

**Intitulé du Master : Biodiversité et physiologie végétale**

**Niveau : 1 ère Année Master**

**Semestre : 01**

**Intitulé de l'UE : UE Fondamental**

**Matière : Ecophysiologie Végétale**

**Crédits : 3**

**Coefficients : 2**

**Enseignant : Dr Tahar SMAILI**

# I- Stress environnementaux

## Introduction :

les plantes rencontrent souvent des conditions inhabituelles ou extrêmes les arbres et les arbustes des latitudes tempérées septentrionales connaissent des températures hivernales très basses ,les espèces alpines font face a des vents froids et secs et reçoivent de grandes quantités de radions uv, et les plantes cultivées peuvent connaître de longues périodes de sécheresse ou leurs racines se trouver dans des conditions de forte salinité dans le sol plus récemment, la pollution du sol, de l'eau et de l'air, due à l'activité de l'homme est venue s'ajouter à la liste des facteurs de l'environnement auxquels les plantes doivent faire face des conditions qui génèrent des stress sont créés lorsque des paramètres environnementaux atteignent des valeurs extrêmes et peuvent exercer des impacts importants sur la physiologie, le développement et la survie des plantes.

L'étude des réponses des plantes aux stress environnementaux est depuis longtemps un thème central pour le physiologiste de l'environnement et les ecophysiologistes.

### 1. le stress hydrique

les stress provoqués par un déficit en eau constituent une menace permanente pour la survie des plantes, néanmoins beaucoup d'entre elles produisent des modifications morphologiques et physiologiques qui leur permettent de survivre dans des régions de faible pluviosité et dont la teneur en eau des sols est peu élevée un stress hydrique peut se produire aussi bien sous l'effet d'un excès que d'un manque d'eau, un exemple d'excès d'eau est l'inondation le stress provoqué par l'inondation est habituellement une réduction de l'apport d'oxygène aux racines qui limite à son tour la respiration ,l'absorption de nutriments et d'autres fonctions racinaires l'expression de stress et de déficit hydrique est abrégée en stress hydrique dans l'environnement l'absence de pluie et l'augmentation de la température sont des conditions de sécheresse, ce stress est appelé stress de sécheresse en laboratoire, le stress hydrique peut être stimulé en favorisant la perte d'eau par les feuilles, une condition appelée stress de dessiccation le stress hydrique intervient aussi dans le stress salin et le stress osmotiques.

### 2/ l'effet de stress hydrique au niveau cellulaire

#### a/ sur la membrane

Les dommages provoqués par un stress hydrique résultent de la dessiccation du protoplasme .le départ d'eau provoque une augmentation de la concentration des solutés, lorsque le volume du protoplasme diminue, ce qui entraîne des conséquences sérieuses sur le plan structural et sur le plan métabolique l'intégrité des membranes et des protéines est également affectée par la dessiccation, ce qui entraîne des dysfonctionnements métaboliques donc à cause de stress des lésions membranaires ne soit toujours pas déterminée, On pense que le départ de l'eau des membranes rompt la structure normale de la bicouche lipidique et provoque l'apparition des canaux remplis d'eau et bordés par les groupes phospholipides,

donc les membranes deviennent très poreuses lorsque elles sont desséchées lorsque les membranes sont réhydratées, les canaux permettent une fuite très importante de solutés entre les compartiments ou dans l'espace extracellulaires les stress, qui affectent la bicouche lipidique, pourraient également provoquer le déplacement des protéines membranaires, qui, du fait de la fuite de soluté, contribuent à une perte de sélectivité des membranes, une destruction généralisée de la compartimentation cellulaire ainsi qu'à une perte des enzymes membranaires il y a aussi des études qui montrent que les protéines cytoplasmiques et des organites peuvent aussi perdre leur activité ou même être complètement dénaturées

### **b/sur la photosynthèse**

La photosynthèse est particulièrement sensible au stress hydrique .elle peut être affectée de deux manières d'abord la fermeture des stomates supprime ou diminue l'entrée de  $CO_2$  atmosphérique vers les chloroplastes ensuite. L'apparition dans les cellules de potentiels hydriques faibles intervient directement sur l'intégrité de la machinerie photosynthétique en effet les effets directs sur l'activité des chloroplastes provoquent une diminution de la concentration de  $CO_2$ , les activités de transport des électrons et de phosphorylation sont réduites dans les chloroplastes (diminution de la synthèse d'ATP et NADPH ) ces effets sont le reflet de lésions des membranes des thylacoïdes et de la protéine ATP synthétase.

### **c/ sur les réponses des stomates au déficit hydrique**

les plantes sont souvent soumises à des graves déficits hydriques dus à une chute brutale de humidité ou à une augmentation de la température par conséquent l'intensité de transpiration augmente généralement les plantes répondent à de graves déficits hydriques en fermant leurs stomates, de façon à régler la perte d'eau par la transpiration des feuilles sur la vitesse d'absorption d'eau par les racines .chez les plantes désertiques ,tempérées ou tropicales ,les études montrent que l'ouverture et la fermeture des stomates répond à l'humidité ambiante à la différence des cellules épidermiques qui les entourent, les cellules de garde ne sont pas recouvertes d'une cuticule épaisse .par conséquent les cellules de garde perdent l'eau directement dans l'atmosphère. si la vitesse de la perte d'eau par évaporation devient supérieure à la vitesse de fourniture d'eau par les cellules du mésophylle sous-jacent, les cellules de garde deviendront flasques et l'ostiole du stomate se fermera .les cellules de garde peuvent donc répondre directement au gradient de pression de vapeur d'eau entre la feuille et l'atmosphère par la fermeture du stomate cette fermeture est appelée fermeture hydropassive (n'exige pas l'utilisation d'énergie ou les réactions métaboliques).

La fermeture des stomates est également régulée par des processus hydroactifs la fermeture hydroactive est sous la dépendance du métabolisme et implique essentiellement une orientation inverse des flux ioniques qui provoquent l'ouverture. La fermeture active est déclenchée par l'abaissement du potentiel hydrique dans les cellules du mésophylle, elle semble impliquer l'acide abscissique / qui stimule l'entrée des ions contre la gradation mais avec l'utilisation de l'ATP).

### **d/sur ajustement osmotique**

une autre réponse forte que de nombreuses plantes apportent aux stress hydriques, . consiste en une diminution du potentiel osmotique, provoquée par l'accumulation de solutés .ce processus est appelé ajustement osmotique .alors qu'une certaine augmentation de la concentration en solutés pourrait être

considérée comme résultant de la déshydratation de la cellule et de la diminution de son volume, l'ajustement osmotique se rapporte spécifiquement à une augmentation nette de la concentration de solutés provoquée par le stress. L'ajustement osmotique permet de maintenir le mouvement d'eau vers les feuilles et par conséquent leur turgescence.

#### **d.1/ le rôle de l'ajustement osmotique**

1/les solutés de l'ajustement osmotique ont un rôle important dans la turgescence des cellules dans un milieu stressé.

2/représente une forme importante de l'acclimatation des plantes au stress hydrique

3/ peut aussi jouer un rôle important en aidant des feuilles partiellement flétries à redevenir turgescents lorsque l'apport d'eau reprend.

4/et aussi permet aux plantes de garder leur stomate ouverts et de prélever du CO<sub>2</sub> pour effectuer leur photosynthèse dans des conditions de stress hydrique.

#### **d.2/les solutés accumulés**

##### **d.2.1/des substances organiques**

Les substances organiques qui participent à l'ajustement osmotique sont les sucres (glucose, fructose et saccharose) les acides aminés (la proline, glutamine) l'accumulation de ces substances varie d'une espèce à l'autre, selon le degré de stress et sa durée et même l'activité photosynthétique.

##### **d.2.2/ substances non organiques**

Le stress hydrique induit une accumulation de quelques ions particulièrement le potassium.

#### **e/sur la croissance**

Le déficit hydrique est provoqué une réduction de la croissance végétative. La croissance de la partie aérienne, et surtout celle des feuilles, est généralement plus sensible que celle des racines.

##### **a/effet de stress hydrique sur la croissance de partie aérienne**

Le stress hydrique réduit la croissance des feuilles et des tiges puisque la surface foliaire est diminuée et la transpiration réduite.

Habituellement, l'effet exercé par un potentiel hydrique faible est attribué à une perte de turgescence des cellules des zones en croissance car le grandissement cellulaire suite à une entrée d'eau, mais dans le stress hydrique l'apport d'eau est réduit qui se traduit par une réduction de la croissance.

##### **b/sur la partie racinaire**

Le stress hydrique diminue la vitesse de croissance. Cette diminution est augmentée avec l'augmentation du degré et avec la période de stress et selon aussi la sensibilité des espèces. Les études montrent que le stress

hydrique inhibe la croissance des tiges alors que celle des racines n'est pas touchée la croissance des feuilles et des tiges sensibles en stress hydrique par rapport les racines.

### **f/effet de stress sur les protéines**

La majorité des protéines enregistrent une chute importante de leur synthèse, mais il ya une synthèse pour d'autre protéines, appelés protéines de stress (LEA).

Le rôle biochimique joué par ces protéines sont:

Protection des membranes plasmiques et nucléaires

Contrôle des divisions cellulaire par la stabilisation de la membrane nucléaire

### **3/mécanisme de tolérance et d'adaptation en stress hydrique**

3.1/l'esquive: certaines plantes échappent totalement au stress comme des plantes de désert qui sont éphémères autrement dit dont la durée de vie est courte.les éphémérophytes germent, croissent et fleurissent immédiatement après les pluies saisonnières elles accomplissent donc leur cycle de développement durant une période humide favorable et produisent des graines dormantes avant l'arrivée de le saison sèche de la même façon de nombreuses espèces annuelles arctiques accomplissent leur cycle de développement pendant le court été arctique et survivent à hiver sous forme de graines comme les plantes éphémères ne sont jamais confrontées réellement a la sécheresse ou au froid ,on dit qu'elles échappent au stress.

3.2/l évitement: pour le maintien de tissu végétaux à un stress hydrique élevée: le maintien de teneur en eau chez une plante soumise en déficit hydrique peut s expliquer par une augmentation de l'absorption d'eau et la réduction des pertes d eau par transpiration.

#### **3.2.1/-réduction de perte en eau**

La régulation de l'ouverture stomatique est le mécanisme essentiel par laquelle les plantes contrôlent les pertes en eau.la limitation de la transpiration par la fermeture des stomates qui limitent l assimilation de gaz carbonique et la photosynthèse.

#### **3.2.2/ l'augmentation de l'absorption racinaire**

Sous un stress hydrique, la plante peut conserver un potentiel hydrique élève .en augmentant la densité de son système racinaire, l'élongation racinaire.

### **3/ ajustement osmotique**

Un mécanisme majeur d'adaptation à un stress hydrique ou salin par un maintien de la turgescence.

### **Conclusion**

Les plantes peuvent répondre aux stress de diverses façons les plantes peuvent éviter les effets de stress en accomplissant leur croissance durant les périodes de moindre stress ou bien elles ne peuvent pas le supporter auquel cas elles peuvent subir des lésions ou bien des modifications spécifiques de leur métabolisme leur permettent d'éviter ou de tolérer les effets de stress.

## **2. Stress salin :**

Selon plusieurs auteurs, le stress salin se définit comme la présence de concentrations excessives de sels solubles dans le sol ou dans l'eau d'irrigation. (Hopkins, 2003).

D'après POLJAKOFF, MAYBER et GALE (1975), le terme salinité semble indiquer la prédominance de NaCl. STROGONOV (1964) rapporte que l'effet de la salinité sur les plantes est déterminé non seulement par la quantité absolue d'ions en excès, mais aussi par la quantité relative de certains autres ions. (HOPKINS., 2003).

### **L'effet de la salinité sur les végétaux :**

Plusieurs travaux montrent que la résistance à la salinité des plantes adultes est plus élevée que lors de la germination des grains. Cependant d'autres chercheurs ont expliqué que la comparaison entre les différentes stades de la plante est extrêmement difficile, car les critères utilisés ne pouvant être les mêmes ; Mais il est évident qu'une plante, pour être utilisable sur sol salé doit à la fois germer, croître, et éventuellement se produire de la façon satisfaisante de telles conditions. (HOPKINS., 2003).

### La germination :

Souvent la salinité des sols constitue un facteur limitant en agriculture, en inhibant la germination et le développement de la plantule.

D'autres travaux montrent que seul le processus de germination et non la capacité germinative est altérée en milieu salé.

Le stress salin peut affecter la germination de deux façons :

- En diminuant la vitesse d'entrée et la quantité d'eau absorbée par les graines.
- En augmentant la pénétration d'ions qui peuvent s'accumuler dans les graines à des doses qui deviennent toxiques.

### L'effet des sels sur la croissance et le développement :

Un retard de croissance important est signalé chez la plupart des glycophytes (dès 50 Mm/l), par contre chez les halophytes, la croissance ne semble guère diminuer que pour des concentrations plus élevées. (R.HELLER et AL, 2004).

Chez la tomate, il y a une maîtrise de la vigueur de la plante.

Au début de la culture, en présence de sel, par contre au cours de la production.

La salinité provoque des accidents physiologiques sur le fruit. « LE BLOSSOM ET ROTT » en voie de formation...

- Parmi les manifestation morphologiques des plates au stress salin nous citons :

Une faible ramification, une diminution de la longueur du diamètre, du poids frais et du poids sec, des tiges et des racines.

- Un raccourcissement des entres nœuds et une diminution du nombre de nœuds.

Le stress salin contrôle en effet les processus physiologiques et les conditions déterminant la quantité et la qualité de la croissance.

L'effet de la salinité sur le bilan hydrique :

De nombreuses chercheurs ont montré le rôle déterminant du processus d'ajustement osmotique faisant appel à la dynamique des ions et aux mouvements hydriques dans la plante.

L'état hydrique de la feuille du végétale correspond à l'équilibre du flux d'entrée et de sortie de l'eau. Cet état peut être perturbé par la présence des sels minéraux à fortes concentrations dans la solution nutritive alors que les potentiels hydrique et osmotique sont abaissées. (R. HELLER et AL, 2006).

L'augmentation de la résistance stomatique entraine une diminution de l'activité photosynthétique proportionnelle à la teneur des plantes en chlore, par contre à faible dose de NaCl. Toutes fois, le potentiel osmotique ne suffirait pas à lui seul de caractériser l'état hydrique des plantes stressées au sel, la connaissance des potentiels hydriques de turgescence réimpose pour établir leur bilan hydrique et pour le contrôle de résistance stomatique et de la transpiration. (R. HELLER et AL, 2006).

Presque la totalité de l'abaissement du potentiel osmotique est due à l'absorption du  $Na^+$  et du  $Cl^-$  chez les halophytes et les glycopytes.

Par ailleurs HASSEGAWA et AL (1984), signalent que la tomate accumule du  $Na^+$ , du  $Cl^-$  et du  $NO_3^-$  pour l'ajustement osmotique.

L'effet du sel sur l'ultra structure cellulaire :

Sous l'influence du stress salin, les tissus perdent leur turgescence et se déshydratent car l'élongation cellulaire est dépendante de la turgescence des tissus. (S. MAYER et AL, 2004).

### **Les mécanismes de tolérance de la salinité**

La tolérance à la salinité selon DIEHL (1975) est le degré avec lequel la plante ajuste sa pression osmotique en sacrifiant un minimum de son développement végétatif, ceci implique une accumulation d'élémentsnécessaire pour maintenir la pression de turgescence. LEVITT (1972) définit la tolérance à la salinité comme une accumulation des ions en absence d'effets négatifs sur la croissance, certaines plantes peuvent tolérer la salinité en utilisant les mécanismes suivant : (HOPKINS., 2003).

L'ajustement osmotique :

Ce phénomène permet le maintien de nombreuses fonctions physiologique, il est réalisé grâce à une accumulation des solutés dont le rôle conduit à un maintien du potentiel de turgescence elle permet aussi la protection des membranes et du système enzymatique des jeunes organes. (HOPKINS., 2003).

selon (DERGAOUI, 2003) l'accumulation des solutés dans le cytoplasme permet à la plante de maintenir sa turgescence et d'éviter la déshydratation.

Les solutés responsables de l'ajustement osmotique sont essentielle des acides organiques, acides aminés et des sucres, note que les solutés dont l'accumulation permet la diminution du potentiel osmotiques et contribuent ainsi à l'ajustement osmotique et des ions inorganiques tel que le potassium comme l'acide malique. (HOPKINS., 2003). L'accumulation des acides aminés est attribuée par plusieurs auteurs constate que les acides aminés contribuent par 3% de l'ajustement osmotique. Parmi les acides aminés les plus important on cite la proline. Elle s'agit comme un soluté compatible qui s'accumule à des fortes concentration dans le cytoplasme sans interférer avec les activités métaboliques cellulaire.

#### La sélectivité :

BRUN et WACQUANT et PASSAMA (1981), signalent que de nombreuses restreindre l'accumulation de  $NA^+$  et  $CL^-$  en milieu salé par le mécanismes de selectivité. Selon PASTER NAK (1987) il y a sélectivité lorsqu'on constate que dans les mêmes conditions du milieu, le contenu minéral des plantes varie largement d'une espèce à l'autre, le NA seul ou la combinaison NACL semble influencer sur l'arrêt de l'absorption du K par les racines.

D'autres part LAHAYE et EPSTEIN (1971) ont mis en évidence que la présence du calcium dans le milieu peut favoriser la sélectivité pour le potassium au détriment du sodium, ces auteurs ont constaté que l'état des plantes s'améliore à mesure que la concentration en CA augmente, il fait signaler que le CA n'inhibe pas l'absorption du sodium mais il maintient la sélectivité entre K et NA dans les racines, la sélectivité est également associé ou liée aux mécanismes régulant le transport ionique. (R. HELLER et AL, 2006).

L'exclusion : Selon BINET (1978) en milieu salé, la minéralisation des végétaux est quantitativement et qualitativement fonction de la matière spécifique des plantes, elle peut être soit supérieure (phénomène d'accumulation) soit inférieure (phénomène d'exclusion) à celle du milieu extérieur.

D'une manière générale, les glycophytes sont des plantes exclusives n'accumule pas de sodium dans leurs feuilles, car elles sont incapable d'utilisé l'ion  $NA^+$  pour l'ajustement osmotique de leur limbes, l'exclusion du sodium s'opère à deux niveaux d'une part à travers un mécanisme qui restreint l'absorption du  $NA^+$  par les racines de la plante notamment en diminuant la permealulitédes cellules racinaires aux ions  $NA^+$ . (R. HELLER et AL, 2006).

L'excrétion : Elle est spécifique pour les halophytes et se produit par les glandeset les poils vésiculeux et permet le maintient d'une concentration constante de sel les cellules foliaires grâce à un mécanisme actif de transport contre un gradient de concentration. (R. HELLER et AL, 2006).

Conclusion : La salinité et la sécheresse sont deux paramètres majeurs provoquant dans le sol des modifications physico-chimiques et constituent un obstacle à la croissance des végétaux et limitent les rendements des cultures. L'importance économique de la tomate en Algérie et les problèmes rencontrés dans sa production, nous ont conduit à évaluer ses réactions aux stress salin. Ces réponses nous permettent de s'orienter vers des perspectives d'amélioration de cette espèce.

### **Les sols salés et les halophytes: -**

Les sols salés sont caractérisés par la présence de sodium sous forme d'ions libres ou adsorbés en proportion assez élevée pour leur conférer des caractères pédologiques particuliers et provoquer la présence d'espèces adaptées à ces sols, qualifiées d'halo-phytes par Pallas dès 1809 .

**1) Localisation des plantes vis-à-vis de la salinité du sol :** Un certain nombre d'espèce appartenant particulièrement à certaines familles telles que chénopodiacées et les Plumbaginacées sont localisées aux sols salés : ce sont les halophytes . D'autres en sont absentes ou sont seulement tolérantes à une salinité modérée : O. stoker leur a donné le nom de glycophyte.

**a) Les glycophytes :** montrent une tolérance plus ou moins grande vis-à-vis de la salinité . En raison de l'importance de ce caractère pour les plantes cultivées, de nombreuses études ont été faites sur ces dernières , sur les quelles on trouva des références dans les revues de Hayward et Bernstein (1958) et de Bernstein (1962). on a pu classer des plantes cultivées en catégories selon leur réaction globale au sol :

1° les espèces intolérantes, affectées pour une concentration de 2 g de sel par litre, comme le pois , le melon, les agrumes, le pin maritime ;

2° les espèces moyennement résistantes, qui tolèrent jusqu'à 10 g de sel par litre à l'état âgé, comme la luzerne, la tomate, les petites céréales ( avoine, blé, orge ) ;

3° les espèces résistantes, qui supportent des concentrations supérieures à 10 g par litre, telles que l'épinard, la betterave , les riz, le cotonnier, le dattier .

**b) Les halophytes :** ont une croissance optimale et des limites de tolérance très différentes selon les espèces, et évoluant pour un espèce donnée avec les stade de développement . au stade de germination , l'optimum se trouve en fait sur milieu non salé pour de nombreuses halophytes telles que *Salicornia europaea* , *Spergularia marginata* mais quelques espèces , comme *Aster tripolium* , *Suaeda maritim* , *Spergularia marina*, il est réalisé pour un milieu plus ou moins salé . L' eau salée a en outre la propriété de lever des dormances innées ou d'empêcher l'apparition de dormances second- aires. Un milieu salé est par contre nécessaire ou au moins favorable à la croissance après germination , mais à des concentrations différentes selon les espèces : ainsi le *Salicornia*, *Suaeda maritima*, baignées périodiquement par l'eau de mer, ne peuvent croître sur milieu non salé tandis que *Cochlearia anglica* , divers *Atriplex* , qui vivent dans des stations faiblement salées, ont leur croissance seulement favorisée par une salinité faible . Les premières peuvent être qualifiées d'halophytes strictes ou obligatoires , les secondes, d'halophytes préférantes . les halophytes présentent pour la plupart une succulence de leurs feuilles, ou de leurs tiges dans le cas d'espèce aphylls.

### III- Effets de Salinité sur les plantes :

#### 1\* *Effets morphologiques :*

- Inhibition des divisions cellulaires.
- Régression de la tige et des feuilles.
- Cl<sup>-</sup> induit l'élongation des cellules palissadiques.
- Croissance tardive des plantes affectées: « mauvaise croissance des récoltes.
- Modification de la durée de floraison.
- Réduction de nombres des fleurs.
- Diminution des graines cédées « une baisse des rendements.
- Faible croissance des racines.

#### 2\* *Effets physiologique et biochimique :*

- Inhibition osmotique de l'absorption de l'eau.
- Augmentation de transport de Na<sup>+</sup> pour les tiges.
- Accumulation excessive de Na<sup>+</sup> dans les feuilles l'Augmentation de l'absorption de Cl<sup>-</sup>
- Augmentation de l'absorption de K<sup>+</sup>
- Diminution des PF et PS de tige et racine.
- Diminution de l'absorption de P, Zn et Ca<sup>2+</sup>
- La toxicité directe (à certaines doses, variables selon les plantes, le sel (chlorure de sodium : Na Cl) devient toxique).
- Diminution des organites non toxiques.
- Changement de l'expression génétique et de la synthèse protéique.
- Activation spécifique des gènes impliqués dans la tolérance saline.
- Changement des taux des phytohormones (ABA, CK).

#### **Conclusion :**

Les plantes halophytes ont une croissance optimale et des limites de tolérance très différentes selon les espèces ,et présentent ainsi un haut pouvoir d'écitèse renforcé par l'absorption du sel et sa conduite vers les feuilles, contrairement aux glycophytes.

les halophytes sont contraint de stocker ce sel dans leurs vacuole pour éviter toute intoxication.

L'organes tolère des quantité représentation idéalise de la croissance des halophytes tolérantes et des glycophytes sensible a la concentration en sels .

### Classification des sols salins

Les sols salins sont classés en fonction de leur degré de salinité et/ou d'alcalinité et des caractéristiques de leur profil

On peut classer les sols affectés par la salinité selon deux paramètres:

\* **La conductivité électrique de la solution du sol:** « **CE** en  $S.m^{-1}$  : détecte les problèmes osmotiques

\* **Le pourcentage d'échange de sodium:** « **PES** : indicatif des problèmes de dispersion physique

Type de sol	Types de sels	CE	PSE	pH	Caractéristiques
<b>Salin</b>	Présence de sels solubles neutres; de chlorure et de sulfate de calcium, de magnésium, de potassium et de sodium (calcium et magnésium dominants)	> 4 dS/m	< 15%	< 8.5	La croissance des plantes est contrainte par une faible infiltration, une faible stabilité et aération du sol.
<b>Salin-sodique</b>	Grande concentration de sels neutres et d'ions sodium	> 4 dS/m	> 15%	< 8.5	La croissance des plantes sur ce type de sol peut être affectée à la fois par des <u>excès de sel</u> et par des <u>excès de sodium</u> .

<b>Sodique</b>	Faibles quantités de sels solubles neutres, grande quantité d'ions sodium	< 4 dS/m	>15%	>8.5	Ce type de sol est <u>le plus affecté</u> par les sels et le plus dégradé. <u>Ce type de sol est dit engorgé.</u>
----------------	---	-------------	------	------	---

## Effets de stress salin

### \* Effets morphologiques

- Inhibition des divisions cellulaires
- Régression de la tige et des feuilles
- Cl<sup>-</sup> induit l'élongation des cellules palissadiques
- Croissance tardive des plantes affectées: « mauvaise croissance des récoltes
- Modification de la durée de floraison
- Réduction de nombres des fleurs
- Diminution des graines cédées « une baisse des rendements
- Faible croissance des racines

### \*Effets physiologique et biochimique

- Inhibition osmotique de l'absorption de l'eau
- Augmentation de transport de Na<sup>+</sup> pour les tiges
- Accumulation excessive de Na<sup>+</sup> dans les feuilles → Augmentation de l'absorption de Cl<sup>-</sup>
- Augmentation de l'absorption de K<sup>+</sup>

-Diminution des PF et PS de tige et racine

-Diminution de l'absorption de P, Zn et  $Ca^{2+}$

-La toxicité directe (à certaines doses, variables selon les plantes, le sel (chlorure de sodium : Na Cl) devient toxique)

-Diminution des organites non toxiques

-Changement de l'expression génétique et de la synthèse protéique

-Activation spécifique des gènes impliqués dans la tolérance saline

- Changement des taux des phytohormones (ABA, CK)

### **Les mécanismes de tolérance**

**1-Efficacité d'absorption de  $K^+$**  :en présence de excé de sel (sélectivité  $Na^+,K^+$ ),Des plantes qui tolère le sel sont d'auté le propriété particulière qui leur pesante d'une par de s'alimenté en  $K^+$  grâce a la sélectivité  $K^+ > Na^+$  en niveau de système d'échange ionique et d'autre par de stocké  $Na^+$  dans le vacuole par échange ionique contre  $K^+$  ou de l'exclure dans le milieu .

**2-La surface évapotranspiration**, la fermeture stomatique et la réduction de la transpiration sont deux réponse commune en stress hydrique et la salin , donc par la fermeture stomatique et par l'apaisement de la cuticule et par la réduction de la surface foliaire constituent un mécanisme de protection pour les plantes contre les perte en eau .

**3-mécanisme physiologique de tolérance** : les sels en particule( Na cl) diminue le potentiel osmotique de la solution des sol au niveau de zone racinaire des plantes est 1<sup>ere</sup> effet de la salinité sur les plantes est la perte de turgescence , cette plasmolyse est suivie d'une réduction de potentiel osmotique intreieur de la plante qui s'ajuste en potentiel osmotique ,d'un milieu exterieur .

### **Etude expérimentale de la tolérance au sel**

La tolérance saline est définie par deux paramètres; le taux de survie et de production,elle est étudiée chez plusieurs espèces et contrôlée par des gènes localisés. L'adaptabilité des plantes se caractérise par les critères suivants:

1. Croissance et survie pendant une période suffisante.
2. Entretien d'un peuplement par reproduction, soit par semis soit par un moyen végétatif.
3. Production de biomasse de quantité et de qualité suffisantes.
4. Type de croissance acceptable pour le système de gestion.

5. Persistance dans le cadre d'un système de gestion rentable.

6. Avantages additionnels tels que lutte contre l'érosion, amélioration du sol, assèchement et amélioration de la faune sauvage ou du paysage.

### **3. Le stress thermique**

Pour effectuer sa croissance et son développement, chaque plante exige une gamme bien particulière de températures. Chaque plante possède une température optimale de croissance et de développement, qui ne peuvent se dérouler qu'entre des limites supérieures et inférieures. Lorsque la température avoisine ces limites, la croissance diminue et au delà, elle s'annule (Hopkins, 2007).

Le stress thermique est souvent défini quand les températures sont assez hautes ou basses pendant un temps suffisant pour qu'elles endommagent irréversiblement la fonction ou le développement des plantes.

Elles peuvent être endommagées de différentes manières, soit par des températures basses ou élevées de jour ou de nuit, par l'air chaud ou froid ou par les températures élevées du sol.

La contrainte thermique est une fonction complexe qui varie selon l'intensité (degré de la température), la durée et les taux d'augmentation ou de diminution de la température (Oukarroum, 2007).

#### **2-3- le Stress au froid.**

La sensibilité des plantes aux températures extrêmes est très variable. Certaines sont tuées ou lésées par les baisses modérées de température, alors que d'autres parfaitement acclimatées, sont capable de survivre au gel à des dizaines de degrés °C en dessous de zéro.

Dans certains milieux, les plantes sont soumises, occasionnellement, ou régulièrement de façon saisonnière, à des températures basses. La plupart d'entre elles sont capables de résister aux températures supérieures à 0°C. Cependant beaucoup de mésophytes peuvent être endommagées à partir de 15°C. Plus que résister au froid, elles évitent ces effets en ajustant leur cycle de vie aux périodes clémentes de l'année. Ce sont des plantes, comme le Maïs, d'origine tropicale ou subtropicale, dont la limite nord de culture en Europe est bornée par l'occurrence trop fréquente de températures fraîches.

#### **3-La température limite vie ,la nomenclature**

Des plantes peuvent être classifiées dans trois larges catégories selon leur capacité de réponses à des basses températures: les plantes sensibles au froid (survivent à >15°C), les plantes tolérantes au froid (survivent à DO C-15°C), et celles tolérantes au gel (survivent à <DoC) (Sharma et al. 2005). Beaucoup de plantes d'importance agronomique, tels que le coton, le soja, le riz, la tomate et le maïs sont sensibles au froid et peuvent être endommagées à +4°C. Dans le cas de fruits tropicaux, les dommages peuvent même se produire à +-12°C. D' autres espèces, tels que l'épinard et la patate peuvent survivre à des températures avoisinant DoC tandis que des céréales tempérées comprenant l'orge, l'avoine, le blé et le seigle, peuvent survivre à des températures de -3°C à -30°C (Lyon et Raison 1970; Sharma et al. 2005).

Beaucoup de plantes provenant des régions tempérées peuvent augmenter leur tolérance au gel après avoir été exposées aux basses températures (de 0°C à 10°C), un processus connu sous le nom d'acclimatation au froid. Un blé d'hiver en condition de croissance normale (20°C) va mourir à -50C, mais il peut survivre à -100C après une période d'acclimatation au froid de 5 semaines (Thomashow 1998; 1999). C'est un

processus réversible qui disparaît une fois que les températures remontent au-dessus de zéro, et il est nommé dés acclimatation au froid. Chez le blé, une exposition de S jours à une température de 20°C suffit pour perdre la tolérance.

Dans la nature, les basses températures au dessus de 0°C de l'automne et du début de l'hiver sont les principaux déclencheurs de l'acclimatation au froid bien que la qualité de la lumière et la photopériode peuvent aussi être impliquées dans cette réponse (Stitt et Hurry 2002). Les plantes qui restent actives pendant l'hiver doivent maintenir leur métabolisme primaire essentiel pour conserver une croissance minimale. Elles doivent lutter contre le froid qui diminue la vitesse des réactions enzymatiques et modifie la conformation des lipides membranaires et d'autres macromolécules ce qui a des conséquences sur la plupart des processus biologiques (Stitt et Hurry 2002). Ce processus complexe inclut des changements physiologiques, biochimiques et moléculaires. Ces changements influencent la croissance d'une plante, l'équilibre physiologique dans une cellule, la composition des membranes cellulaires, la quantité de produits antioxydants, et l'expression de gènes et de protéines spécifiques (Hannah et al. 2005).

Les espèces sont divisées en trois catégories (Pearce, 1999 in Côme, 1992) :

**Les plantes tolérantes au gel** qui sont capables de s'acclimater pour survivre à des températures inférieures à 0°C.

**Les plantes tolérantes au froid** mais sensibles au gel qui sont capables de s'acclimater à des températures inférieures à 12°C mais ne survivent pas à un gel.

**Les plantes sensibles au froid** pour lesquelles des températures inférieures à 12°C entraînent des dommages.

### **3-1 Températures critiques.**

On appelle températures critiques, les températures minima et maxima au-dessous et au dessus desquelles le végétal est tué. Elles sont extrêmement variables suivant les espèces et selon le stade de végétation (Diehl, 1975).

La gamme de températures compatibles avec une vie active est assez étroite : en général de -5 ou -10°C à 45°C. On observe seulement quelques exceptions : conifères de Sibérie, pouvant vivre normalement jusqu'à -65°C, lichens des régions froides assimilant encore à -20°C, le cactus peut résister à des chaleurs de 60° C

(René H, 1977).

## **4-le basse température et adaptation au gel**

### **4-1-Les basses températures positives (froid)**

Quand les plantes sont soumises à des températures sub-optimales (entre 10 et 20°C), la croissance et le développement se ralentissent, à des températures dites froides (entre 0 et 10°C), des dommages tissulaires et cellulaires apparaissent et à des températures négatives, les parties aériennes meurent.

Les effets du froid ne dépendent non seulement du minimum de température atteint, mais aussi de la nature et de la progressivité du refroidissement, de sa durée et du réchauffement, de l'espèce et de son âge.

### **4-1- 1 les effets de basse température positive (froid)**

Les symptômes des dommages causés par le froid sont le reflet d'un dysfonctionnement de toute série de métabolisme comme l'arrêt des mouvements de cyclose, la réduction de la respiration, de la photosynthèse et des synthèses protéiques

### **\* Changement de propriétés de membrane en réponse aux dommages de réfrigération**

Les membranes qui limitent les compartiments cellulaires sont des édifices lipoprotéiques souples à structures rigoureuses et variable. Le rôle puissant de la température sur les membranes porte sur deux points :

la disposition réciproque des molécules entre elles et la souplesse, voir la fluidité de l'ensemble. Les structures des macromolécules et les forces de cohésion assurant leurs édifices et leurs assemblages sont profondément modifiées par des variations de températures. Ceci concerne principalement les protéines et les lipides.

Un abaissement de température provoque une rigidification générale des phases lipidiques membranaires, l'importance de ces derniers à la tolérance aux basses températures a été démontrée par le travail avec des mutants et des plantes transgéniques auxquelles l'activité des enzymes particulières a mené à un changement spécifique de composition en lipides membranaires indépendant à l'acclimatation aux basses

**\*Effet sur la photosynthèse** températures.

La réponse des plantes de leurs activités photosynthétiques à la température reflète le régime thermique qu'elles subissent.

L'effet global que l'on mesure généralement par l'incorporation du CO<sub>2</sub>, et donc la résultante de multiples effets sur des étapes élémentaires du processus photosynthétique.

La réponse de l'incorporation du CO<sub>2</sub> à la température est une fonction de l'intensité de l'éclairement nécessaire et de la concentration en CO<sub>2</sub>. Un abaissement de la température agit sur la capacité de transfert d'électrons des membranes photosynthétiques et sur l'activité des enzymes clés intervenant sur le métabolisme carboné.

Le rendement quantique de l'incorporation de CO<sub>2</sub> varie selon les espèces et selon la température.

Chez les plantes de type C<sub>3</sub>, le rendement quantique de l'incorporation de CO<sub>2</sub> augmente lorsque la température diminue de 40 à 10°C°, cependant les espèces en C<sub>4</sub> ne présentent pas cette dépendance vis-à-vis de la température.

Ainsi lors d'un éclairement intense, le froid peut causer des dégâts au niveau des membranes de thylakoides en provoquant une inhibition de la synthèse des chlorophylles et une dégradation des pigments photorécepteurs .

### **\* Effet sur la respiration**

L'abaissement de la température provoque une diminution régulière de l'intensité respiratoire ; l'effet sur la respiration globale des tissus n'est en fait qu'une traduction de l'effet de la température au niveau des processus plus élémentaires.

La capacité des mitochondries extraites d'un tissu végétal à oxyder un substrat du cycle de Krebs est très sensible à la température, la réduction de la vitesse du transport de ces électrons à nécessairement des répercussions au niveau de la synthèse d'ATP et de la fourniture d'énergie aux tissus.

#### \* **Effet sur le transport**

Les plantes entières, à l'opposé des organes végétaux (racines, tiges.....), présentent un degré de sensibilité supplémentaire à l'égard des basses températures. En effet, le fonctionnement de chacune des parties de la plante dépend des échanges entre les différents organes constitutifs du végétale et, en particulier, de l'apport de substances nutritives provenant soit des racines (alimentation minérale), soit des feuilles (alimentation carbonée). Les mouvements de solutés qui se déroulent dans les tissus spécialisés ou le long d'organes spécialisés sont profondément affectés par l'abaissement de la température.

#### \* **Altération de la croissance**

La réponse la plus fréquente d'une plante soumise à une situation environnementale défavorable consiste en une réduction de croissance et une altération de la morphogenèse. De jeunes plantules présentent typiquement des signes de réduction de la croissance des feuilles, de flétrissement et de chlorose. Dans des cas extrêmes il apparaît un brunissement et des zones de tissus morts (nécroses) et/ou la mort de la plante peut s'ensuivre. Chez certaines plantes, le développement de l'appareil reproducteur est particulièrement sensible aux basses températures.

Pour beaucoup de plantes des régions tempérées, le froid non gelant peut avoir au contraire,

#### **4-1-2 les effets bénéfiques**

- Acquisition de l'aptitude à la germination .
- Débourrement des bourgeons (levée de la dormance) .
- Induction de la mise à fleur (vernalisation) .
- Acquisition de la résistance au gel (endurcissement) .
- Amélioration de la maturation de certains fruits...etc.

#### **4-1-3 Mécanismes d'acclimatation au froid.**

Lorsque certaines plantes sont exposées à basse température pendant une durée relativement longue, elles peuvent développer progressivement une adaptation au froid plus ou moins importante.

L'acclimatation au froid s'accompagne généralement d'une synthèse de nombreux composés, tels que les protéines, lipides ou métabolites divers, qui rendent le matériel tolérant au froid.

Des modifications des structures de ribosomes ont été observées, la structure de certaines enzymes peut être modifiée dans un sens qui augmente à la fois leur stabilité aux basses températures et leurs propriétés cinétiques.

La tolérance au stress oxydatif observée au froid, de même que la tolérance au gel ne sont pas constitutives : elles sont induites en réponse à des températures fraîches au-dessus de 0°C (de 1 à 5°C). Par exemple, le blé qui est habituellement tué par un gel modéré (-5 °C) peut survivre après une acclimatation au froid à des températures de -20°C. Un épinard cultivé à 20°C, puis acclimaté quelques jours à 5°C, devient très résistant aux effets conjugués des fortes lumières et du froid.

L'activité photosynthétique intervient dans ce processus d'endurcissement. Mais l'induction de la tolérance au gel par un traitement à un froid modéré (2°C à 5°C) dépend beaucoup des espèces considérées : les plantes des régions tropicales ne peuvent en effet pas survivre à un gel ni même à une température fraîche

(10°C à 15°C). D'autre part, on note chez quelques espèces, comme le blé et le seigle, que seules les feuilles qui se sont développées au froid sont plus tolérantes.

Cette tolérance disparaît chez le seigle préalablement cultivé à températures fraîches et transféré 3 jours à 20°C. Cependant il y a aussi une diversité de cette dé-acclimatation puisqu'elle demande au moins trois semaines chez la renoncule des glaciers et ne s'observe pas chez *Soldanella alpina*.

#### **\* Rôle de la lumière dans l'acclimatation au froid.**

La lumière en association avec les températures basses est nécessaire à l'acclimatation. Dans les conditions naturelles, l'endurcissement au froid est lié au raccourcissement des jours lorsque la mauvaise saison arrive. Les plantes qui ne perçoivent pas la longueur des jours sont incapables de s'acclimater au froid.

Wanner et Junttila (1999) montrent que la température durant la photosynthèse journalière n'est pas cruciale si elle n'est pas suivie par une nuit froide : En effet, lorsque la photopériode est de 12 heures, l'endurcissement est voisin chez les plantes maintenues en continu à 1°C et chez celles qui sont soumises à 21°C durant la journée et à 1°C durant la nuit. Par contre les plantes ne sont pas endurcies si elles sont placées à 1°C durant la journée et 21°C durant la nuit. La photosynthèse à 1°C ou 21°C est responsable de l'acclimatation en synthétisant des produits qui peuvent disparaître rapidement lorsque la température nocturne est élevée.

#### **\* L'acclimatation au froid est liée à l'accumulation de solutés.**

De façon générale, la tolérance au froid est reliée à l'accumulation de produits divers par les plantes. Ce sont souvent des polyols, du glycérol mais aussi des glucides, comme le tréhalose le saccharose. Ces substances abaissent, bien entendu, le point de congélation de l'eau dans la cellule, mais également, se lient aussi aux membranes, empêchant l'eau d'y parvenir et par conséquent d'y former des cristaux.

La proline que l'on trouve en abondance dans les choux après l'hiver pourrait avoir ce rôle.

Il est classique de mettre en relation chez les plantes pérennes vivant dans les régions où la période froide est marquée, l'augmentation de la concentration de solutés dans la plante lors de l'arrivée de la mauvaise saison avec l'augmentation de la résistance au froid ; cette acclimatation est réversible et la concentration de solutés diminue avec la résistance au froid lorsque la belle saison s'annonce.

#### **=Rôle des sucres solubles**

Lors d'un stress froid, les sucres jouent le rôle d'osmorégulateurs et de cryoprotecteurs grâce à l'accumulation de sucres solubles dans la cellule. Le plus abondant est souvent le saccharose qui est accompagné de glucose et de fructose (Winter et Huber, 2000). Chez *Arabidopsis*, le rapport sucres solubles/amidon augmente. Les sucres synthétisés ne sont donc pas mis en réserve. Ils ne sont pas non plus utilisés dans la structure de la plante.

La nature des sucres solubles qui apparaissent pendant l'endurcissement diffère selon les espèces et se modifie au cours de l'endurcissement. Dans un premier temps, des oses et des disaccharides sont synthétisés (glucose, fructose, saccharose), puis souvent des oligosaccharides (raffinose, stachyose). Il n'y a pas de sucre spécifique de la résistance : chez le pommier, c'est le sorbitol qui est stocké dans le xylème (Ichiki et Yamaha, 1982).

Les sucres peuvent jouer divers rôles dans la protection de la cellule contre le gel : abaissement de la température de cristallisation, réduction de la quantité de glace formée avec, comme conséquence, une diminution des stress hydrique, mécanique, osmotique et ionique. Ils ont aussi un rôle énergétique ; ainsi,

chez la chlorelle cultivée *in vitro* à l'obscurité (Hatano, 1978), l'endurcissement est inhibé par l'oligomycine, qui empêche les couplages énergétiques dans les mitochondries, et par le DCMU, inhibiteur des transferts d'électrons. De plus, seuls les sucres métabolisables (glucose, saccharose, galactose...) permettent l'endurcissement. Chez des arbres comme le peuplier, on note en effet, en période hivernale, un accroissement très net de l'activité des enzymes de la voie des pentoses phosphate.

Bien que de nombreux végétaux accumulent des sucres solubles pendant l'endurcissement, le fait n'est pas général (cas des plantes aquatiques et de nombreux rhizomes). Ainsi, la pomme de terre hydrolyse l'amidon sans que sa résistance au gel soit augmentée. Il n'existe pas non plus de corrélation absolue entre l'augmentation de la pression osmotique des cellules et la résistance au froid. Ainsi, l'oranger, non tolérant au gel, a une pression osmotique deux fois plus élevée que celle de certains conifères qui résistent jusqu'à la température de l'azote liquide.

En définitive, si la présence de sucres est nécessaire à l'endurcissement, leur accumulation résulte davantage d'un déséquilibre métabolique que d'une adaptation réelle de la cellule au gel. De plus, les concentrations atteintes restent en général nettement inférieures à celles qui sont utilisées dans la cryoconservation artificielle, technique qui nécessite l'emploi simultané d'un sucre et de substances cryoprotectrices comme le diméthylsulfoxyde (DMSO) ou le glycérol.

#### = **Acides aminés**

Certains acides aminés s'accumulent également pendant l'endurcissement au froid. Il en est ainsi de l'arginine dans l'écorce de peuplier et de la proline dans le chou et la luzerne. Dans le cas du chou, l'accroissement de la résistance au gel s'accompagne d'une augmentation de la proline à basse température et à la lumière (Le Saint, 1966).

La teneur en proline demeure élevée si les plantes restent au froid, même à l'obscurité ; elle diminue à température tiède, lorsque la plante se désendurcit. L'addition de proline permet un endurcissement artificiel de disques foliaires cultivés aseptiquement sur un milieu solide.

Une accumulation de proline se produit également dans le cas de la luzerne (Faquin 1978, 1982). C'est le collet et non les parties aériennes qui résistent le mieux au gel. L'endurcissement peut être induit à 1,5°C, 5°C ou 10 °C. Cependant, pour les températures les plus élevées, la résistance reste faible ; elle augmente pendant les trois premières semaines, puis diminue. Elle ne se maintient que si la température reste basse (1,5 °C). L'accumulation de proline se déroule différemment dans les

feuilles, le collet et les racines. Ainsi, dans les feuilles, la quantité de proline augmente d'autant plus vite que la température est basse, puis elle diminue. Dans le collet, au contraire, l'augmentation de la teneur en proline est plus importante à 10 °C qu'à 5 °C ou 15 °C. De plus, bien qu'une corrélation existe entre la résistance au gel de la luzerne et le contenu en proline des feuilles et du collet, l'accumulation de ce composé se produit en général après l'acquisition de la résistance ; elle serait une conséquence plutôt qu'une cause de l'endurcissement. Les différences observées entre les parties de la plantes résultent sans doute de transferts de proline des parties aériennes vers les racines. Ainsi, au cours du désendurcissement artificiel, la proline continue de s'accumuler rapidement dans les feuilles. Des expériences complémentaires réalisées en phytotron ont montré que l'accumulation de proline libre dans le collet et les racines est favorisée lorsque les parties aériennes sont à température élevée (21°C) et les parties inférieures à température basse (1,5°C). Lorsque ces températures sont inversées, le phénomène contraire a lieu. Le

refroidissement du ce collet et des racines est donc indispensable à l'accumulation de la proline synthétisée au niveau des feuilles.

La proline est souvent considérée comme un excellent marqueur de l'endurcissement au gel chez certains végétaux. Toutefois, son accumulation ne paraît pas se produire dans les arbres. De plus, la production de proline libre est fréquemment associée à un stress (sécheresse, salinité élevée, attaques virales, passage de l'état végétatif à l'état floral).

### **\*L'acclimatation au froid est liée à la synthèse d'enzymes du métabolisme carboné photosynthétique**

Lorsqu'une plante en C3 cultivée à température normale subit une température fraîche, la diminution de photosynthèse s'accompagne à la fois d'une inhibition d'activité des enzymes participant au cycle photosynthétique de réduction du carbone (CPRC) et d'un ralentissement de la synthèse de saccharose, qui entraîne une diminution du Pi disponible pour le passage des TP du chloroplaste vers le cytoplasme (le Pi est alors séquestré dans les chloroplastes).

Par exemple, la photosynthèse d'*A. thaliana* cultivé à 23°C et placé à 5°C (Strand et *al.*, 1999 in Cornic, 2007) est rapidement inhibée de 75% environ. Parallèlement il y a une réduction des activités de quelques enzymes du CPRC (Rubisco, glyceraldéhyde phosphate déshydrogénase, aldolases, transcétolases, phosphoribulokinase) et de la voie de synthèse du saccharose (SPS, FBPase cytosolique). Ces feuilles synthétisent surtout de l'amidon.

Durant les 10 jours qui suivent, chez les feuilles adultes au froid, on a une augmentation marquée du niveau des transcrits et de la quantité de FBPase cytosolique et SPS. La synthèse de saccharose augmente, relativement à la synthèse d'amidon. Les feuilles développées à 5°C présentent aussi un accroissement du volume cytoplasmique et une baisse de celui des vacuoles. Cela est perceptible par la diminution de la quantité d'eau dans les feuilles lorsque celles-ci ne souffrent d'aucun déficit hydrique. L'augmentation relative du volume cytoplasmique est à mettre en relation avec la forte augmentation des protéines foliaires et de la masse spécifique

des feuilles sèches qui passe de 2,1 à 7,1 mg cm<sup>-2</sup> sans que la teneur en amidon

n'augmente (la valeur élevée de la surface spécifique de la feuille est due en grande partie à la stimulation de la synthèse des protéines au froid). Les auteurs notent que l'acclimatation des feuilles adultes à 23°C placées à 5°C est incomplète (les réponses décrites plus haut pour les feuilles jeunes dont la croissance s'est fait à 5°C sont dans ce cas de moindre amplitude).

### **\* L'acclimatation au froid provoque un changement du degré de saturation des acides gras.**

Le niveau d'insaturation des acides gras dans les glycérolipides varie selon la température de croissance : une baisse de cette dernière entraînant une diminution de leur saturation. On montre que l'augmentation du degré d'insaturation avec la diminution de la température de croissance compense la décroissance de la fluidité membranaire qui se produit alors. On montre aussi que le degré d'insaturation est corrélé avec le maintien, à basse température, de l'activité des enzymes liées aux membranes (Nishida et Murata, 1996). Les deux acides gras principaux des membranes thylacoïdiennes sont l'acide  $\alpha$ -linoléique (18 :3) et l'acide hexadécatriéonique (16 :3). Il représente les 2/3 environ des acides gras qui entrent dans la composition de cette membrane et plus de 90% de ceux qui constituent le MGDG(monogalactosyldiacylglycerol), lipide majeur du thylacoïde. Les acides gras considérés sont donc importants lors de la biogenèse et la maintenance des chloroplastes durant la croissance à faible température.

**\* L'acclimatation au froid induit aussi la synthèse de protéines spécifiques.**

Le froid allume ou module l'expression de gènes spécifiques. On estime qu'environ 10% des gènes connus actuellement pour être activés par la sécheresse sont aussi activés par le froid : certaines des protéines qui apparaissent lors d'une acclimatation au froid apparaissent aussi lors d'une sécheresse ou après un traitement avec l'ABA, renforçant l'image que l'on a du lien entre gel et déficit hydrique et suggérant des liaisons entre les systèmes de signalisation en jeu dans la réponse à ces deux contraintes.

**= Les protéines CORs (Cold regulated).**

C'est le cas des protéines qui forment une classe de petites molécules très solubles protégeant les membranes lors de la baisse de température. Leur étude est avancée chez *Arabidopsis thaliana*. Ce sont des protéines nouvelles, simples, formées seulement que de quelques acides aminés avec des séquences répétées. Beaucoup d'entre elles ont des régions capables de former des hélices  $\alpha$  amphiphilic(c'est à dire qui ont à la fois des zone hydrophiles et des zones hydrophobes). Ces régions jouent probablement un rôle dans la stabilisation des membranes durant une période de gel où de sécheresse : les deux contraintes produisant une déshydratation des cellules.

Par exemple le gène *COR15a* code pour un polypeptide de 15 kD qui est dirigé vers le stroma du chloroplaste. Le polypeptide mature dont la masse molaire est de 9.4 kD est extrêmement hydrophile puisqu'il reste soluble dans l'eau bouillante. Artus et *al.*, (1996) ont tenté de voir si ce polypeptide pouvait protéger les chloroplastes contre les effets négatifs des basses températures.

Le gène est exprimé chez *A. thaliana* dont les feuilles ou des protoplastes isolés des feuilles sont soumis à des températures allant de 0 à -11 °C durant 30 min. L'effet du traitement sur les feuilles est évalué en mesurant le rapport Fv/Fm à température ordinaire : ce rapport est pris ici comme indiquant un état d'intégrité des chloroplastes. La tolérance aux basses températures des chloroplastes in vivo est augmentée de 2°C environ, ce qui représente environ 1/3 de l'augmentation de la tolérance induite par une acclimatation des plantes au froid.

On suppose que la protéine stabilise la structure du thylacoïde au froid, bien que la façon dont elle pourrait exercer ce rôle reste évasive. La tolérance des protoplastes est déterminée utilisant une coloration vitale (diacétate de fluorécéine) après le traitement. Les protoplastes vivant excluent le colorant. Bien que la protéine soit adressée aux chloroplastes la survie des protoplastes est augmentée après un traitement entre -4 et -8 °C. Cela montre bien que COR15a contribue au maintien de la stabilité du plasmaleme, tout en posant, évidemment, un problème sur son mode d'action, puisqu'elle est adressée aux chloroplastes.

Il existe en fait peu de renseignements sur la modulation de l'expression de ces gènes par les autres facteurs de l'environnement. Le travail de Wanner et Junttila, (1999) nous donne quelques éléments sur ces points. Ces auteurs montrent que les ARNms de trois gènes *COR* (*COR15*, *COR47* et *COR78*) sont détectables 3 à 6 heures après le passage d'*A. thaliana* à 1°C et s'accumulent jusqu'à atteindre une concentration qui reste stable plusieurs jours.

**= Les protéines antigel (AFPs : anti freeze proteins)**

Les AFPs se lient aux cristaux de glace isolés ou aux bordures de blocs cristallins existants, les isolant de l'eau ambiante et inhibant ainsi la formation de glace dans les espaces intercellulaires.

De cette façon, le point de congélation de l'eau est abaissé bien que son point de fusion ne soit pas modifié, c'est ce qui est appelé l'hystérésis thermique. Ces protéines augmentent donc la plage thermique dans laquelle se produit la surfusion

Les plantes qui ne tolèrent pas la présence de cristaux de glace dans leurs tissus ne produisent pas d'AFPs. Ainsi on n'en détecte pas dans l'apoplasme de plantes sensibles au froid comme le Maïs et le Tabac, et ce, même après qu'elles aient subi une période d'acclimatation à de températures fraîches.

Elles ont été détectées dans différents organes de plantes qui subissent l'hiver sous une forme ou une autre : les bourgeons, les baies, les racines, les rhizomes et tubercules, les troncs etc....

#### 4-1-4 L'endurcissement au froid

Les plantes ne restent pas sans réaction devant l'agression représentée par l'abaissement de la température du milieu. Un mécanisme se déclenche pour contrarier l'effet immédiat des basses températures : L'endurcissement se définit comme l'acquisition de résistance au gel par les plantes. Les processus de l'endurcissement au froid sont sous contrôle d'un système génétique très complexe. Ce système est induit par les basses températures durant la période d'acclimatation ainsi que la lumière et l'état physiologique des plantes (Boitard, 2002 cité par Lahmar R. & Khalfi N ; 2004 in Côme, 1992).

#### 4-2 Les basses températures négatives (gel).

Le gel s'accompagne en général de la formation de cristaux de glace dans les tissus de la plante. En période hivernale, les effets du gel dépendent de son intensité plus que sa durée. Il peut agir directement sur le végétal et produire une nécrose des bourgeons, le noircissement du xylème, l'éclatement des troncs et la mort des feuilles pour les plantes à feuillage persistant. La résistance des plantes au gel ne reste pas toujours constante pendant toute la période hivernale. Ainsi, des gelées moyennes mais brutales, survenant après une période prolongée de redoux, sont parfois plus dangereuses que des gelées plus intenses, mais plus progressives.

Le gel peut aussi agir indirectement, en déchaussant les jeunes semis ou bien encore, au printemps, en s'opposant à l'absorption racinaire lorsque le sol reste gelé sur une grande profondeur. Les dégâts provoqués par le gel peuvent souvent apparaître dans des circonstances variées. Ainsi, des gelées de printemps, même peu importantes, sont susceptibles de détruire des bourgeons végétatifs ou floraux au début de la reprise de la croissance (débourrement).

#### 4-2-1 Variations de la résistance au gel selon les végétaux.

Selon le comportement, on distingue plusieurs catégories de plantes :

##### \*Plantes sensibles au gel

Elles ne résistent pas à la formation de glace dans leurs tissus et sont incapables de s'endurcir, peuvent résister aux gelées de moyenne importance.

##### \*Plantes moyennement résistantes au gel

Ces végétaux supportent la formation de glace dans leurs tissus.

##### \*Plante très résistantes au gel

Chez les plantes qui résistent au gel, il se forme, de façon générale, des cristaux de glace dans l'apoplasme (et non dans le cytoplasme), à proximité ou même au contact des parois cellulaires.

C'est le cas des céréales d'hiver, des choux, de la grande Fétuque, qui peuvent survivre à des températures de -25 °C. C'est le cas aussi de beaucoup d'espèces ligneuses (Cornic, 2007). La résistance aux très basses

températures est particulièrement marquée dans le cas des arbres des régions tempérées, dans la plupart résistent jusqu'à des températures de  $-40^{\circ}\text{C}$ .

Les différences d'aptitude des végétaux à résister au gel ont diverses origines.

= **Absence de cristallisation** : par ce moyen, la plante évite la formation de cristaux de glace internes ; ce mécanisme est favorisé par l'abaissement de la température de cristallisation et par les possibilités de surfusion (un liquide est en surfusion s'il ne cristallise pas, même à une température inférieure à sa température de cristallisation).

=**Tolérance à la formation de la glace** : c'est le mode de résistance le plus répandu chez les végétaux ; il nécessite une adaptation particulière qui se développe uniquement pendant la période hivernale.

=**Différenciation d'organes de résistance** : les plantes sensible au gel peuvent développer des organes de résistance : semences, grain de pollen, qui à l'état déshydraté, résistent jusqu'à la température de l'azote liquide.

#### 4-2-2 stratégies et mécanismes de tolérance au gel

Les mécanismes de défense sont variés, ils vont de la production de protéines ou d'autres composés glucidiques par exemple, pour stabiliser les membranes, à la modulation de la température à laquelle l'eau va s'organiser en cristaux de glace.

##### \* **Phénomène de surfusion (supercooling).**

La surfusion survient du fait de l'absence de germes de nucléation qui sont indispensables à l'initiation de la formation de glace. La température de l'eau qui se refroidit lentement peut être considérablement inférieure à  $0^{\circ}\text{C}$  (jusqu'à  $-38^{\circ}\text{C}$  pour l'eau pure, mais habituellement jusqu'à  $-5^{\circ}\text{C}$ ,  $-10^{\circ}\text{C}$ ) avant que la glace ne se forme. La température remonte brutalement à  $0^{\circ}\text{C}$  lorsque les premiers cristaux de glace apparaissent. Ce réchauffement, d'une température négative jusqu'à  $0^{\circ}\text{C}$ , est dû à la libération de la chaleur de fusion. Ce phénomène de surfusion est courant chez les plantes. La température à laquelle se forme la glace, lorsqu'elles subissent régulièrement des périodes de froid est souvent comprise entre  $-2^{\circ}\text{C}$  et  $-3^{\circ}\text{C}$ , voire  $-12^{\circ}\text{C}$ . Chez certains organes, en particulier les bourgeons végétatifs de conifères et les bourgeons floraux

du pommier et d'autres arbres fruitiers à feuilles caduques, on observe malgré la formation de cristaux de glace dans les écailles des bourgeons et dans les organes voisins, des températures de surfusion accentuée atteignant  $-40^{\circ}\text{C}$ .

##### \* **Formation de la glace à l'extérieure de la cellule, dans l'apoplasme. Sécheresse induite par le gel**

La congélation se fait d'abord dans les vaisseaux du xylème : c'est là que se trouve le plus grand volume d'eau disponible, et la congélation, qui se produit avec une certaine probabilité, fonction de la présence de particules(germes de congélation) servant de point de départ à la formation de premiers cristaux et du degré de surfusion, apparaîtra d'abord dans un volume d'eau important.

C'est là aussi que la concentration en solutés de l'eau est la plus faible. Et par conséquent là où le point de congélation est le plus élevé. La diminution du volume cellulaire induit par la formation de glace dans le compartiment extracellulaire produit des contraintes sur le plasmalemme puisque la couche bilipidique dont il est formé n'est que très peu élastique. A cela s'ajoute le fait que la paroi cellulosique qui entoure les

cellules forme un cadre rigide : la diminution du volume cellulaire peut entraîner une rupture des connections qui unissent les cellules d'un même tissu, via les plasmodesmes, provoquant des dommages additionnels.

### **\*Les germes de congélation.**

Les agents autour desquels l'eau va s'organiser en structures qui ressemblent à des cristaux de glace, qui sont responsables de sa cristallisation, sont des germes de congélation. Ils peuvent être des poussières, mais être aussi de nature biologique. En particulier, les plantes infestées par des microorganismes sont beaucoup plus sensibles au gel et que cela n'est en rien dû à une réduction de leur résistance en raison de l'infection. De même les plantes se trouvant dans une zone polluée et chez lesquelles on trouve quelques microparticules dans les espaces intercellulaires sont plus sensibles au gel.

La première structure cristalline s'organise autour de séquences particulières dont certaines sont très conservées. La disposition des acides aminés qui les constituent permettrait une disposition locale des molécules d'eau en structures voisines de celle des cristaux de glace. Il est bien clair cependant que toutes les protéines ne jouent pas ce rôle, mais la relation entre la structure des séquences efficaces et l'organisation des molécules d'eau autour d'elles reste très largement encore à explorer.

Les phospholipides membranaires interviennent aussi, en permettant probablement l'ancrage et un positionnement adéquat des protéines membranaires jouant le rôle de germes de congélation.

## **5–Les dommages causés par le froid et le gel**

La formation de glace dans une plante affecte sévèrement la survie et la croissance d'une plante. La glace intracellulaire fait périr immédiatement les cellules par une destruction de l'intégrité du protoplasme. Il est un peu plus commun qu'il y ait formation de glace à l'extérieur de la cellule dans les espaces tissulaires (quy 2003). Le liquide extracellulaire gèle à une température plus élevée que l'eau intracellulaire. La glace formée dans les espaces extracellulaires provoque un écart entre la concentration de liquide intra-et extracellulaire et ainsi cause un mouvement de l'eau intracellulaire vers l'extérieur. De toute évidence, ce déséquilibre osmotique provoque la déshydratation cellulaire (Thomashow 1998). Les effets du gel dépendent du génotype de la plante, de l'âge de la plante, et de la durée et sévérité du froid. En général, une plante germinale est plus sensible au gel. Les symptômes de dommages en raison d'une baisse de température incluent des lésions visibles telles que l'apparence de tissu rempli d'eau, la décoloration interne du tissu, et la sénescence accélérée (Shanna et al. 2005). Lorsque la température baisse à la vitesse de 1°C par heure dans la nature, la formation de cristaux de glace cause un déséquilibre d'eau entre le milieu intracellulaire et l'espace extracellulaire. Ces changements physiologiques sont des dysfonctionnements transitoires car si la plante regagne la température normale de croissance, une demi-heure est assez pour faire la transition entre ces deux états chez le trèfle blanc et le pavot de Californie, deux plantes tolérantes au froid (McCully et al. 2004). Toutefois, chez les plantes sensibles au froid, les changements auront des répercussions irréversibles au niveau des membranes cellulaires et du métabolisme cellulaire (Sharma et al. 2005). Une forme de blessure fatale peut survenir lorsque l'eau gèle dans le conduit du xylème et le gaz qui s'échappe de cette masse de glace peut former une bulle d'air et interrompre la circulation d'eau pour causer directement un stress hydrique (Pearce 2001)

## Conclusion

Chez les végétaux, le degré d'adaptation au froid augmente lorsque l'on passe des zones tempérées chaudes à des latitudes de plus en plus septentrionales. Toutes choses égales par ailleurs, le maximum de résistance aux basses températures est le fait des organes de durée : graines, bulbes, rhizomes, tubercules, bourgeon, etc. Il existe une corrélation directe entre la résistance d'un organe végétal au froid et son degré de déshydratation. De ce fait, les graines dont la teneur en eau est inférieure à 5 % représentent les formes végétales qui, dans chaque espèce, sont susceptibles de supporter les plus faibles températures.

En revanche, les pousses et les autres organes végétatifs riches en eau supportent mal l'action du froid et gèlent en règle générale à des températures comprises entre  $0^{\circ}\text{C}$  et  $-5^{\circ}\text{C}$ . La plupart des espèces tropicales meurent au voisinage de  $0^{\circ}\text{C}$ , certaines d'entre elles «gèlent» même à des températures de l'ordre de  $3^{\circ}\text{C}$ ! La résistance des plantes au gel est liée à la moindre teneur hydrique de leurs tissus et à l'abaissement du point de congélation de leur hyaloplasme par hausse de la teneur en holosides et en acides aminés.

Le froid n'exerce pas nécessairement une action néfaste sur les végétaux. Ceux des zones tempérées froides et subarctiques exigent même une exposition de durée suffisante à des températures voisines ou inférieures à  $0^{\circ}\text{C}$  pour pouvoir se développer normalement.

En effet, pendant la mauvaise saison, les graines, bourgeons et autre forme de durée entrent en dormance. Ce phénomène de la vernalisation avait été mis à profit par le tristement célèbre Lyssenko pour activer des céréales d'hiver par exposition artificielle de leurs semences au froid. L'application agronomique de ce procédé présente une grande importance dans les pays froids car cela permet d'utiliser au printemps ces semences lorsque des conditions automnales défavorables ont interdit les semailles des blés d'hiver en temps utile, avant que les chutes de neige ne viennent empêcher toute pratique culturale. Chez les plantes bisannuelles (carotte, betterave, giroflée), l'achèvement de la croissance et la fructification sont impossibles en l'absence de vernalisation. Cultivées en serre pendant la période hivernale, ces végétaux restent au stade de rosette sans jamais fleurir.

Le stress provoqué par le gel est fréquemment rencontré chez les arbres et buissons des régions tempérées, des espèces de mélèze survivent dans la plupart des forêts de plus septentrionales de Sibérie, où les températures peuvent atteindre  $-65, -70^{\circ}\text{C}$ , même les plantes les plus résistantes peuvent subir des dommages importants ou mourir, lorsqu'elles sont exposées à des températures de  $0^{\circ}$  ou situées juste en dessous, lors de périodes de croissance active.

## **4.LA POLLUTION :**

La pollution désigne la dégradation d'un biotope par l'introduction, généralement humaine, de substance chimique ou organique, gènes ou de radionucléides « radioactivité », lumière artificielle, alternant de manière plus ou moins importante le fonctionnement de l'écosystème, par extension de phénomène géologique comme une éruption volcanique.

— La pollution d'origine humaine peut avoir un impact très important sur la santé et dans la Biosphère en témoigne l'exposition aux polluants et le réchauffement climatique qui transforme le climat de la terre

son écosystème .en entraînent l'apparition de maladies inconnues jusqu'alors dans certaines zones géographiques , des migrations de certaines espèces , voire leur extinction si elle ne peut s'adapter à leur nouvel environnement biophysique.

\_C'est après la seconde guerre mondiale que prise de conscience des répercussions de l'activité humaine sur l'environnement voir le Jour , parallèlement à la naissance de l'écologisme et de l'écologie , les préoccupations environnementales conduisent

\_ Les gouvernements à prendre des mesures pour limiter l'empreinte écologique de la population humaine et pour contrôler les activités humaines contaminantes .

## **1/ POLLUTION HYDRIQUE**

### **Qu'est-ce que la pollution de l'eau?**

On appelle pollution de l'eau toute modification chimique, physique ou biologique de la qualité de l'eau qui a un effet nocif sur les êtres vivants la consommant. Quand les êtres humains consomment de l'eau polluée, il y a en général des conséquences sérieuses pour leur santé. La pollution de l'eau peut aussi rendre l'eau inutilisable pour l'usage désiré.

### **Quels sont les principaux polluants de l'eau?**

Il y a plusieurs classes de polluants de l'eau. La première concerne les agents provoquant des maladies. Ce sont les bactéries, les virus, les protozoaires et les vers parasites qui se développent dans les égouts et les eaux usées non traitées.

Plus d'information sur les effets des micro-organismes sur la santé

Une deuxième catégorie de polluants concerne les déchets qui ont besoin d'oxygène, les déchets qui peuvent être décomposés par des bactéries ayant besoin d'oxygène. Quand ces bactéries qui décomposent les déchets sont nombreuses à être en action, cela peut abaisser le niveau d'oxygène de l'eau, ce qui entraîne la mort d'autres espèces vivant dans l'eau, telles que les poissons.

Une troisième classe de polluants de l'eau est celle des polluants inorganiques hydrosolubles, tels que les acides, les sels et les métaux toxiques. De grandes quantités de ce type de composé rendent l'eau inapte à la consommation et entraînent la mort de la vie aquatique.

Une autre classe des polluants de l'eau est celle des nutriments; ce sont des nitrates et des phosphates hydrosolubles qui entraînent une croissance excessive des algues et des plantes aquatiques, ce qui diminue la quantité d'oxygène dans l'eau. Les poissons meurent, et lorsque ce type de polluants se trouvent dans l'eau potable, ils peuvent entraîner la mort des enfants en bas âge.

L'eau peut également être polluée par un certain nombre de composés organiques tels que le pétrole, les plastiques et les pesticides, ils sont nocifs pour l'homme ainsi que pour toutes les plantes et tous les animaux vivant dans l'eau.

Une catégorie très dangereuse de polluants est celle des sédiments en suspension, car elle diminue l'absorption de la lumière par l'eau et ces particules diffusent les composés dangereux tels que des pesticides

dans l'eau.

Enfin, les composés radioactifs hydrosolubles peuvent causer des cancer, des malformation chez les nouveau-nés et des modifications génétiques et sont donc des polluants de l'eau très dangereux.

### **D'où vient la pollution de l'eau?**

En général la pollution de l'eau est due aux activités humaines. Il y a deux sortes de sources de pollution, les sources localisée et les non-localisée. En ce qui concerne les sources localisées les polluants sont déversés dans un lieu précis des eaux de surface grâce aux canalisations ou aux égouts. En ce qui concerne les sources non localisées on ne peut pas remonter jusqu'à un lieu précis de déversement des polluants.

On peut donner quelques exemples de sources localisée: les usines, les installations de traitement d'eaux d'égout, les mines souterraines, puits de pétrole, les pétroliers et l'agriculture.

Ainsi que des exemples de sources non localisée: les dépôts d'acide de l'air, le trafic, les polluants diffusés par les fleuves et ceux provenant des eaux souterraines.

Il est difficile de contrôler la pollution non localisée car il on ne peut en retrouver les auteurs.

### **Comment détectons-nous la pollution de l'eau?**

La pollution de l'eau est détectée en laboratoire, où on recherche la présence de différents polluants dans de petits échantillons d'eau. Des organismes vivant, tels que les poissons peuvent également être utilisés pour détecter la pollution de l'eau. Des changements dans leur comportement ou dans leur croissance nous informent que l'eau dans laquelle ils vivent est polluée. Des propriétés spécifiques de ces organismes peuvent même nous fournir des informations sur le type de pollution de leur environnement. Les laboratoires utilisent également des modèles informatiques pour déterminer quels dangers il peut y avoir dans certaines eaux. Ils importent les données qu'ils possèdent sur l'eau dans l'ordinateur, et l'ordinateur détermine alors si il y a des impuretés dans l'eau.

## **2/ POLLUTION THERMIQUE :**

La pollution thermique est une modification de la température du milieu, le plus souvent à la hausse. En général, ce type de pollution est causé par les mécanismes de refroidissement des industries et centrales énergétiques qui se traduisent par des rejets d'eau chaude dans l'environnement. Toutefois, les rejets d'eau usée urbaine et les drainages agricoles peuvent aussi être responsables d'une élévation de la température des eaux.

Cette forme de pollution physique peut paraître anodine au regard des pollutions chimiques, compte tenu de la toxicité et des effets à long terme de certaines molécules. Pourtant, cette pollution thermique diffuse peut avoir des effets locaux importants, en particulier sur les écosystèmes aquatiques.

L'élévation de température d'un milieu a deux effets notables :

- Réduction de la quantité d'oxygène dissous dans les milieux aquatiques ;

- Augmentation de l'activité métabolique des organismes (jusqu'à un certain seuil) et donc leur consommation en oxygène.

Il semble aussi que l'augmentation de la température accroisse la sensibilité des organismes aux substances toxiques.

En fonction des modalités de cette pollution thermique (degré de variation de la température, vitesse de la modification, etc.) et des autres facteurs de stress présents dans le milieu (pollution chimique, sécheresse...), la physiologie des organismes est plus ou moins perturbée, avec parfois des phénomènes de mortalité.

Il s'ensuit une modification des communautés biologiques du milieu avec apparition de zones mortes, modification des espèces présentes et appauvrissement de la biodiversité. Les bactéries et les virus peuvent profiter de l'élévation de température et réduire la qualité sanitaire des eaux ainsi que les capacités épuratrices du milieu.

Une autre conséquence de la pollution thermique, suite à l'apparition d'îlot thermique urbain par exemple, est l'établissement de populations d'espèces des milieux chauds, potentiellement invasives ou porteuses de maladies.

### **Qu'est-ce que les pluies acides et comment se développent-elles?**

En général l'eau de pluie a un pH d'environ de 5 à 6. C'est donc naturellement un liquide neutre, légèrement acide. Lors des précipitations l'eau de pluie dissout les gaz tels que le dioxyde de carbone et l'oxygène. De nos jours l'industrie émet des quantités importantes de gaz acidifiants, tels que les oxydes de soufre et le monoxyde de carbone. Ces gaz se dissolvent également dans l'eau de pluie, de ce fait le pH des précipitations change, le pH de l'eau de pluie est alors égal ou inférieur à 4. Quand une substance a un pH inférieur à 6,5, elle est acide. Plus le pH est faible, plus la substance est acide. C'est pourquoi les pluies avec un faible pH, dû à la dissolution des émissions industrielles, sont appelées les pluies acides.

### **3/ POLLUTION ATMOSPHERIQUE**

L'atmosphère constitue un des éléments de notre écosystème, au même titre que la biosphère et la lithosphère. Ainsi, afin d'étudier la pollution atmosphérique, convient-il de faire tout d'abord de la géographie physique. L'atmosphère peut se diviser en deux parties : la troposphère de 0 à 12 kilomètres d'altitude et la stratosphère de 12 à 40 kilomètres d'altitude. La stratosphère contient la couche d'ozone. La molécule d'ozone comprend trois atomes d'oxygène. Oxydant très puissant, il absorbe la quasi-totalité des rayons ultraviolets, nous protégeant ainsi contre leur action. Cette couche protectrice d'ozone pourrait être détruite par les matériaux anthropiques tels que les aérosols; en effet, le chlore libéré provoque des réactions d'oxydoréductions et transforme l'ozone en oxygène. Ainsi, parle-t-on du trou de la couche de l'ozone. La pollution atmosphérique n'est pas seulement présente en altitude, elle est également visible dans des villes tels que Mexico ou Athènes ou dans des phénomènes météorologiques comme les pluies acides ou l'effet de serre. C'est l'air qui est pollué. Celui-ci a trois constituants principaux : le diazote à 78

%, le dioxygène à 21 % et l'argon à 0,03 %. Pourtant, d'autres éléments viennent se rajouter à ces constituants, polluant de cette façon l'air, comme les chlorofluorocarbures (CFC) dont l'élément chlore détruit la couche d'ozone. Il existe donc de nombreuses causes naturelles et humaines à cette pollution, qui a entraîné des conséquences désastreuses. Pourtant, on peut voir qu'il existe des solutions pour la parer.

## LES POLLUANTS

Les polluants proviennent pour la plupart de composés naturels et gazeux.

Le monoxyde de carbone (CO) est le plus répandu, il se produit dans toutes les combustions incomplètes, quel que soit le combustible. A Paris, en 1994, il a fait 12 morts et 152 hospitalisés. Le dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>) est émis principalement lors de la combustion du fuel et du charbon, du gas-oil par les diesels et du raffinage des pétroles. Sa présence dans l'air ne doit pas être supérieure à 250 microgrammes par m<sup>3</sup>. Ce polluant est forte baisse. Le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), même si c'est un constituant naturel de l'atmosphère, contribue également à la pollution atmosphérique. Le CO<sub>2</sub> est un des principales causes de l'effet de serre. Il a deux origines : pour les  $\frac{3}{4}$ , il vient de la combustion des carburants fossiles, pour  $\frac{1}{4}$ , de la destruction des forêts tropicales. En outre, la quantité de carbone rejeté dans l'atmosphère a considérablement augmentée à ce siècle, passant de 0,09 milliards de tonnes en 1850 à 5,5 milliards de tonnes de nos jours. Le dioxyde d'azote (NO<sub>2</sub>) contribue à la destruction de l'ozone au niveau de la basse stratosphère. Il réagit avec les hydrocarbures et provoque les smogs photochimiques. La production annuelle de dioxyde d'azote est de 160 millions de tonnes. Il provient notamment des combustions à haute température. Ainsi, c'est un des grands polluants des villes. En effet, il apparaît avec les industries et le chauffage en urbain. Le méthane (CH<sub>4</sub>) n'a pas pour cause le développement des villes, mais l'agriculture. En effet, il provient de la fermentation digestive notamment des bovins (à 74%), des rizières et des brûlages de matières végétales. Une vache produit en moyenne 90 kg de méthane par an. Le protoxyde d'azote (N<sub>2</sub>O) ou oxyde nitreux contribue à l'effet de serre. Il est notamment utilisé dans la crème Chantilly. Les émissions naturelles provenant du sol et des océans sont de 10 millions de tonnes par an. Le plomb a deux origines très connues : l'essence et la peinture. A Paris, la concentration de plomb est de 0,20 µg/m<sup>3</sup>. Il provoque le syndrome de saturnisme par empoisonnement du plomb contenu dans les peintures. L'ozone (O<sub>3</sub>) est également un polluant, même s'il nous protèges des rayons UV. En effet, à basse altitude, il est nocif pour la santé et est un des responsable des smogs. Enfin, on peut citer les composés organiques volatils non méthaniques (COVNM) qui sont dégagés lors d'une combustion incomplète et qui ont parfois des effets cancérigènes comme les hydrocarbures aromatiques.

Tous ces polluants sont naturels. Ce n'est donc pas leur présence dans l'atmosphère, mais leur trop forte concentration qui pollue. Pourtant, d'autres polluants sont cette fois de nature anthropique. Les chlorofluorocarbures (CFC) sont utilisés dans les agents gonflants (avec les mousses plastiques isolantes), les solvants, les réfrigérateurs, les climatiseurs et les bombes aérosols (laque, parfum, mousse à raser). Ce polluant est en grande partie responsable de la destruction de l'ozone par le chlore ; c'est pourquoi de nombreuses mesures ont été prises pour diminuer l'utilisation de ce produit.

## **LES CAUSES :**

On pourrait diviser ses causes en deux parties : tout d'abord, celles provenant directement de la nature, puis celles qui sont dues à une action dévastatrice de l'homme.

Les origines naturelles sont notamment les activités géologiques de la terre, comme le volcanisme (les volcans en éruption envoient du soufre dans l'air) et les événements météorologiques tels que les orages qui font apparaître du dioxyde d'azote. L'autre grande cause naturelle de la pollution atmosphérique est la combustion qui provoque un dégagement de CO<sub>2</sub>.

La cause la plus directe pour les humains de la pollution est la respiration. En effet, en respirant, on expire du CO<sub>2</sub>, qui comme nous l'avons vu, est un polluant. Pourtant, la pollution anthropique est surtout due à la combustion de carburants fossiles. Celle-ci est très récente. Ainsi, on peut observer l'évolution de cette pollution dans l'histoire. Pendant la Préhistoire et l'Antiquité, la pollution était alors faible et était principalement due au défrichage et à la destruction progressive de la végétation. Avec l'apparition des villes, la pollution provient du chauffage au bois et au charbon, ce qui provoque des combustions et des dégagements de CO<sub>2</sub>. Cette pollution s'accroît largement lors de la révolution industrielle. Les industries utilisent des machines et découvrent de nouveaux types d'énergie comme le pétrole. A l'époque contemporaine, un nouveau type de pollution s'est ajouté à la pollution industrielle : la pollution automobile. La principale cause anthropique sont les combustions. Celles-ci se font à tous les niveaux ; depuis les moteurs de voitures et les installations de chauffage au centrale électrique. La combustion de ces éléments : le pétrole, le gaz naturel et le charbon libère du CO<sub>2</sub> et du SO<sub>2</sub>. C'est donc les moyens de transports actuels qui font des parties des plus grands polluants. Les transports sont responsables du rejet de 87 % de monoxyde de carbone, à cause des combustions incomplètes et du rejet de 70% d'oxydes d'azotes. L'agriculture est la plus vieille origine de pollution. L'élevage bovin entraîne le rejet de méthane (CH<sub>4</sub>) dans l'atmosphère, de même que les cultures en rizière. La déforestation est aussi entraînée par combustion et donc par dégagement de dioxyde de carbone. En effet, 25% des rejets de CO<sub>2</sub> proviennent de la destruction des forêts tropicales. Chaque année, la déforestation détruit 210 milliers de km<sup>2</sup> de forêt tropicale

Même si la pollution atmosphérique provient en partie de la nature, notamment par le volcanisme, les causes anthropiques représentent néanmoins plus des 2/3 des origines de cette pollution. Certaines causes ont été toujours existés comme l'agriculture, pourtant, la pollution a considérablement augmenté depuis la révolution industrielle, principalement à cause des combustions de carburants fossiles. LES

## **CONSEQUENCES :**

Les conséquences de la pollution sont aussi nombreuses que les polluants ; elles affectent aussi bien l'être humain lui-même que son environnement. Il y a les conséquences à long terme, comme la destruction la couche de l'ozone, l'effet de serre et les changements de climat et les conséquences à court terme, telles que la pollution urbaine.

### 1) L'environnement de l'homme

La pollution urbaine a pour principale polluant le dioxyde de soufre et les particules en soufre. Un trafic routier dense et un ensoleillement intense combinés sont également des facteurs aggravant la pollution. On peut remarquer que les villes polluées font quasiment toutes parties des pays du Tiers-Monde. Ainsi, la palme de la ville la plus polluée revient à Mexico où vivent plus de 20 millions de personnes. Plus de 3 millions de véhicules y circulent chaque jour et son altitude (2300 mètres) réduit la présence d'oxygène dans l'air. Les conséquences en sont affligeantes : cette pollution fait 100 000 morts par an. Respirer à Mexico est aussi dangereux que fumer deux paquets de cigarettes par jour. Enfin, 70 % des enfants nés à Mexico sont contaminés par le plomb. Dans le palmarès des villes les plus polluées, on peut également citer Athènes (qui a atteint en 1992 un seuil d'urgence avec 500 mg/m<sup>3</sup> de dioxyde d'azote, alors que la norme est de 200 µ/m<sup>3</sup>), Budapest (où le niveau de plomb est 30 fois supérieure à la norme), Bangkok, Los Angeles, Bombay, Calcutta, Pékin et Shangai. On peut remarquer que les villes des pays pauvres sont les plus affectées par la pollution. En France, les villes les plus polluées sont Marseille, Dijon, Montpellier, Lyon et Paris. Après la pollution des villes, on peut parler de la pollution photochimique qui se trouve principalement en périphérie des villes. Elle résulte de la combinaison des polluants suivants : NO<sub>x</sub>, CO qui réagissent entre eux et avec les UV. L'ozone est le principal polluant photochimique. Il aide à la constitution du smog, mélange de smoke (fumée) et de fog (brouillard) qui forme un épais brouillard.

Le climat est aussi affecté par la pollution. Comme on le verra plus tard avec l'effet de serre, il provoque un réchauffement de la température. Mais il est également responsable d'ensoleillement réduit (parfois de 50 % en hiver). Les précipitations sont plus nombreuses.

### 2) L'homme lui-même subit la pollution

Comme il a été précisé pour la pollution urbaine, l'homme est directement atteint par cette pollution, surtout parce que l'homme respire et lorsque l'air est pollué, les polluants entrent dans les poumons, ce qui entraîne une aggravation des troubles cardiovasculaires et respiratoires, ainsi que des maladies pulmonaires comme les bronchites, l'asthme, voire le cancer. L'homme est d'emblée atteint de ses maladies, lorsque son environnement est fortement pollué comme à Mexico. Dans ce type de milieu pollué, plus de la moitié de la population souffre de maladies respiratoires. L'accident le plus grave et tragique se produisit à Londres pendant l'hiver 1952, où le smog provoqua 4000 morts. Enfin, la destruction de la couche d'ozone entraîne une augmentation des risques de cancers cutanés et des lésions oculaires.

### 3) La pollution à long terme

Les pluies acides proviennent du dioxyde de soufre à 60 % et d'oxydes d'azote à 30 % qui sont oxydés dans l'atmosphère. Ces polluants en pluie retombent ensuite sous forme d'acides sulfuriques (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) et nitrique (HNO<sub>3</sub>). Une pluie est dite acide lorsque son pH est inférieur à 5,6. Ces pluies acides provoquent également des brouillards très acides, le record étant 1,7. Ces pluies acides ont pour conséquences, l'acidification des sols et des eaux de surface, la solubilisation des métaux toxiques et des destructions de forêts.

La théorie de l'effet de serre a été énoncée le suédois Arrhenius (prix Nobel de chimie en 1903) et établit que l'augmentation de dioxyde de carbone entraîne un réchauffement de la planète. Trois types de polluants y contribuent : le dioxyde de carbone à 63,4 %, le méthane à 20,3 % et l'oxyde nitreux et les CFC à 10 %. Ces gaz polluant l'atmosphère forment une couverture autour de la terre qui permet aux rayons du soleil de passer, mais empêche la rediffusion dans l'espace du rayonnement infra-rouge transmis par la surface de la terre. La conséquence principale est l'augmentation de la température moyenne. En 1890, elle était de 14,5° C, en 1990, elle est de 15,2° C. Depuis 1982, la température moyenne des océans s'est élevée de 0,18 ° C et le niveau de deux millimètres. Ces phénomènes à très long terme pourraient avoir des conséquences majeures sur l'agriculture, les forêts, les ressources en eau et le niveau des mers. Pourtant, les scénarios futurs divergent, quant à l'augmentation de la température. Peut-être serait-elle seulement due à la variabilité naturelle du climat ? En tout cas, dans cent ans, la température devrait augmenter de 1 à 4 ° C selon les estimations.

La dernière conséquence de la pollution atmosphérique est la destruction de la couche d'ozone, qui se trouve à une altitude de 30 kilomètres au-dessus du sol. Celle-ci se produit notamment à cause des chlorofluorocarbures dont un seul atome de chlore peut détruire 100 000 molécules d'ozone. Depuis les années 80, l'épaisseur de la couche d'ozone diminue au pôle sud à chaque printemps. En outre, 10 % d'ozone détruite signifie une augmentation de 13% des rayons ultra-violets.

Les conséquences de la pollution sont multiples, affectant aussi bien l'être humain par des maladies tels que le cancer (du poumon ou de la peau), que l'écosystème dans lequel il vit. Même si la pollution urbaine est un problème quotidien, les pluies acides, l'effet de serre et la destruction de la couche d'ozone sont des problèmes nettement plus difficiles à résoudre et qui pourraient être irréversibles.