**إجهادات أخري**

**Other stesses**

**إجهاد الحرارة**

**Temperature stress**

قد تكون درجة الجرارة عاملاً بيئياً مجهداً للنبات، وهناك نوعان من الإجهادات الحرارية هما

إجهاد الحرارة المنخفضة (**Low temperature stress**)

إجهاد الحرارة المرتفعة (**High temperature stress**)

**إجهاد الحرارة المنخفضة**

**ذكر (Fitter and Hay, 1981) عدداً من تأثيرات درجة الحرارة المنخفضة على النباتات منها:**

* يسبب نقص درجة الحرارة عن الحرارة المثلى نقصاً في معدل كل من النمو والعمليات الأيضية
* زيادة طول الفترة الزمنية المطلوبة لإتمام دورة النمو السنوية.
* يسبب إنخفاض درجة حرارة نباتات المناطق المدارية وشبه المدارية إلى ما يتراوح ما بين **( صفر و 10هم)** إنخفاضاً سريعاً في عمليات الأيض وخاصة التنفس.
* تسبب الحرارة المنخفضة في عدد من الحالات تحول الدهون في الأغشية من الحالة السائلة إلى الحالة الصلبة، ويؤدي ذلك إلى فقد نشاط عدد من الإنزيمات المرتبطة بالأغشية.
* لا تتضرر نباتات المناطق المعتدلة بإجهاد البرد إلا إذا بدأ تكوّن الثلج في خارج خلاياها في المسافات البينية، فمثلاً يتوقف البناء الضوئي تماماً في الأشجار عندما يبدأ تكوّن الثلج خارج الخلايا عند درجة حرارة تتراوح ما بين **(3هم و 5هم)** ويرجع التوقف في البداية إلى تأثير الحرارة المنخفضة على العمليات الفيزيائية مثل إنتشار **(CO2)**.
* جفاف مكونات الخلية لإنتشار الماء إلى المسافات البينية التي حدث بها التجمد.



**قسّم (Levitt, 1980) إجهاد الحرارة المنخفضة إلى نوعين وهما:**

إجهاد البرد **(Chilling stress)**

إجهاد التجمد **(Freezing stress)**

**إجهاد البرد**

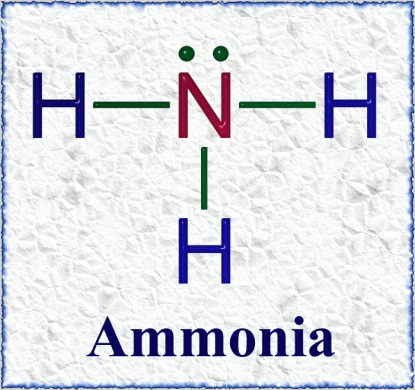
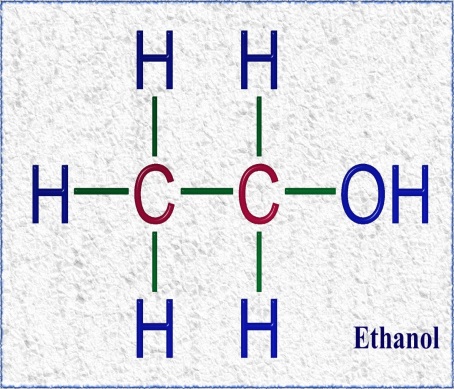
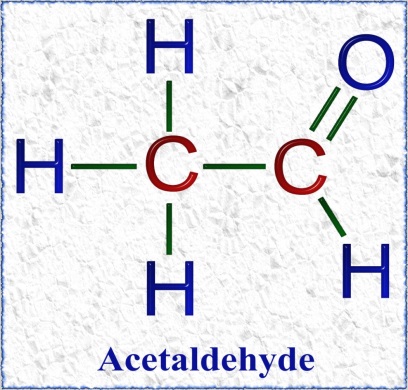
وهو تعرض النبات إلى درجة حرارة منخفضة تسبب أضراراً للنبات ولكنها لا تسبب تجمده. يحدث لمعظم النباتات وبشكل عام إجهاد البرد عند درجة حرارة تتراوح بين **( أقل من 15هم و 10هم)** وقد تصل إلى الصفر.

**ومن تأثيرات البرد (عن Levitt, 1980) هي:**

* تظهر على بعض النباتات بقع متضررة نتيجة موت البروتوبلازم وتظهر الأضرار خلال عدة ساعات من التعرُّض للحرارة المنخفضة.
* توقف حركة السيتوبلازم في الخلايا، كما في الشعيرات الجذرية للخيار والطماطم عند تعرض النبات إلى درجة حرارة **(10هم أو 12هم)**.
* ظهور البلزمة الكاذبة في بعض الخلايا كما في طحلب السبيروجيرا **(Spirogyra)** عند **(5هم)**. سبب البلزمة الكاذبة هو الزيادة المفاجئة في نفاذية الأغشية وتسرب المواد المذابة من الخلية.
* زيادة نفاذية الأغشية وتسرب المواد من الخلايا كما في البطاطس.
* المجاعة **(Starvation)** نتيجة زيادة معدل التنفس على معدل البناء الضوئي.
* نقص البناء الضوئي نظراً لتضرر أغشية البلاستيدات الخضراء **(عند 14هم)** وخاصة بالنسبة للنباتات الحساسة للحرارة المنخفضة.
* تثبيط النقل **(Translocation)**، يتوقف النقل تماماً في قصب السكر عند **(5هم)**.



* إختلال في التنفس.
* تراكم المواد السامة مثل تراكم نواتج التنفس اللاهوائي مثل مركب الأسيتيلدهيد **(Acetaldehyde)** والإيثانول **(Ethanol)**، ويرجع ذلك لتوقف التنفس الهوائي.
* زيادة معدل هدم البروتين على معدل بناءه، وكذلك تراكم بعض المواد السامة مثل **(NH3)**.
* الجفاف وذلك لنقص معدل إمتصاص الجذور للماء من التربة الباردة. فيحدث ذبول للخيار والتبغ عند إنخفاض درجة حرارة التربة إلى درجة أعلى من الصفر المئوي بقليل. يكون نقص إمتصاص الجذور للماء أكثر في النباتات الحساسة لإجهاد درجة الحرارة المنخفضة، ويرجع سبب إنخفاض إمتصاص الجذور للماء إلى نقص نفاذيتها للماء.



**كذلك ذكر (Graha and Patterson, 1982) عدداً من تأثيرات الحرارة المنخفضة على النباتات وهي:**

* زيادة كمية الفينولات **(Phenols)** في النبات ويعزى ذلك إلى الزيادة في نشاط الإنزيمات ذات العلاقة ببناء الفينولات ومن الإنزيمات التي يزداد نشاطها
* Phenylalanine ammonia lyase
* Hydroxycinnamoyl COA quinate hydroxycinnamoyl transferase
* زيادة نشاط إنزيم **(Invertase)** في بعض النباتات مثل البطاطس وقد أعزيت الزيادة في نشاط هذا الإنزيم إلى النقص في المثبط لعمله.
* تكوّن كمية قليلة من **(O2-) (Superoxide)** والذي من الممكن أن يسبب فوق أكسدة **(Peroxidation)** للروابط المضاعفة في الدهون غير المشبعة مثل الدهون الكربوهيدراتية **(Galactolipids)** الموجودة في البلاستيدات الخضراء.
* فقد إنزيم **(Superoxide dismutase)** لنشاطه كما في البطاطس عند تعرضه لدرجة حرارة صفر درجة مئوية. وقد يكون السبب في فقد الإنزيم لنشاطه إلى فقد النحاس أو (مع) الزنك من الإنزيم.

**كذلك ذكر (Lyons, 1973) عدداً من أعراض التعرض إلى درجة حرارة منخفضة لنبات المناطق الإستوائية وهي:**

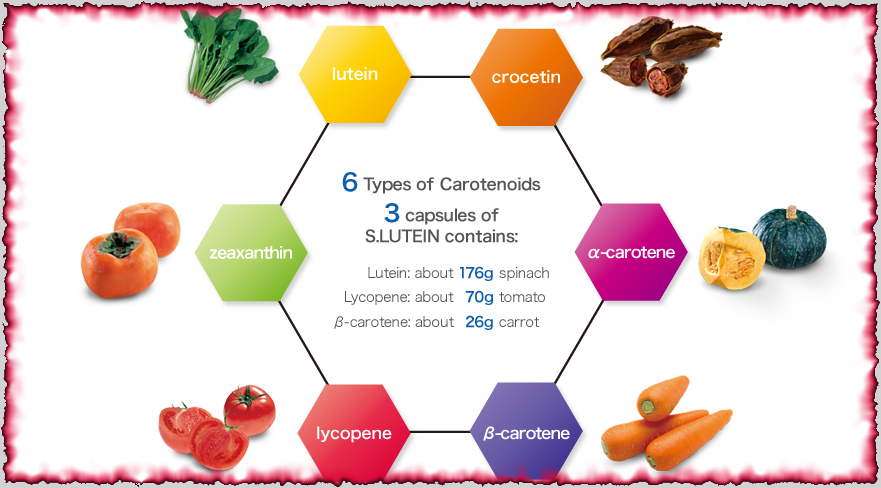
* ظهور ندبات **(Pitting)** على السطح وظهور بقع ميتة **(Necrosis)** وفقد اللون. مثلاً تظهر على نباتات المناطق الإستوائية الحساسة للحرارة المنخفضة ندبات بنية عند تعرضها لفترة زمنية قصيرة لدرجة حرارة منخفضة. ويظهر على سبيل المثال على قشرة الموز لون يشبه الدخان، أو لون أصفر قاتم عندما يتعرض إلى درجة حرارة منخفضة ويتحول مع الزمن إلى لون بني قاتم أو إلى لون بني قاتم أو إلى لون أسود، ويرجع ذلك إلى تحطم خلايا السطح ويتبع ذلك إصابة بالكائنات المعفِّنة. ويبدو أن ظهور هذه الندبات الملونة يتعلق بمعدل فقد الماء، حيث يقل ظهورها عندما تكون الرطوبة النسبية مرتفعة أو عند وضع الشمع على الفواكه وذلك لتقليل فقد الماء منها.



* عدم نضج الثمار الخضراء البالغة بعد التعرض لدرجة حرارة منخفضة.



* توقف تدفّق (جريان) السيتوبلازم وقد أُعزي ذلك إلى نقص توفر **(ATP)** المهم لحركة السيتوبلازم، ومن الأدلة على أهمية **(ATP)** لحركة السيتوبلازم أن جريانه يتوقف عند درجة حرارة أعلى عندما تبرد الأنسجة في ظروف لاهوائية مقارنة بالتبريد في ظروف هوائية.
* نقص في مقدرة النبات على بناء الكاروتينيدات **(Carotenoids)** كما في البطاطا الحلوة.



* زيادة في معدَّل فقد حمض الأسكوربك **(Ascorbic Acid)**، كما في البطاطا الحلوة والأناناس والموز.
* زيادة في محتوى النسيج النباتي من التنينات **(Tannins)** كما في الموز ، وأكسدة التنينات يسبب تكون اللون الأسود في الموز وهو من أعراض الحرارة المنخفضة.
* نقص في إمتصاص الماء وخاصة في النباتات الحساسة لدرجة الحرارة المنخفضة. وقد أعزى **(Kramer)** النقص في إمتصاص الماء إلى الزيادة في اللزوجة ونقص في النفاذية.
* النقص في نقل الماء والأيونات في النباتات الحساسة للحرارة المنخفضة.
* الزيادة في تسرب الأيونات من الأغشية النباتية.

**مقاومة إجهاد البرد**

تتفاوت النباتات في درجة الحرارة الدنيا التي تستطيع مقاومتها **(جدول 1)** وبشكل عام تكون الأنسجة الساكنة ذات المحتوى المائي المنخفض مثل بذور وحبوب اللقاح. وجراثيم الكائنات الدقيقة هي الأكثر مقاومة للحرارة المنخفضة، تقاوم الذرة المجففة في الهواء حرارة تصل إلى **(-100هم)** وتقاوم حبوب اللقاح والجراثيم حرارة تصل إلى **(-273هم)** ويرجع هذا إلى أن محتواها المائي مربوط بقوة كبيرة وغير متوفر لتكوين البلورات الثلجية **(Levitt, 1980)**.

**جدول (1): درجة الحرارة الباردة الضارة لنباتات من بيئات دافئة**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| النوع النباتي | **الفترة الزمنية**  **لبداية ظهور الضرر** | **الفترة الومنية التي تموت عندها**  **النبات (يوم)** |
| *Episcial bicolor* | 18 ساعة | 5 |
| *Sciadocalyx warcewizi* | 24 ساعة | 5 |
| *Eranthemum tricolor* | 48 ساعة | 4-5 |
| *Eranthemum coupri* | 3-5 يوم | 10 |
| *Bochmeria argcmtea* | 8 أيام | 20 |
| *Ivesine acuminata* | 11 يوماً | 19 |
| *Uhdea bipinnatifida* | 15 يوماً | 16 |
| *Eranthemum nervosum* | 20 يوماً | 30-35 |

المصدر: **(Levitt, 1998)**

**قسّم (Grahan and Patterson, 1980) النباتات حسب إستجابتها إلى درجة الحرارة المنخفضة إلى:**

* **نباتات حساسة للبرودة** **(Chilling sensitive)** وهي النباتات التي تقتل أو يحدث لها أضراراً كبيرة عندما تتعرض إلى درجة حرارة أعلى من درجة تجمد الأنسجة **(أي عندما تتعرض إلى درجة حرارة تتراوح بين 15هم و 20هم)**.
* **نباتات مقاومة للبرودة** **(Chilling resistance)** وهي النباتات التي تستطيع أن تنمو عند درجة حرارة صفر درجة مئوية ولكن يبدو أنه لا يوجد حد فاصل وواضح بين هاتين المجموعتين من النباتات.

يمكن أن تعيش جميع نباتات المناطق المعتدلة عندما تتعرض إلى إجهاد برودة ، تتفاوت نباتات المناطق الإستوائية في درجة مقاومتها للبرودة. يرى **(Levitt)** أن مقاومة النباتات للحرارة المنخفضة يكون عن طريق التحمٌّل، وذلك لأن درجة حرارة التربة لا تختلف كثيراً عن درجة حرارة الجو، ولا تحتوي الأصناف المقاومة للبرودة على تراكيب خلوية خاصة تميزها وتساعدها على تجنب إجهاد البرد.

تحتوي نباتات المناطق الباردة مثل نباتات المناطق القطبية ومناطق الألب **(Arctic and alpine plants)** على عدد من الصفات الشكلية (المورفولوجية)، التي تساعدها على مقاومة الإنخفاض الكبير في درجة الحرارة، وأبرز الصفات التي ذكرها **(Fitter and Hay)** هي:

* يساعدها نمط نموها على التأقلم مع هذه الظروف البيئية، فهي نباتات قصيرة قرمزية، فمثلاً الشجيرات في المناطق القطبية لا يتجاوز إرتفاعها في الغالب **( 50 سم)** وهي ذات سيقان قصيرة وتكثر بينها الأشكال الوسادية الورقية.
* تكوُّن الأنسجة النامية والحديثة محمية مثل وجود الأفرع والأوراق الميتة والبراعم.
* تمتاز نباتات الألب بمحتواها المرتفع من الأنثوسيانين، يعطيها المزيج من الصبغة مع الكلوروفيل لوناً أرجوانياً داكناً يساعدها على إمتصاص أشعة الشمس.
* تتميز النباتات الدائمة بإرتفاع محتواها من الكربوهيدرات المخزنة في الماء الموجودة تحت التربة مثل الجذور والريزومات والأبصال، وتخزن أنواع الدهون. تنقل المواد المخزنة بشكل سريع إلى المجموع الخضري في فصل النمو لكي تساعد على النمو السريع وهذا يمكن النبات من الإستفادة القصوى من فصل النمو القصير.
* تمتاز هذه النباتات بمقدرتها الفائقة على القيام بالبناء الضوئي في درجة حرارة منخفضة. تزداد الدرجة المثلى للبناء الضوئي مع زيادة الإرتفاع. يحدث أقصى معدَّل للبناء الضوئي عند درجة حرارة منخفضة **(7هم أو 10هم)**، وتكون محصلة البناء الضوئي إيجابية عند درجة حرارة **(6هم)**.
* البناء الضوئي فيها متأقلم مع الإضاءة المنخفضة يصل للتشبع عند شدة إضاءة منخفضة وخاصة في نباتات المناطق القطبية مقارنة بنباتات الألب.



**إجهاد التجمد**

ينشأ إجهاد التجمد من تعرض النبات إلى درجة حرارة منخفضة تصل لدرجة التجمد. قد يسبب التجمد موت أنسجة النبات والسبب الرئيسي للموت هو تكون البلورات الثلجية في أنسجة النبات، ويلاحظ أن بعض النباتات من الممكن أن تبرد إلى درجة حرارة أقل من الصفر بعدَّة درجات مئوية، ولا يحدث لها أضرار ما لم تتكون البلورات الثلجية في داخل خلايا النبات. قد تتكون البلورات الثلجية في خارج الخلايا **(Extracellular)** أو في داخل الخلايا **(Intracellular)** **(وعادة يرافقه تكون الثلج في خارج الخلايا)**.

**يُعزى الموت والضرر عند تكوُّن الثلج في داخل الخلايا إلى:**

* الإختلال في التركيب الطبيعي لمكونات الخلية النباتية.
* تجفيف الخلايا.
* زيادة تركيز المواد السامة في الخلية نتيجة التجفيف.

قد لا يسبب تكوُّن الثلج في خارج الخلايا موتاً للخلية ولكن وإن حدث وماتت الخلية فإن سبب الضرر والموت يرجع بشكل رئيسي إلى تجفيف البروتوبلازم وإنتقال الماء من داخل الخلية إلى البلورات الثلجية المتكوِّنة في خارج الخلية، وكذلك قد يرجع الضرر والموت نسبياً إلى الضغط الميكانيكي الذي تحدثه البلورات الثلجية على الخلايا وقد يرجع الضرر كذلك إلى زيادة تركيز بعض المواد السامة نتيجة التجفيف. وقد أوضحت أبحاث **(Ligin, 1930)** أن ذوبان الثلج في خارج الخلية يسبب سرعة إنتفاخ الجدار الخلوي مقارنة بانتفاخ البروتوبلازم، وهذا يؤدي إلى موت البروتوبلازم نتيجة التمزق.

من أهم المميزات التي تساعد النبات على مقاومة درجة الحرارة المنخفضة هو كمية الأحماض الدهنية غير المشبعة في الأغشية الخلوية نظراً لإنخفاض درجة تجمدها، مما يساعد الأغشية على الإحتفاظ بحيويتها أثناء إجهاد البرد **(Levitt, 1980)**. يعد إنخفاض درجة تجمد العصير الخلوي عاملاً مهماً في مقاومة أضرار التجمد وذلك بزيادة تركيز المواد المذابة في العصير الخلوي، كذلك يساعد الكمون والتقسية درجة الحرارة المنخفضة **(بتعرُّض النبات لحرارة منخفضة 5هم في فصل الخريف)** النباتات تقاوم التجمد عند تعرضها لحرارة منخفضة تصل إلى **(-4هم)** في فصل الشتاء.

**إجهاد الحرارة المرتفعة**

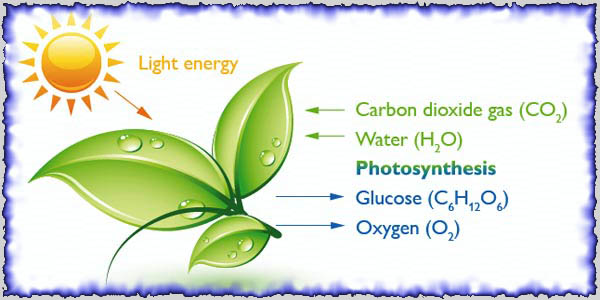
إن درجة حرارة النبات غير ثابتة فهي تتغير مع تغير درجة حرارة المحيط حول النبات والعامل المحدد لدرجة حرارة أجزاء النبات هو درجة حرارة المحيط الملامس للجزء منه. فمثلاً حرارة النباتات المائية قريبة جداً من درجة حرارة الماء الملامس لها ودرجة حرارة الجذور قريبة من درجة حرارة التربة، ودرجة حرارة الأوراق والأجزاء الخضرية الأخرى قريبة من درجة حرارة الهواء الملامس لها. على أنه قد تكون درجة

الحرارة مختلفة عن درجة الوسط بعدّة درجات، وأكبر إختلاف يحدث أن تكون درجة الحرارة مختلفة عن درجة الوسط بعدّة درجات وأكبر إختلاف بين حرارة الوسط المحيط وأجزاء النبات الإختلاف بين حرارة الهواء والأجزاء النباتية المعرّضة له، وهذا يرجع لخواص الهواء مثل نقص توصيله الحراري وانخفاض حرارته النوعية. فمثلاً حرارة الأوراق والثمار تكون أعلى بــ **( 10 أو 20 أو 30)** درجة من حرارة الهواء ولكن تكون أقل بما يعادل **(2 أو 3)** درجات.

تعتمد درجة حرارة النبات على كمية الطاقة الساقطة عليه فعند سقوط طاقة إشعاعية على الأوراق فإن الأوراق تمتص جزءاً كبيراً منها ويفقد جزء عن طريق الإنعكاس **(Reflection)** وجزء آخر عن طريق التوصيل **(Transmission)**، وتعتمد النسبة بينهما على خواص الورقة وطول موجة الطاقة الإشعاعية. يستخدم جزء من الطاقة الذي تمتصه الأوراق في تفاعلات البناء الضوئي والتفاعلات الأيضية الحرارية، ويستخدم جزء في تحويل الماء إلى بخار في عملية النتح، ويسبب جزء آخر تسخين الأوراق.

تعتمد درجة حرارة النبات على الإتزان بين كمية الحرارة الممتصة وكمية الحرارة المفقودة، فإذا زادت الطاقة الممتصة على الطاقة المفقودة ينتج عن ذلك تسخين للنبات والعكس إذا نقصت الطاقة الممتصة على الطاقة المفقودة يؤدي إلى تبريده.

يلاحظ أن جميع الطاقة في حدود الأشعة فوق البنفسجية **(UV)** التي تسقط على سطح الورقة تمتصها الأنسجة العليا من الورقة ويصل فقط جزء منها إلى النسيج الوسطي، في حين تمتص صبغة الكلوروفيل **(70%)** من الأشعة المرئية الساقطة على الورقة وجزءاً آخر تمتصه الأصباغ الأخرى ويفقد جزء في عمليتي الإنعكاس والتوصيل **(النفاذية)** وخاصة في حدود الأشعة الخضراء. تمتص الأشعة تحت الحمراء ذات الموجات الطويلة (أطول من 2 إلى 3 مايكرومتر) على هيئة حرارة ، أما الأشعة تحت الحمراء ذات الموجات القصيرة **(في حدود 1.5 مايكرومتر)** لا تُمتَص. وعموماً فإن درجة حرارة أوراق النبات في ضوء الشمس أعلى من درجة حرارة المحيط، فمثلاً تسبب أشعة الشمس المباشرة إرتفاع حرارة أوراق نبات الفلفل **(9 درجات مئوية)** أعلى من حرارة الوسط المحيط في خلال دقيقة واحدة وتكون درجة حرارة أوراق النبات في الظل مساوية أو أقل من درجة حرارة الهواء.



تصل درجة حرارة النبات أحياناً إلى مستوى مرتفع مضربة، وخاصة في حالة إنخفاض معدَّل النتح الذي له دور في تبريد أنسجة النبات.

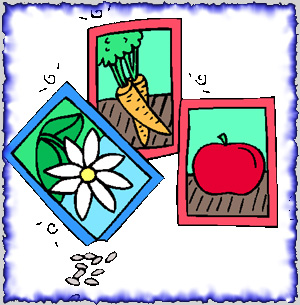
تعتمد أضرار الحرارة المرتفعة على الفترة الزمنية للتعرُّض. ومن أعراض أضرار الحرارة المرتفعة :

* ظهور بقع ميتة **(Necrosis)** على النبات وخاصة على الساق والأوراق
* فقد اللون الطبيعي الأخضر للأوراق
* ظهور بقع ملونة

**تأثير الحرارة المرتفعة على النبات:**

* إستهلاك النبات للكربوهيدرات المخزّنة فيه وتعرضه للمجاعة نتيجة إنخفاض معدّل البناء الضوئي وارتفاع معدَّل التنفس.
* نقص كمية البروتين النشط نتيجة تكسيره أو فقده لشكله الطبيعي.
* التسمم نتيجة تراكم بعض المواد السمية.
* زيادة سيولة الدهون وخاصة دهون الأغشية
* التغير في طبيعة الأحماض النووية.
* تعرُّض النبات إلى إجهاد جفاف نتيجة إرتفاع معدّل النتح.
* تثبيط النمو.

**مقاومة الحرارة المرتفعة**

تتفاوت النباتات في درجة مقاومتها للحرارة المرتفعة وبشكل عام تكون الأنسجة الساكنة مثل البذور أكثر مقاومة. تقسّم النباتات على أساس إستجابتها ومقاومتها للحرارة إلى:

* نباتات محبة للبرودة **(Psychrophiles)** نباتات تنمو وتتطور في مدى حراري يتراوح ما بين **(صفر و 20هم)** وتعد درجة حرارة أعلى من **(15هم إلى 20هم)** مجهدة لها.
* نباتات محبة للحرارة المعتدلة **(Mesophiles)** نباتات تنمو وتتطور في مدى حراري يتراوح ما بين **(10هم إلى 30هم)** وتعد أي درجة حرارة أعلى من ذلك مجهدة لها.
* نباتات محبة للحرارة المرتفعة **(Thermophiles)** نباتات تنمو وتتطور في مدى حراري يتراوح ما بين **(30هم و 100هم)** وتعد أي درجة حرارة أعلى من **(45هم)** مجهدة لها.

**من أهم التأقلمات التي تساعد على مقاومة الحرارة المرتفعة (عن Levitt, 1980 و Doubenmire, 1974) هي :**

* نقص إمتصاص الأشعة الساقطة.
* الإمتصاص بواسطة طبقات حماية.
* التبريد عن طريق زيادة النتح.
* صغر نصل الأوراق وسمكها.
* الوضع العمودي لنصل الأوراق.
* اللون المبيض **(Whitish)** لسطح الأوراق.
* التغطية بشعيرات ميتة.
* محتوى مائي منخفض للبروتوبلازم مع زيادة في نسبة المواد الأسموزية.

يفترِض **(Levitt, 1980)** أن النباتات التي تقاوم العناصر الثقيلة عن طريق التجنب من الممكن أنها تفرز مركبات عضوية في الوسط البيئي أو على سطح الجذور وترتبط هذه المركبات العضوية بالعناصر الثقيلة وبالتالي يكون إمتصاص المعقد بين المركب العضوي والعنصر الثقيل بطيء مقارنة بإمتصاص الأيون الحر، وقد ذكر طريقتين لتجنب إمتصاص الرصاص هما:

* ترسبه وتراكمه على سطح الجذور.
* تبلوره وتراكمه في الجدار الخلوي.

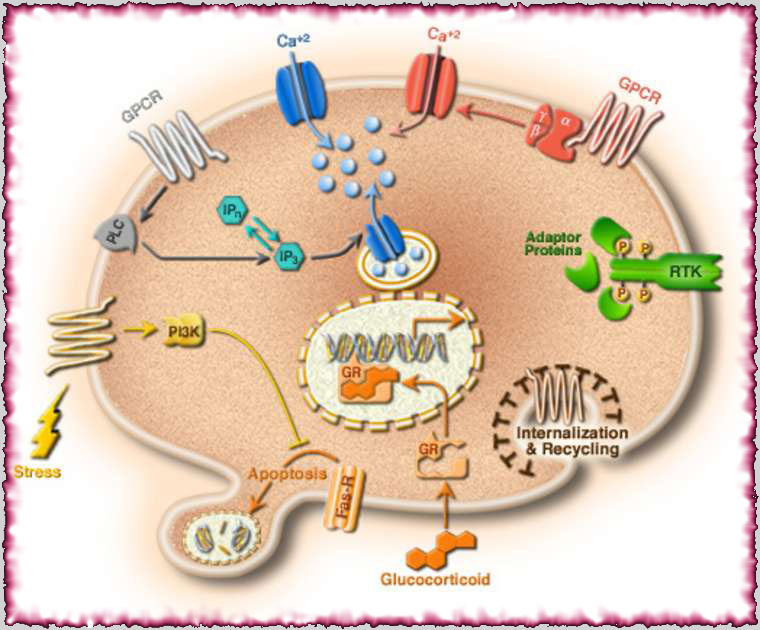
كذلك ذكر أنه في أحد النباتات عندما تمتص الجذور الرصاص فإنه يتراكم في حويصلات **(Vesicles)** أجسام جولجي والتي تحتوي على مركبات تستخدم في بناء الجدار الخلوي ثم تتحرك هذه الحويصلات إلى الجدار الخلوي وتندمج معه وتفرغ الرصاص في الجدار الخلوي بعيداً عن الغشاء البلازمي.

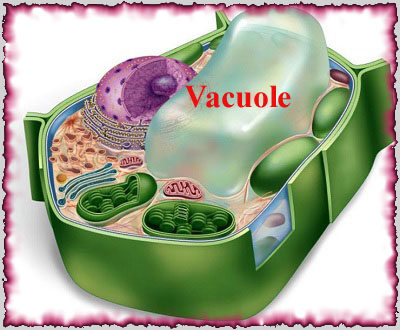
**ذكر (Prassad, 1995) عدداً من الطرق تستخدمها النباتات لمقاومة العناصر الثقيلة وهي:**

* إرتباط العنصر بالجدار الخلوي
* نقل العنصر من الجدار الخلوي يكون منخفض
* الإفراز **(Efflux)** بشكل نشط
* الحجز في عضيات خاصة **(Compartmetalization)**
* الإرتباط بمركبات خطَّافية **(Chelating)**

**كذلك ذكر (Toppi and Gabberrielli, 1991) عدة طرق تستخدمها النباتات في مقاومة الكادميوم وهي:**

* توقف حركة العنصر **(Immobilization)** ويحدث ذلك في الجذور في مستوى الجدار الخلوي. يرتبط في بعض النباتات الكادميوم بالبكتين في الجدار الخلوي.
* الإستبعاد **(Exclusion)** وهو منع دخول العنصر للسيتوبلازم وذلك بفعل الغشاء البلازمي.



* تكوين مركبات تكوِّن معقد مع الكادميوم تسمى **(Phytochelatins)** والمعاملة بالكادميوم تستحث تكوِّن مثل هذه المركبات وهي مركبات ببتيدية تحتوي على كبريت يكوِّن معقد مع الكادميوم.
* حجز العنصر في عضيات خاصة حيث يراكَم في الفجوة العصارية ويمنع وجوده بشكل حر في السيتوبلازم
* تكوِّن بروتينات إجهاد **(Stress protein)** وتستحث المعاملة بالكادميوم تكوينها.