piégé et stocké dans les cellules des parties aériennes, plus particulièrement dans leur vacuole grâce à des systèmes de "pompes" moléculaires (Levigneron *et al.*, 1995 ; Levitt, 1980). A l'échelle de la plante entière, les ions chlorure et sodium entrent par les racines et sont véhiculés par la sève xylémique jusqu'aux tiges et aux feuilles là où ils sont stockés (Levigneron *et al.*, 1995).

- Les plantes de type *exclude* (exclusif):

Le sel véhiculé jusqu'aux feuilles, faute d'y être piégé, est réexporté vers les racines par le phloème. Les cellules racinaires assurent la protection des parties aériennes, en limitant la quantité de sodium transportée par le xylème capacité et stockent les ions Na⁺ et Cl⁻ dans la vacuole (Levigneron *et al.*, 1995).

– **Les glycophytes**

Les glycophytes sont définis comme des plantes d'environnement « doux » ou non salin, qui ont normalement un rapport K/Na élevé dans leurs feuilles (Flowers et Läuchli, 1983). Ils ne sont pas susceptibles de survivre dans des conditions salines. Cependant, ils utilisent certaines stratégies des halophytes pour faire face au sel (Yokoi *et al.*, 2002). Les glycophytes ont des comportements soit inclusifs ou exclusifs selon les génotypes (Chinnusamy *et al.*, 2005).

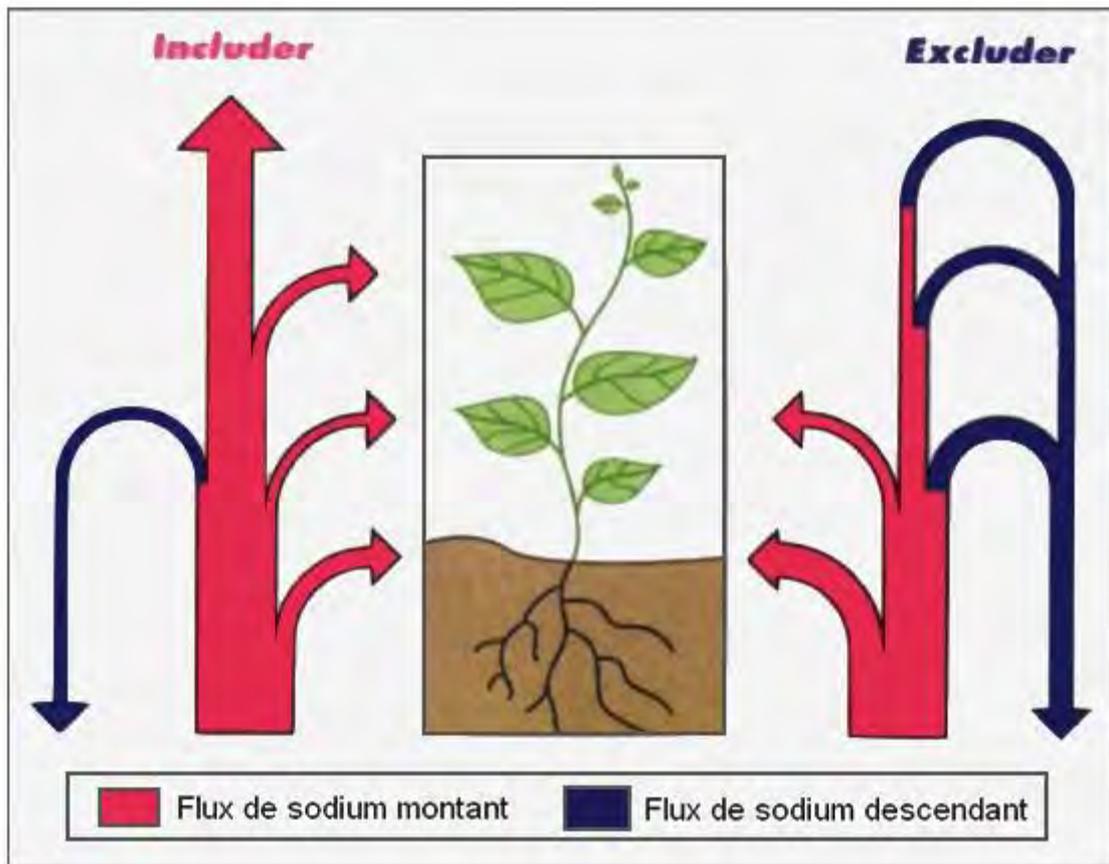


Figure 5. Schématisation du bilan de la circulation du sodium dans les plantes de type *include* (inclusif) ou *exclude* (exclusif) (Levigneron *et al.*, 1995)

1.2.1.6. Mécanismes de la tolérance des végétaux au stress salin

Les mécanismes de tolérance à la salinité s'effectuent à différents niveaux de la plante. Le contrôle se fait essentiellement dans les vacuoles (Niu *et al.*, 1995 ; Yeo, 1998 ; Horie et Schroeder, 2004) , à l'échelle de la plante entière, et éventuellement dans les organes les moins sensibles (Cheeseman, 1988 ; Munns, 1993).

Les mécanismes physiologiques de tolérance à la salinité de la plante entière dépendent de la capacité de celle-ci à contrôler l'absorption et le transport du sel à différents niveaux de la plante (Munns et Tester, 2008) (Figure 6).

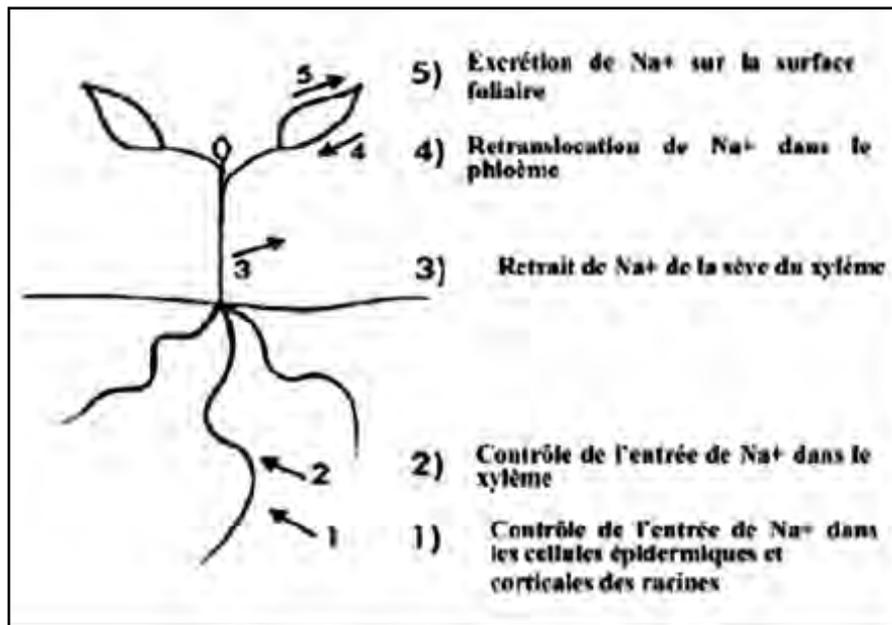


Figure 6. Les points de contrôle et de la régulation de transport du sel au niveau de la plante (Munns, 2002)

Il existe diverses stratégies de tolérance ou de résistance des plantes à la salinité, suivant la (ou les) composante(s) du stress salin qui domine (nt):

– L'exclusion des ions

La plante empêche le sel de remonter jusqu'aux feuilles. Une première barrière existe au niveau de l'endoderme, couche interne des cellules de la racine, ainsi que le transport sélectif permet d'absorber les ions nutritifs utiles et de ré-excréter les ions Na^+ (Genoux *et al.*, 1991). Cependant, cette barrière peut être interrompue, en particulier lors de l'émergence des ramifications de la racine. D'autres mécanismes limitent le passage du sel des racines vers les feuilles mais les gènes qui les gouvernent sont encore largement inconnus (Sentenac et Berthomieu, 2003).

– L'inclusion et la compartimentation des ions

L'inclusion et la compartimentation constituent la stratégie la plus efficace pour éviter la toxicité de Na^+ sur des sites métaboliques dans le cytoplasme (Jebnoute, 2008). En effet, le sel est utilisé par la plante pour l'ajustement de la pression osmotique de ses cellules. La plante capte le sel qui parvient aux feuilles au même titre que l'eau par le mouvement ascendant de la sève dans les vaisseaux. Le sel est alors stocké dans les vacuoles grâce à des systèmes de "pompes" moléculaires et il est ainsi isolé des constituants cellulaires vitaux (Sentenac et Berthomieu, 2003).

– La régulation de la croissance

L'effet commun des stress abiotiques sur la physiologie des plantes est la réduction de leur croissance (Zhu, 2001). Cette dernière varie considérablement en fonction du genre, de l'espèce et même de l'écotype ou de la variété (Epstein *et al.*, 1980 ; Cramer *et al.*, 1994). Selon Itai (1999), tous les stress provoquent une augmentation de la concentration en ABA dans la partie aérienne ou une réduction des concentrations en cytokinine. D'après Zhu en 2001, la réduction de la croissance est une capacité adaptative nécessaire à la survie d'une plante exposée à un stress abiotique. En effet, elle permet à la plante d'accumuler de l'énergie et des ressources pour limiter les effets du stress avant que le déséquilibre entre l'intérieur et l'extérieur de l'organisme n'augmente jusqu'à un seuil où les dommages sont irréversibles. Pour illustrer cette tendance, dans la nature, la croissance est inversement corrélée à la résistance au stress salin d'une espèce ou d'une variété (Zhu, 2001).

– L'ajustement osmotique

L'un des principaux caractères physiologiques de tolérance aux contraintes du milieu est l'ajustement osmotique qui joue un rôle primordial dans la résistance ou la tolérance de la plante à un stress (El Midaoui *et al.*, 2007). L'ajustement osmotique est favorisé par une augmentation de l'élasticité de la paroi des plantes et une réduction de la taille des cellules. L'ajustement osmotique permet d'abaisser le potentiel hydrique tout en maintenant la turgescence cellulaire par une accumulation active au niveau symplasmique de certains solutés, permettant une protection des membranes et des systèmes enzymatiques. Les végétaux sont capables de supporter le déficit hydrique engendré par le stress salin, en ajustant plus ou moins rapidement leur potentiel osmotique avec celui du milieu extérieur, de manière à maintenir un gradient de potentiel hydrique entre la plante et le milieu salin (Chinnusamy *et al.*, 2004). En effet, dans le cas d'un abaissement du potentiel hydrique, la tolérance à la salinité s'exprime par un maintien de la turgescence (Garg *et al.*, 2002 ; Moinuddin *et al.*, 2005). Ceci se fait grâce au phénomène d'ajustement osmotique qui apparaît aujourd'hui comme un mécanisme majeur d'adaptation aux stress ionique et osmotique. Ce phénomène s'exprime par la capacité d'un végétal à accumuler, au niveau symplasmique et de manière active, des ions tels que les K^+ (Parida et Das, 2005 ; Navarro et Rubio, 2006 ; Munns *et al.*, 2006 ; Teakle *et al.*, 2007), des nitrates (NO_3^-), des composés azotés tels que la choline, le ou la choline sulfate, le ou la glycine bêtaïne, la triméthyl-oxyméthylène β -alanine, le ou la triméthyl homosérine, des composés organiques à faible poids moléculaire tels que les sucres alcools solubles comme le

sorbitol, le mannitol et le pinitol (Ottow *et al.*, 2005), les acides organiques tels que l'acide malique, l'acide ascorbique et certains amino-acides comme la proline (Morant-Manceau *et al.*, 2004 ; Ayliffe *et al.*, 2005). Cependant, cette régulation, étant très variable selon les espèces, présente des limites (Läuchli et Epstein, 1990).

Les solutés organiques qui s'accumulent le plus souvent sous stress salin sont la proline et la glycine bêtaïne, bien que d'autres molécules peuvent s'accumuler à des degrés moindres (Hasegawa *et al.*, 2000). Les osmorégulateurs permettent une protection des membranes et des systèmes enzymatiques surtout dans les organes jeunes, et la proline semble jouer un rôle dans le maintien des pressions cytosol-vacuole et la régulation du pH (Ottow *et al.*, 2005). La proline permet aussi le maintien de nombreuses fonctions physiologiques (photosynthèse, transpiration, croissance, ...) (Grennan, 2006 ; Martinez *et al.*, 2007) et intervient à tous les stades du développement du végétal, (Malasses, 1996). De même des sucres solubles comme les sucres simples (glucose, fructose, ...), les sucres alcool (glycérol et inositol) et les sucres complexes (tréhalose, raffinose et fructane) ont été identifiés comme des composés impliqués dans l'ajustement osmotique (Yokoi *et al.*, 2002).

– Le contrôle membranaire

La tolérance au stress salin s'effectue également au niveau des membranes cellulaires (membrane plasmique, tonoplaste). Le contrôle des activités de transport membranaire apparaît comme un processus central assuré par des mécanismes très divers d'accumulation sélective de K^+ et d'exclusion de Na^+ (Barhoumi *et al.*, 2007 ; Blumwald, 2000 ; Blumwald *et al.*, 2000 ; Brini *et al.*, 2007 ; Glenn *et al.*, 1999). La modification qualitative et quantitative des aquaporines (protéines trans-membranaires) est par exemple un processus capable de modifier la conductivité hydrique de la plante et de favoriser la restriction des mouvements d'eau (Yeo, 1998). Dans la diffusion facilitée comme dans le transport actif, les protéines membranaires peuvent être très spécifiques de certains solutés. Néanmoins, plusieurs solutés peuvent entrer en compétition pour une même protéine de transport (Na^+ et K^+). D'un point de vue quantitative, la perméabilité membranaire au Na^+ ainsi que l'activité, la quantité, la sensibilité des antiports Na^+/H^+ membranaires évoluent pour s'adapter à un stress sodique à long terme (Niu *et al.*, 1995 ; Terman et Skerrett, 1999).

1.2.2. Stress

1.2.2.1. Stress biologique

Un stress biologique n'est pas facile à définir (Hopkins, 2003). Cependant en physique, le stress, défini comme étant une force exercée par unité de surface d'un objet, est fondamentalement un concept de mécanique. En réponse au stress, l'objet oppose une déformation. D'après Levitt (1972), la terminologie employée en physique peut et devrait être appliquée aux organismes vivants.

Selon Leclerc (1999), un stress biologique est le changement plus ou moins brusque par rapport aux conditions normales de la plante ou de l'animal, et la réaction sensible de l'individu dans les différents aspects de sa physiologie laquelle change sensiblement avec l'adaptation à la nouvelle situation à la limite de dégradation menant à une issue fatale. En effet, le stress correspond à un facteur externe (force externe) exerçant une influence désavantageuse (pression) sur la plante qui est mesurée par la survie, le rendement, l'accumulation de biomasse, la photosynthèse ou d'autres paramètres liés aux précédents et utilisés comme critères de jugement.

Les stress affectent la photosynthèse (Gilbert *et al.*, 2004) et donc entraîne une baisse du rendement (Xiong, 2002).

Les stress peuvent, de façon directe ou indirecte, affecter la physiologie de l'organisme en altérant son métabolisme, sa croissance et son développement (Marque, 2002). Par opposition aux animaux, les plantes sont immobiles et ne sont pas susceptibles de migrer lorsque les conditions de vie leur deviennent défavorables.

Naturellement, pour faire face aux agressions biotiques et abiotiques, les plantes doivent par conséquent s'adapter.

Diverses stratégies ont été développées par les plantes, souvent au détriment de leur croissance par des adaptations complexes en contrôlant et en ajustant leurs systèmes métaboliques (Levit, 1980 ; Munns, 2002 ; Hopkins, 2003).

1.2.2.2. Stress abiotiques

Les stress environnementaux (abiotiques), tels que la salinité des sols, la sécheresse, les températures extrêmes, le froid, le gel, les vents, l'excès d'eau et les radiations, sont tous des conditions qui affectent la croissance et le rendement des plantes (Wang *et al.*, 2001 ; Araus *et al.*, 2002 ; Hopkins, 2003).

Lorsqu'une plante subit un stress, il y a une perte importante d'eau au niveau des cellules (Lexer et Faym, 2005). Alors le stress engendre généralement une perturbation du potentiel hydrique compensée par une fermeture des stomates, suite à une perte de turgescence dans les cellules de garde ou une diminution de la pression osmotique cellulaire (Langridge *et al.*, 2006). Il dérègle aussi les flux ioniques chez les plantes (Atienza *et al.*, 2004 ; Langridge *et al.*, 2006).

1.2.2.3. Les composantes de la salinité

Les données classiques sur les effets de la salinité chez les plantes mettent en relief trois principales composantes par lesquelles la salinité affecte la croissance: le stress osmotique, le stress ionique, le stress nutritionnel et le stress oxydatif (Rodriguez *et al.*, 2005).

▪ Le stress osmotique

La première conséquence de la salinisation tient à la modification du potentiel osmotique de la solution du sol, lorsque la teneur en sels croît (Cheverry *et al.*, 1996). Plus la solution du sol devient salée, plus la pression osmotique est élevée, et plus il est difficile pour les racines d'extraire l'eau de la réserve du sol (Song *et al.*, 2005). Selon Munns *et al.*, 1983, l'effet du sel se manifeste généralement par une réduction de la croissance en hauteur. La concentration en sels, dépendant de la teneur en eau du sol, augmente avec le dessèchement. C'est la raison pour laquelle l'excès de sels affectant les plantes est atteint beaucoup plus rapidement dans un sol sableux que dans un sol argileux qui fait piéger les ions Na^+ *via* les charges négatives de l'argile (Chinnusamy *et al.*, 2005).

L'absorption de l'eau par les plantes s'effectue par osmose ; mais elle est conditionnée par la différence de potentiel hydrique entre la racine et le sol (Cramer et Bowman, 1993). Le potentiel hydrique et le potentiel osmotique des plantes deviennent de plus en plus négatifs avec l'augmentation de la salinité (Romero-Aranda *et al.*, 2001 ; Parida et Das, 2005).

▪ Le stress ionique

Lié à la composition en éléments du sol (carence ou toxicité en certains ions): un déficit en N, P, MO, Cu, Zn, Fe, B,... peut avoir d'importantes conséquences sur le développement des plantes. Un excès de minéraux Al, Na, Cl,... peut avoir des effets toxiques (Monneveux et This ,1997). L'accumulation des ions toxiques Na^+ et Cl^- , au niveau du mésophylle des feuilles, affecte la croissance et le métabolisme de la plante (Chinnusamy *et al.*, 2004). Le sel endommage les structures lipidiques et protéiques des membranes plasmiques (Pical *et al.*,

1999). Par conséquent, la présence de ces ions perturbe l'activité enzymatique cellulaire (Hasegawa *et al.*, 2000) principalement dans les tissus photosynthétiques (Bounaqba, 1998). D'après Chinnusamy *et al.*, (2005), la toxicité ionique peut être le résultat du remplacement de K^+ par Na^+ au niveau des sites actifs de protéines induisant aussi un changement des structures protéiques et enzymatiques.

▪ Le stress nutritionnel

D'après Snoussi et Halitim (1998), certains sels peuvent affecter la balance nutritionnelle chez les plantes s'ils sont présents en concentration excessive ou en proportion anormale. La présence de sels en excès dans le substrat de culture peut limiter la nutrition des plantes. Ce déséquilibre nutritionnel est une cause possible des réductions de croissance sur sel, lorsque des ions essentiels comme I^+ , Ca^{2+} ou NO_3^- deviennent limitants (Soltani *et al.*, 1990). Selon Haouala *et al.*, (2007), l'accumulation des ions Na^+ dans la plante limite l'absorption des cations indispensables tels que K^+ et Ca^{2+} . Dans certains cas le Na^+ peut supplier le K^+ au niveau racinaire. Aussi, il y aurait une compétition entre Na^+ et Ca^{2+} pour les mêmes sites de fixation apoplasmique. La présence excessive d'ions sodique, chlorique et borique peut provoquer une augmentation du pH du sol, ce qui induit un effet indirect sur l'impossibilité d'absorption des ions ferreux, phosphate, zinc et manganèse indispensables à la croissance des plantes (Maillard, 2001). Selon Tester et Davenport (2003) et Jabnoue (2008), les effets osmotiques du stress salin peuvent également limiter la croissance des racines, ce qui limite les possibilités d'absorption des éléments nutritifs du sol.

▪ Le stress oxydatif

Une des conséquences des stress environnementaux, incluant le stress salin, est l'apparition du stress oxydatif, dû à l'accumulation de peroxyde d'hydrogène (H_2O_2), de l'ion superoxyde ou oxygène singulet (O^*) et des radicaux hydroxyles qui sont très réactifs à des concentrations élevées, ils endommagent les structures cellulaires (Parent *et al.*, 2008). Ces derniers sont à l'origine du dysfonctionnement de l'appareil photosynthétique et les autres troubles métaboliques. Ils sont habituellement générés par l'activité cellulaire normale avec de faibles concentrations, comme la photorespiration et la B-oxydation des acides gras (Yazici *et al.*, 2007). Parmi ces radicaux superoxydes que sont des peroxydes d'hydrogène, des radicaux hydroxyles, les anions superoxydes très réactifs provoqueraient une détérioration irréversible de l'appareil respiratoire, des membranes de la plante et la dégradation de l'auxine (Rahnama et Ebrahimzadeh, 2005).

La tolérance des plantes à la contrainte saline est fortement corrélée à leur capacité de synthèse des antioxydants nécessaires pour faire face au R.O.S et de maintien de leur concentration à faible niveau dans les cellules lors du stress (Reddy *et al.*, 2004).

De nombreux travaux montrent que des métabolites enzymatiques et non enzymatiques antioxydants tels que les superoxyde-dismutases (SOD), les ascorbate peroxydases (APX), les catalases (CAT), des glutathion-S-transférases (GST) et les glutathion-peroxydases (GPX) s'accumulent plus pendant le stress salin et ils tendent à détruire ces superoxydes (Sudhakar *et al.*, 2001). De même, la photorespiration pourrait contribuer à maintenir la teneur interne en oxygène du chloroplaste en deçà du seuil critique, particulièrement chez les plantes en état de stress, qui ferment habituellement leurs stomates.

1.3. Nutrition potassique

1.3.1. Fertilisation potassique et adaptation de la plante

En termes de nutrition minérale, la croissance de la plante n'est possible que si les besoins importants en azote et en potassium sont satisfaits. Les besoins en d'autres éléments minéraux sont faibles mais stricts (Lassoudière, 2007). Le potassium (K) joue un rôle majeur dans la régulation stomatique, la pression osmotique permet la circulation des produits de la photosynthèse de la source vers les zones stockage (puits). Le potassium est un cofacteur de biosynthèse des protéines impliquées dans la dégradation des membranes tels que des protéases qui enlèvent et recyclent des protéines dénaturées, les gènes LEA (Late Embryogenesis Abundant) qui codent les protéines qui protègent les membranes et d'autres molécules importantes (lipides), les superoxydes dismutases enzymes responsables de la destruction des radicaux libres (oxygène singulet, superoxydes d'hydrogène), des HSPs (Heat Shock Protein) qui protègent ou recyclent des protéines inactives, etc.. Il est fortement impliqué dans la formation, le mouvement et l'entreposage des sucres, de même que dans le métabolisme de l'azote. Ce cation exerce une grande influence sur les attributs de qualité des fruits. Il ressort clairement de nombreuses études qu'il existe une corrélation positive entre le potassium et le rendement, la taille, et le poids des fruits tels que le citron, les oranges douces, la goyave, et les pommes Fuji (Hunsche *et al.*, 2003 ; Lima *et al.*, 2008 ; Lester *et al.*, 2010 ; Yasin *et al.*, 2010 ; Quaggio, 2011). La fertilisation potassique assure le développement de fruits en quantité de poids et de taille commercialisable et apte au transport (Lassoudière, 2007). Une déficience en K^+ se caractérise notamment par des nécroses à la marge des feuilles âgées. Une carence en K^+ est associée à une diminution de la résistance à certaines maladies fongiques (CRAAQ, 2003).

Il intervient dans la synthèse des polyholosides à partir des oses. Ainsi son carence se manifeste également par une accumulation des oses.

L'absorption d'eau à travers les racines de la plante et son transport vers les autres organes dépendent fortement du potassium (K^+). C'est surtout grâce au K^+ et d'autres composés à effet « osmotique » tels que le sucre, que l'eau entre dans les cellules racinaires suivant le principe de l'osmose. Suivant le même principe, l'eau est ensuite conduite vers le xylème (Le potassium, 02.01.2021).

En raison de ses caractéristiques osmotiques, le potassium agit, dans les feuilles, sur l'ouverture et la fermeture des stomates et contribue donc au règlement de l'expulsion de la vapeur d'eau au niveau de l'atmosphère. La plante est refroidie par l'expulsion de la vapeur d'eau dans l'atmosphère (Le potassium, 02.01.2021).

1.3.2. Ratio K^+/Na^+ dans le mécanisme d'adaptation de la plante au stress salin

La salinité induit le stress osmotique, le déséquilibre ionique, la toxicité et la carence en éléments nutritifs préjudiciable pour la croissance des plantes (Parida et Das, 2005). Ce déséquilibre ionique et la toxicité sont dus à la substitution du potassium avec des ions sodium dans les réactions chimiques (Zhu, 2002). De plus, l'augmentation de NaCl diminue l'absorption du potassium et du calcium et interfère avec leurs fonctions physiologiques (Zhu, 2002 ; Yoshida, 2002). Par contre, une forte concentration de potassium augmente le potentiel osmotique permettant une entrée d'eau à partir du milieu extérieur (Claussen *et al.*, 1997). En effet, Mansour (2003) et Zeng (2003) ont signalé que les génotypes de piment tolérants au sel sont capables de maintenir un rapport K^+/Na^+ élevé. Par conséquent, la capacité des génotypes à maintenir des niveaux plus élevés de K^+ et de Ca^{2+} et de faibles niveaux de Na^+ dans les tissus est l'un des mécanismes clés contribuant à l'expression de la tolérance au sel. Autrement dit la capacité des plantes à soutenir un forte ratio K^+/Na^+ est l'attribut le plus important des mécanismes de tolérance au sel des plantes cultivées (Maathuis et Amtmann, 1999 ; Chen *et al.*, 2005 ; 2007; Akram *et al.*, 2010; Abbasi *et al.*, 2012).