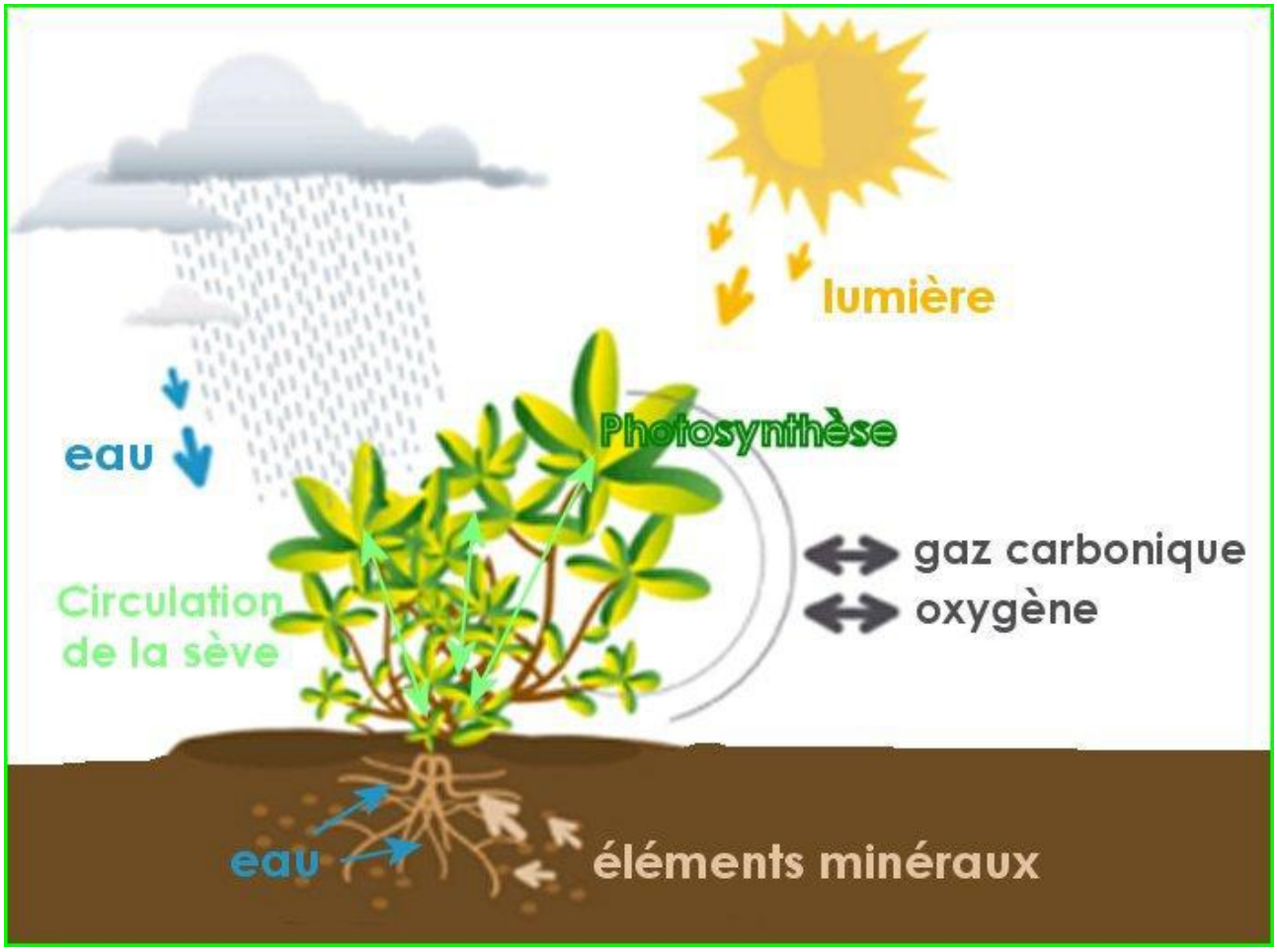
**Chapitre 4: la nutrition minérale**

# La Nutrition minérale التغذية المعدنية

## مقدمة

يتغذى النبات على الأملاح المعدنية الموجودة في التربة على شكل أيونات والتي تخترق الجذور. تعني أسطح الجذر الكبيرة وأنظمة الامتصاص النشطة أنه على الرغم من انخفاض تركيزات الأيونات في محلول التربة، فإن اكتساب العناصر الغذائية المعدنية بواسطة النباتات يعد عملية فعالة جدا. بالإضافة إلى ذلك، فإن التكافل المتكون بين البكتيريا أو الفطريات (mycorrhizae) و الجذور، يساهم في اكتساب هذه العناصر المعدنية. تم إحراز تقدم هائل مؤخرًا في فهم الآليات الجزيئية لنقل الأيونات وكذلك الجينات المشاركة في التغذية المعدنية. تستخلص نباتات الكلوروفيل المواد المعدنية الضرورية لأداء وظائفها بشكل صحيح من البيئات المحيطة بها (التربة، الماء والهواء). يؤدي غياب أو نقص هذه المواد إلى تعطيل تطورها.



**Chapitre 4: la nutrition minérale**

## 1. الاحتياجات الغذائية للنباتات

يؤخذ الماء والأملاح المعدنية من التربة عن طريق الشعيرات الماصة في جذور النباتات. يمكن أن تشارك هذه المعادن في العمليات الفسيولوجية التي تعتبر مهمة للنباتات: التمثيل الضوئي photosynthèse ، الاثمارfructification ، نفاذية الخلية perméabilité cellulaire، التوازن الأيوني équilibres ioniques ، إلخ.

### 1.1 العناصر الأساسية

العنصر الأساسي هو عنصر كيميائي يحتاجه النبات خلال دورة حياته التنموية، والتي تنطوي على الانتقال من البذور إلى إنتاج جيل آخر من البذور. لكي يعتبر العنصر ضروريًا و أساسيا في تغذية النبات، يجب أن تجتمع فيه ثلاث معايير أساسية:

- ❖ يجب ألا يستطيع النبات إكمال دورة حياته في حالة غياب هذا العنصر.
- ❖ لا يمكن تعويض أو استبدال هذا العنصر بعنصر آخر.
- ❖ أن يكون للعنصر أثر مباشر في عملية التمثيل الغذائي للنبات، ومثال ذلك أن يدخل العنصر فى تركيب مادة معينة داخل النبات أو يكون لازمًا لفعل الإنزيمات.

### 2.1 أهمية العناصر المعدنية للنبات:

- ❖ تلعب دوراً مهماً في الحفاظ علي الضغط الأسموزي للخلايا.
- ❖ تدخل في تركيب مكونات الخلايا.
- ❖ تلعب دوراً في تنظيم درجة PH في الخلية وذلك بتفاعلها مع الأحماض الموجودة بالخلية.
- ❖ تلعب دوراً في إحداث التضاد وحماية الخلية من السمية.
- ❖ تنشيط الإنزيمات ، كما تعمل كمصادر للطاقة

تنقسم العناصر الأساسية للنبات عمومًا إلى (جدول **1** و **2**):

- العناصر الرئيسية أو العناصر الكبرى Éléments majeurs ou macroéléments
- العناصر الصغرى Éléments mineurs ou oligoéléments (microéléments)

**Chapitre 4: la nutrition minérale**

| العنصر | الرمز الكيميائى | الصورة القابلة للامتصاص | تركيزه في التربة% | تركيزه في النبات% | حركته في النبات |
|---|---|---|---|---|---|
| الكربون | C | $CO_2$ | --- | 45 | عالى الحركة |
| الهيدروجين | H | $H_2O$ | --- | 6 | عالى الحركة |
| الأكسجين | O | $O_2$ $H_2O$ | 46,7 | 45 | عالى الحركة |
| النيتروجين | N | $NO_3^-$ $NH_4^+$ | 0 ,05 | 2 ,5 | عالى الحركة |
| الفوسفور | P | $H_2PO_4^-HPO_4^{--}$ | 0,17 | 0,2 | عالى الحركة |
| البوتاسيوم | K | $K^+$ | 2 ,6 | 1 | عالى الحركة |
| الكالسيوم | Ca | $Ca^{++}$ | 3 , 6 | 0 ,5 | غير متحرك |
| الماغنسيوم | Mg | $Mg^{++}$ | 1, 6 | 0 , 2 | عالى الحركة |
| الكبريت | S | $S0_4^{--}$ | 0,250 | 0.1 | بطئ الحركة |

**جدول 1**: العناصر الكبرى و تركيزها في التربة و النبات

**العناصر الصغرى Micro nutrients**

| الحديد | Fe | $Fe^{3+}$ $Fe^{2+}$ | 5 ,1 | 0, 01 | بطئ الحركة |
|---|---|---|---|---|---|
| المنجنيز | Mn | Mn++ | 0 ,005 | 0 ,005 | بطئ الحركة |
| الزنك | Zn | Zn++ | 0, 01 | 0000 6 | متوسط الحركة |
| النحاس | Cu | $Cu^+$ $Cu^{++}$ | 0 ,002 | 0 , 002 | بطئ الحركة |
| البورون | B | $H_3B0_3$ | 0 , 01 | 0 , 002 | غير متحرك |
| المولبدنيوم | Mo | $MoO_4$-- | ,00002 | ,00001 | عالى الحركة |
| الكلور | Cl | $Cl^-$ | آثار | 0 , 01 | بطئ الحركة |

**جدول 2**: العناصر الصغرى و تركيزها في التربة و النبات

## 2. العناصر المعدنية وخصوبة التربة (طبيعتها وأهميتها)

إن العناصر المعدنية الرئيسية التي يحتاجها النبات لنموه ضرورية ويتم تصنيفها، وفقًا للكميات الممتصة، إلى:

**1.2 عناصر كبرى رئيسية macroéléments:** وهي العناصر الغذائية التي يحتاجها النبات بكمية 100 جزء بالمليون او اكثر لغرض حدوث النمو الطبيعي وتشمل: النيتروجين **(N)** ، الفوسفور **(P)** ، البوتاسيوم **(K)** ؛ الكالسيوم **(Ca)** ، المغنيسيوم **(Mg)** ، الكبريت **(S)** ، الصوديوم **(Na)**.

**الآزوت (أو النيتروجين) azote (N)** هو أحد العناصر الرئيسية لنمو النبات ، ونقصه له تأثير كبير جدا على الحد من النمو.

**Chapitre 4: la nutrition minérale**

- يدخل في تكوين البروتينات والأحماض الأمينية والكلوروفيل وكذلك الحمض النووي.
- يدخل في تركيب القلويدات و الإنزيمات و البروتوبلازم.
- يمتص في صورة نشادر أو أمونيا ويضاف للمحاصيل ما عدا البقوليات .
- من أهم أعراض نقصه اصفرار الأوراق ونقص النمو وصغر حجم السيقان والجذور .
- الأوراق السفلي أكثر إصفراراً من العليا في حالة نقص العنصر كما يقل معدل التنفس والبناء الضوئي.

**الفوسفور (P)**

- يشارك في التمثيل الضوئي ، وإدارة الطاقة الأيضية (ATP) ، ويستخدم لبناء الإنزيمات والعديد من الجزيئات.
- يحفز نمو الجذور والفواكه وتطورها، و يتواجد بنسبة عالية في البذور و الثمار.
- يدخل الفوسفور في تركيب مشتقات الدهون والبروتينات النووية ويعمل كمرافق إنزيمي لبعض الإنزيمات.
- يوجد بكثرة في الأنسجة المرستيمية.
- يعمل الفوسفور علي الإسراع في عملية الإزهار بينما النتروجين يؤخر الإزهار.
- غالباً يوجد في صورة غير صالحة وغير ذائبة حيث الوسط القلوي أما في الأراضي الحمضية فيمكن الإستفادة بالفوسفور الموجود بها.
- من أعراض نقصه : صغر حجم النبات والأوراق والتي تأخذ لوناً قاتماً وقد يظهر اللون القرمزي. علي الأعناق والعروق وقد تظهر بقع قرمزية أو بنية علي نصل الورقة وهذا اللون يرجع لتراكم صبغة الأنثوسيانين.

**البوتاسيوم (k)** يلعب دورًا مهمًا جدا في التحكم في الضغط الأسموزي وتنظيم النقص المائي، أيضا مقاومة الإجهاد المائي والصقيع والأمراض.

- من العناصر المتحركة ويوجد بنسبة عالية في الأطراف النامية لكل من الجذر والساق والأوراق.
- له دور هام في بناء السكريات والنشا ورفع الضغط الإسموزي للخلايا .
- منظم لعملية فتح وغلق الثغور.
- من أهم أعراض نقصه :إحتراق حواف الأوراق وتشتد هذه الأعراض علي الأوراق السفلية .ويظهر النبات ضعيفاً وقصيراً وأوراق أشجار الفاكهة تتلون باللون الإرجواني وتحترق حوافها والأوراق المسنة مجعدة ومكرمشة.الأراضي الرملية فقيرة في محتواها من البوتاسيوم.

**الكبريت (S)**

- يدخل في تكوين البروتينات والأحماض الأمينية والمرافقات الإنزيمية.
- يدخل في تكوين السيتوكروم وفيتامين الثيامين والبيوتين .
- يدخل في تكوين المواد الطيارة مثل زيت الخردل والثيوكبريتات في البصل والثوم.

**Chapitre 4: la nutrition minérale**

- له علاقة ببناء الكلوروفيل وتنشيط إنزيم إختزال النترات.
- أعراض نقص الكبريت مثل النتروجين إلا أنها تظهر علي الأوراق الحديثة.

**الكالسيوم (Ca)**

- يدخل في تركيب الصفيحة الوسطي للخلية مع المواد البكتينية.
- ضروري لعمليات الإنقسام الغير مباشر .
- يعادل التأثير السام لحمض الأوكساليك ويترسب في صورة بللورات من أوكسالات الكالسيوم.
- له دور هام في عمليات تحويل النشا إلي سكريات والعكس.
- من العناصر الغير متحركة (ساكن) في النبات ولذلك تبدو أعراض نقصه علي الأوراق العليا والقمة النامية.
- يتحكم في النفاذية الإختيارية للغشاء الخلوي .
- منظم لعملية التنفس وتكوين الميتوكوندريا ومنشط لإنزيمات.
- نقص هذا العنصر يؤدي إلي ظهور أعراض التسمم بالمغنسيوم لزيادة إمتصاص النبات للعنصر الأخير.

**المغنيزيزم (Mg)**

- يدخل في تكوين الكلوروفيل .
- له دور هام في عملية البناء الضوئي وبناء الكربوهيدرات وبدونه لا تحدث عملية البناء الضوئي.
- ينشط الإنزيمات المصاحبة لتمثيل الأحماض النووية ARN وADN .
- وجوده ضروري لتنشيط إنزيمات كالفن ، وكذلك ينشط إنزيمات البروتين.
- نقص هذا العنصر يؤدي إلي اصفرار النصل بينما تظل العروق خضراء .
- تظهر أعراض نقص هذا العنصر في الأراضي الجيرية التي تحتوي علي نسبة عالية من الكالسيوم أو الأراضي الحامضية أو المسمدة بالنترات.

**الحديد (Fe)**

إنه أحد العناصر الأكثر شيوعًا في قشرة الأرض: فهو العنصر الرابع الأكثر شيوعًا.

على الرغم من أنه ليس من مكونات الكلوروفيل ، إلا أن الحديد ضروري لتكوينه. نقصه يسبب داء الاخضرار. يشارك الحديد في تكوين العديد من الإنزيمات الأكسدة وهي أساسية لعملية التمثيل الغذائي للنيتروجين.

- يعتبر الحديد عنصراً أساسي ولكن بتركيزات منخفضة.
- مهم جداً لتكوين الكلوروفيل ولو أنه لا يدخل في تركيبه.
- يدخل في تركيب إنزيمات الأكسدة.
- من أهم أعراض نقص هذا العنصر :إصفرار الأوراق الحديثة بينما الأوراق المسنة تبدو طبيعية وهذا يدل علي أن الحديد من العناصر الساكنة غير المتحركة في النبات.

**Chapitre 4: la nutrition minérale**

- تكثر أعراض نقص الحديد في الاراضي القلوية فيوجد في صورة غير صالحة للامتصاص ويعمل وجود النحاس والمغنسيوم علي خفض معدل امتصاص الحديد وذلك لحدوث ظاهرة التضاد.

**2.2 العناصر الصغرى oligoéléments** : وهي العناصر الغذائية التي يحتاجها النبات بكمية قليلة جداً تراوح بين 1-100 جزء بالمليون وتشمل: المنغنيز (Mn) ، الزنك (Zn)، الكلور (Cl) ، البورون (B) ، الموليبدينوم (Mo) ، الكوبالت (Co).

تم العثور على هذه العناصر على مستوى الإنزيمات مع وجود اختلافات حسب الأنواع. يوجد الكبريت في الصليبيات والبوتاسيوم في الطحالب والسيليكون في الأعشاب والسراخس. هناك اختلافات بين أعضاء النبات. البذرة مثلا غنية بالفوسفور وقليلة البوتاسيوم. الأجزاء المسنة غنية بالكالسيوم بينما الأجزاء الفتية غنية بالبوتاسيوم والفوسفور والنيتروجين. لذلك من الضروري الحفاظ على خصوبة التربة من خلال إعادة تكوين احتياجاتها بإضافة مواد تسميد مناسبة. ستعتمد هذه المساهمات على ثراء التربة بالمغذيات واحتياجات النباتات.

**البورون (B)**

- هو عنصر ساكن، له دور مهم في تكوين الهرمونات وأيض الدهون.
- يعمل كمنظم لمعدل الإمتصاص وفقد الماء وإمتصاص النتروجين.
- له دور مهم في تكوين العقد الجذرية في النباتات البقولية.
- نقصه يؤدي إلي تشوه الأطراف النامية وموت قواعد الأوراق. وتشقق السيقان وتصبح الأوراق قصيرة وسميكة وسهلة التكسير وتتلف الثمار ويظهر عن نقصه أيضاً ظاهرة تعفن القلب في بنجر السكر والقلب البني في اللفت وتشقق ساق الكرفس.
- في غيابه، يموت البرعم الطرفي ويتعفن. يعمل في التمثيل الغذائي ونقل الكربوهيدرات. ويرافق نقصها التراكم غير طبيعي للسكر أو النشا.

**النحاس (Cu)**

- يدخل في تركيب كثير من إنزيمات الأكسدة والاختزال .
- النحاس، مثله مثل الحديد، هو أحد مكونات العديد من الإنزيمات المؤكسدة. تنتمي الإنزيمات التي تحتوي على النحاس إلى مجموعة الأكسيدات. هم نحاسيات التي تسبب أكسدة البوليفينول.
- هناك حاجة إلى النحاس في وقت ازهار الحبوب. يسبب نقصه عقم la stérilité mâle .
- هذا العنصر سام للنبات ولكن ظاهرة التضاد وخاصة في التركيزات المنخفضة تخفف كثيراً من حدة السمية لهذا العنصر.
- كثيراً ما استخدم كمبيد فطري وكذلك للتخلص من الطحالب في المياه الراكدة.
- نقصه يؤدي إلي إصفرار الأوراق في النجيليات وذبولها وعدم ظهور الأعراض علي الأوراق السفلي.

**الزنك (Zn)**

- عامل مساعد في تفاعلات إنزيمات الأكسدة والإختزال.

**Chapitre 4: la nutrition minérale**

- عامل مساعد في تفاعلات الأوكسينات.
- يلعب دوراً هاماً في تكوين الأحماض النووية والبروتينات.
- تظهر أعراض نقصه في أشجار الفاكهة حيث تتشوه الأوراق وتصبح صغيرة ورفيعة والساق قصيرة وتسقط الأزهار قبل تفتحها.
- بالإضافة إلى دوره في العديد من إنزيمات الأكسدة ، يشارك الزنك في تصنيعا أكسينات النمو.
- ينشط الأنهيدراز الكربوني الذي يحفز التفاعل:

$$CO2 + H2O _____ H + HCO3$$

- يزيد من نشاط الكاتلاز والبيروكسيديز والأوكسيديز. مطلوب لتوليف التربتوفان ، سلائف IAA (أوكسين).

**الموليبدينوم (Mo)**

- يلعب دوراً هاماً في تحول النترات إلي أمونيا داخل الخلية تمهيداً لعملية بناء الأحماض الأمينية والبروتينات.
- مهم في تثبيت النيتروجين الجوي بواسطة بكتيريا الرايزوبيوم
- من أعراض نقصه إحتراق الأوراق (والتي تتشابه مع أعراض نقص كل من النحاس والزنك) فتظهر بقع بنية علي الأوراق وتموت حوافها وسقوط الأزهار.

**المنجنيز (Mn)**

- عامل مساعد في تفاعل الضوء في عملية البناء الضوئي.
- يدخل في تركيب الإنزيمات ويعمل كمرافق إنزيمي لإتمام عمليات الأكسدة والإختزال.
- يساعد في عملية إنقسام البلاستيدات الخضراء .
- أهم أعراض نقصه إصفرار الأوراق مع بقاء العروق خضراء وعد إزهار النباتات .

**الكلور (Cl)**

- عامل مساعد في عملية التحلل الضوئي للماء في تفاعل الضوء في عملية البناء الضوئي .
- أعراض نقصه تشبه إلي حد كبير أعراض نقص المنجنيز .

**الكوبالت (Co)**

- لا شك أن الكوبالت ليس ضروريًا للنباتات، ولكن تم الكشف عن هذا العنصر ضروري للبكتيريا والفطريات في منطقة الجذور وأكثر من ذلك للبكتيريا مثبتات النيتروجين في الغلاف الجوي، متعايشات البقوليات (Rhizobium).
- قانون الحد الأدنى: العنصر الناقص كليًا أو غير الكافي الكمية يمنع تركيبات المغذيات الأخرى من إحداث آثارها أو على الأقل تقليلها إجراءاتهم الغذائية.

**Chapitre 4: la nutrition minérale**

- الكوبلت وهو مكون لفيتامين $B_{12}$ ويحتاجه القليل من الطحالب الخضراء المزرقة إلا أنه يعتبر سام للنباتات.

هذا بالإضافة إلي بعض العناصر الأخرى التي قد يحتاجها نبات معين فلقد وجد بعض العلماء أن:

**عنصر الصوديوم** يكون أساسياً لنمو بعض الطحالب البحرية وخاصة الطحالب الخضراء المزرقة وفي النباتات الراقية يحل الصوديوم محل البوتاسيوم.

**عنصر السليكون** يكون مهماً لنمو نباتات الأرز والبنجر والشعير وعباد الشمس.

**الألمونيوم** يحسن نمو بعض النباتات إلا أنه معروف بسميتة أكثر من نفعه.

**الجاليوم** من المشكوك فيه أن أى نبات يحتاج إلى جاليوم إلا أن بعض العلماء أوضح أحتياج نبات عدس الماء لهذا العنصر.

**الكوبلت** وهو مكون لفيتامين $B_{12}$ ويحتاجه القليل من الطحالب الخضراء المزرقة إلا أنه يعتبر سام للنباتات.

## 3. دراسة نقص العناصر اللازمة للنبات

يمكن الإستدلال على نقص عنصر معين عن طريق الدراسات التالية:

### 1.3 دراسة أعراض نقص عنصر معين عن طريق الدراسات التالية:

نتيجة لنقص عنصر معين يبدو النبات غير طبيعياً (مرض فسيولوجى) وتظهر علية أعراض مرضية مثل الإصفرار وتجعد الأوراق وإحتراق حوافها وتساقط الأزهار وقصر الساق .وقد سبق ذكر أعراض نقص كل عنصر عند تناوله سابقاً.

### 2.3 التحليل الكيماوي للترية

تحتوى التربة على نوعين من الأملاح هما:

- نوع صالح وهو متيسر للنبات الحصول علية وفى صورة ذائبة ويشمل جميع الأملاح الذائبة ويحصل علية بسهولة.
- نوع غير صالح ويشمل الأملاح الغير ذائبة أو صعبة التحلل وهذه النوعية عند تحللها البطيء يمكنها التحول إلى الصورة الذائبة.

وتحليل التربة يعطى صورة عن نقص عنصر معين فى التربة ويتضح من التحلل أن العنصر قد يكون غائباً أو موجوداً ولكن فى صورة غير صالحة (غير ذائب) لإفادة النبات بصورة مباشرة.

### 3.3 الإختبارات البيولوجية على التربة:

ويجرى هذا الإختبار لإكتشاف مدى قدرة هذه التربة على نمو بعض النباتات فيتم مثلاً إنماء بعض الأحياء الدقيقة مثل الأزوتوباكتر أو نمو بادرات بعض النباتات . ويدل نمو هذه البادرات على مدى كفاءة هذه التربة على إمداد النبات بحاجته من المواد الغذائية الأساسية اللازمة لحياته.

**Chapitre 4: la nutrition minérale**

### 4.3 الإختبارات الكيماوية على الأنسجة النباتية

بتحليل أنسجة النبات يمكن تحديد العنصر الناقص فى التربة.

## 4. أماكن أعراض النقص و علاقته بالحركة

يلخص الجدول التالي أماكن أعراض نقص بعض العناصر على النبات:

| عناصرعالية الحركة تظهر أعراضها على الأوراق القديمة | عناصرمتوسطة الحركةتظهرأعراضه ا على الأوراق القديمة والحديثة | عناصرقليلة الحركة تظهر أعراضها على الأوراق الحديثة | عناصر غير متحركة تظهر أعراضها على البراعم الطرفية |
|---|---|---|---|
| نيتروجين (N) | الزنك ( Zn) | الكبريت ( S ) | كالسيوم (Ca ) |
| فوسفور (P) | | الحديد ( Fe ) | بورون ( B ) |
| بوتاسيوم (K) | | المنجنيز (Mn) | |
| ماغنسيوم (Mg) | | النحاس ( Cu) | |
| مولبدنيوم (Mo) | | الكلوريد (Cl ) | |
| لا توجد بقع ميتة | توجد بقع ميتة | عروق خضراء | عروق صفراء |
| نيتروجين (N) | بوتاسيوم (K) | حديد ( Fe ) | كبريت ( S ) |
| فوسفور (P) | مولبدنيوم (Mo) | منجنيز (Mn ) | نحاس ( Cu ) |
| ماغنسيوم (Mg) | | كلوريد ( Cl ) | |
| عروق خضراء | عروق صفراء | | |
| ماغنسيوم (Mg) | نيتروجين (N) | | |
| فوسفور (P) | | | |

**ظهور أعراض نقص بعض العناصر نتيجة تنافسها فى الإمتصاص مع عناصر أخرى .**
**ظهور أعراض نقص بعض العناصرنتيجة زيادة تركيزات عناصر أخرى .**
**ظهور أعراض نقص بعض العناصر نتيجة بعض الظروف البيئية .**

**جدول 3**: أماكن أعراض نقص العناصر

## 5. مشاركة العناصر في الوظائف الحيوية للنبات

**Chapitre 4: la nutrition minérale**

| | العناصر الصغري | | | | | | العناصر الكبري | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Mo | B | Cu | Mn | Zn | Fe | S | Mg | Ca | K | P | N |
| امتصاص الماء | | | | | | | | ■ | | | | |
| النمو المرستيمى | | ■ | | | | | | | | | | |
| انقسام الخلايا | | | | | | | | | ■ | | | |
| خصوبة الازهار | | ■ | | | | | | | | | | |
| تكوين الاجنة | | | ■ | | | | | | | | | |
| هدم وبناء وتثبيت النيتروجين الجوى | ■ | | | | | ■ | | | | | | |
| هدم وبناء النيتروجين النتراتى | ■ | | | ■ | | ■ | | ■ | | | | |
| تمثيل الحديد | ■ | | | | | | | | | | | |
| تكوين وبناء الهرمونات | | ■ | | | ■ | | | | | | | |
| دورة الكربوهيدرات | | ■ | | | | | | | | | | |
| تمثيل الفوسفور | ■ | | | | | | | ■ | | | | |
| البناء الضوئى | ■ | | | ■ | | ■ | | ■ | | | | ■ |

| | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| انتاج البذور | | | ■ | | | | | | | | | |
| تنظيم الضغط الاسموزى | | | | | | | | ■ | | | | |
| تكوين الميتوكندريا | | | | | | ■ | | | | | | |
| تنظيم العمليات الانزيمية | | | ■ | ■ | ■ | | | | | | | |
| تكوين الاحماض الامينية | | | | | | | ■ | | | | | ■ |
| تكوين الحامض النووى DNA | ■ | ■ | | | ■ | | | | | | ■ | ■ |
| تكوين مركبات الطاقة ATP | | | | | | | | | | | ■ | ■ |
| تكوين الكينوانزيمات | | | | | | | ■ | | | | | ■ |
| تكوين الزيوت | | | | | | | ■ | | | | | |
| تكوين البروتينات | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | | ■ | ■ | ■ |
| تكوين الفيتامينات | | | | | | | ■ | | | | | |
| تكوين جدر الخلايا | | | | | | | | | ■ | | ■ | |
| نقل الطاقة | | | | | | | | | | | ■ | |