ومن بين التحورات الأخرى التى تُحدثها الحرارة المنخفضة فى مكونات الخلية — غير زيادة نسبة الأحماض الدهنية غير المشبعة — تركيب الـ glycerolipids، وتغيرات فى تركيب البروتين والمركبات الكربوهيدراتية، وتنشيط قنوات الأيونات ion channels. كما أن تراكم السكروز وغيره من السكريات البسيطة أثناء تأقلم البرودة يُسهم فى ثبات الأغشية البلازمية؛ نظرًا لأن تلك المركبات يمكنها حماية الأغشية البلازمية من أضرار التجمد (Mahajan & Tuteja ٢٠٠٥).

آليات وطبيعة تحمل شد التجمد

تشترك ثلاث آليات فى إضفاء خاصية المقاومة لشدِّ التجمد فى النباتات، هى: تحمل التجمد freezing tolerance، وتجنب التجمد freezing avoidance، والقدرة على التأقلم بعد التعرض للبرودة capacity to acclimate، وجميعها آليات تورث وتتباين فى مسلك توريثها بين مختلف أصناف وسلالات الأنواع النباتية. ويعنى ذلك أن التربية لتحسين المقاومة لشدِّ التجمد يمكن أن تجمع بين تلك الآليات الثلاث للوصول إلى التركيب الوراثى المرغوب فيه.

وفى الطبيعة يكون الانخفاض فى حرارة النباتات — عادة — بطيئًا وفى حدود ١–٢ °م/ساعة أثناء حدوث الصقيع. ويترتب على ذلك تكوين البلورات الثلجية فى المسافات بين الخلايا مما يسبب جفافًا بالخلايا. ولذا .. فإن تحمل التجمد يعتمد أساسًا على قدرة خلايا النبات على تحمل الجفاف.

وتلعب الأغشية البلازمية دورًا محوريًّا فى تحمل التجمد والقدرة على التأقلم عند التعرض للبرودة. ومن أولى علامات أضرار التفكك بعد التجمد التحورات فى وظائف ATPase الغشاء البلازمى. ويبدو أن تلك التحورات تتضمن اضطرابات فى الكالسيوم الخلوى وتغيرات فى خصائص دهون الأغشية البلازمية.

وتحدث تغيرات مفتاحية فى تركيب دهون الأغشية البلازمية خلال فترة تأقلم البرودة (عن Palta ١٩٩٢).

إن أشد تأثيرات التجمد ضررًا هو إتلافه للأغشية البلازمية، ويرجع هذا الضرر — أساسًا — إلى الفقد المائى الحاد الذى يرافق التجمد. وتتكون دهون الأغشية البلازمية من نوعين من الأحماض الدهنية: غير مشبعة ومشبعة. وتتميز الأحماض الدهنية غير المشبعة بوجود واحدة أو أكثر من الروابط الزوجية بين ذرتى كربون (-CH = CH-)، بينما تكون الأحماض الدهنية المشبعة مشبعة تمامًا بذرات الأيدروجين فلا يوجد بها أى روابط زوجية (-CH_2 – CH_2-). وإنه لمن المعروف أن الدهون التى تحتوى على أحماض دهنية مشبعة تتصلب على حرارة أعلى عن تلك التى تتصلب عليها الدهون التى تحتوى على أحماض دهنية غير مشبعة. وبذا ..فإن التواجد النسبى للأحماض الدهنية غير المشبعة فى الأغشية يؤثر — بقوة — على مدى سيولة هذه الأغشية. وتعرف الحرارة التى يتحول عندها الغشاء من الحالة نصف السائلة إلى الحالة النصف بلورية بحرارة التحول transition temperature. وتحتوى النباتات الحساسة للبرودة — عادة — على نسبة أعلى من الأحماض الدهنية المشبعة؛ ومن ثم فهى ذات حرارة تحول أعلى. وفى المقابل .. فإن الأنواع المقاومة للبرودة تتميز باحتوائها على نسبة أعلى من الأحماض الدهنية غير المشبعة؛ ومن ثم فهى ذات حرارة تحول أقل (Mahajan & Tuteja ٢٠٠٥).

التقييم لتحمل التجمد

اتسمت برامج التربية لتحمل التجمد بالبطء ومحدودية التقدم فيها، وأرجع ذلك إلى عدم وجود معايير للانتخاب، وتعقيد التحكم الوراثى، وضيق مدى التباين الوراثى فى معظم الأنواع المحصولية. ويستخلص من معظم الدراسات أن معيار البقاء (عدم الموت جراء التعرض لحرارة التجمد) تحت ظروف الحقل هو أفضل طريقة للانتخاب. وبالطبع فإن لتلك الطريقة مشاكلها؛ فالقدرة على البقاء لا تتوقف — فقط — على درجة الحرارة، وإنما يتحكم فيها عديد من العوامل الأخرى البيئية منها والحيوية. ويظل الأمل معقودًا فى تلك الاختبارات أن تكون درجة الحرارة هى العامل الوحيد المتحكم فى بقاء التراكيب الوراثية أو فنائها، وأن يكون الانخفاض الحرارى بالقدر الذى يؤدى إلى موت معظم التراكيب الوراثية الحساسة، وإلى إحداث درجات متباينة من الأضرار فى