

L'importance du climat dans le système agricole

Crescence Mathieu



Plan

Introduction

- a) Exemple de mécanismes d'évitement
- b) Exemple de mécanismes de tolérances
- c) Acclimatation
- d) Adaptation
- I) Les éléments associés au climat et la plante
 - a) La lumière
 - b) La température
 - c) La pollution de l'air
 - d) Le déficit hydrique
 - e) L'excès d'eau:

II) L'atmosphère

- a) La circulation atmosphérique

III) Le cycle de l'eau

- a) Les différentes phases de l'eau
- b) Les réserves d'eau sur Terre
- c) Cycle global de l'eau
- d) Répartition des précipitations dans le monde

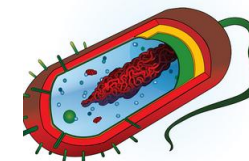
IV) Le réchauffement climatique

Introduction

- Il existe différents types de stress que la plante peut rencontrer au cours de sa vie.

Lorsque le stress sera causé par un être vivant (ravageurs, agents pathogènes), on parlera d'un stress biotique:

-insectes, champignons, bactérie, virus....



Dans les cas où le stress est dû à l'environnement, on parle de stress abiotique, il peut s'agir de la température (trop faible ou trop élevée, d'un excès d'eau, d'un déficit hydrique, d'une trop forte salinité, d'un excès de lumière, d'un excès de produit chimique.



```
graph TD; A[Stress environnemental] --> B[Sensibilité]; B --> C[Si stress léger et de courte durée]; B --> D[Si stress important (intensité+durée)]; C --> E[Effet modéré  
Ex: Lésion sur feuilles]; D --> F[Mort de la plante];
```

Stress
environnemental

Si stress léger et de
courte durée

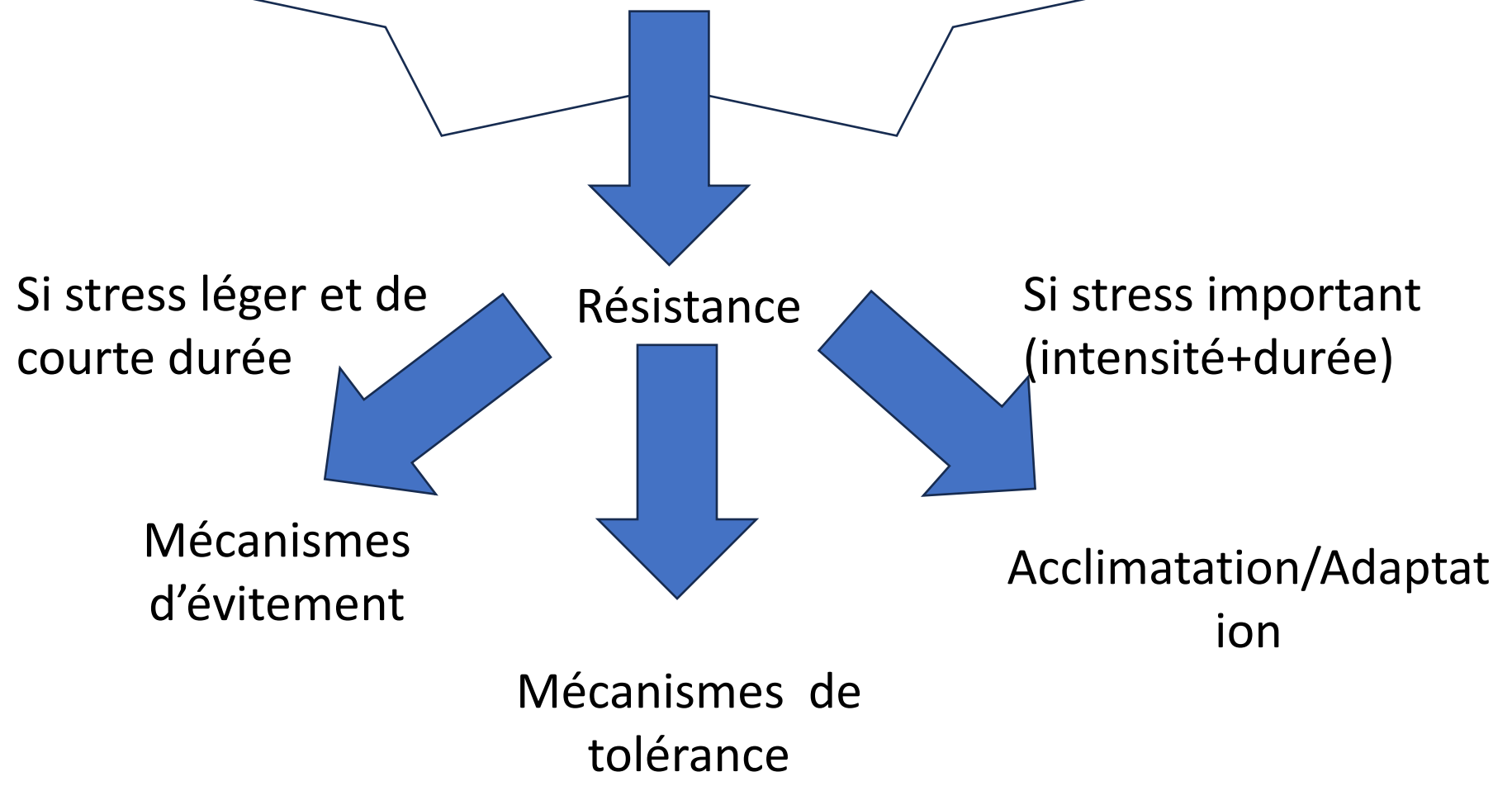
Sensibilité

Si stress important
(intensité+durée)

Effet modéré
Ex: Lésion sur feuilles

Mort de la plante

Stress environnemental



a) Exemple de mécanismes d'évitement

- Plusieurs exemples sont possibles comme:
 - produire un système racinaire profond pour survivre à la sécheresse,
 - avoir une durée de vie courte et survivre à la « mauvaise » saison sous forme de graine (Thérophytes),
 - produire des feuilles charnues qui stockent l'eau, avec une cuticule épaisse qui limitent les pertes en eau aussi.



b) Exemple de mécanismes de tolérances

- Par exemple, la tolérance à la sécheresse implique que l'organisme survive à une déshydratation qui n'endommage pas son protoplasme (partie protidique ou « protéique » de la cellule) et qu'il conserve la capacité de reprendre une croissance normale lorsque le protoplasme est réhydraté.
- C'est le cas des plante reviviscentes (qui vivent avec très peu d'eau).

Selaginella lepidophylla (Trachéodophytes)



d) Adaptation

- Modifications de structure ou de fonction héritable. L'organisme vivant possède une nouvelle séquence génétique propre à son espèce.
- L'adaptation augmente l'adéquation de l'organisme dans un environnement stressant. C'est un peu une «co-évolution» avec l'environnement.

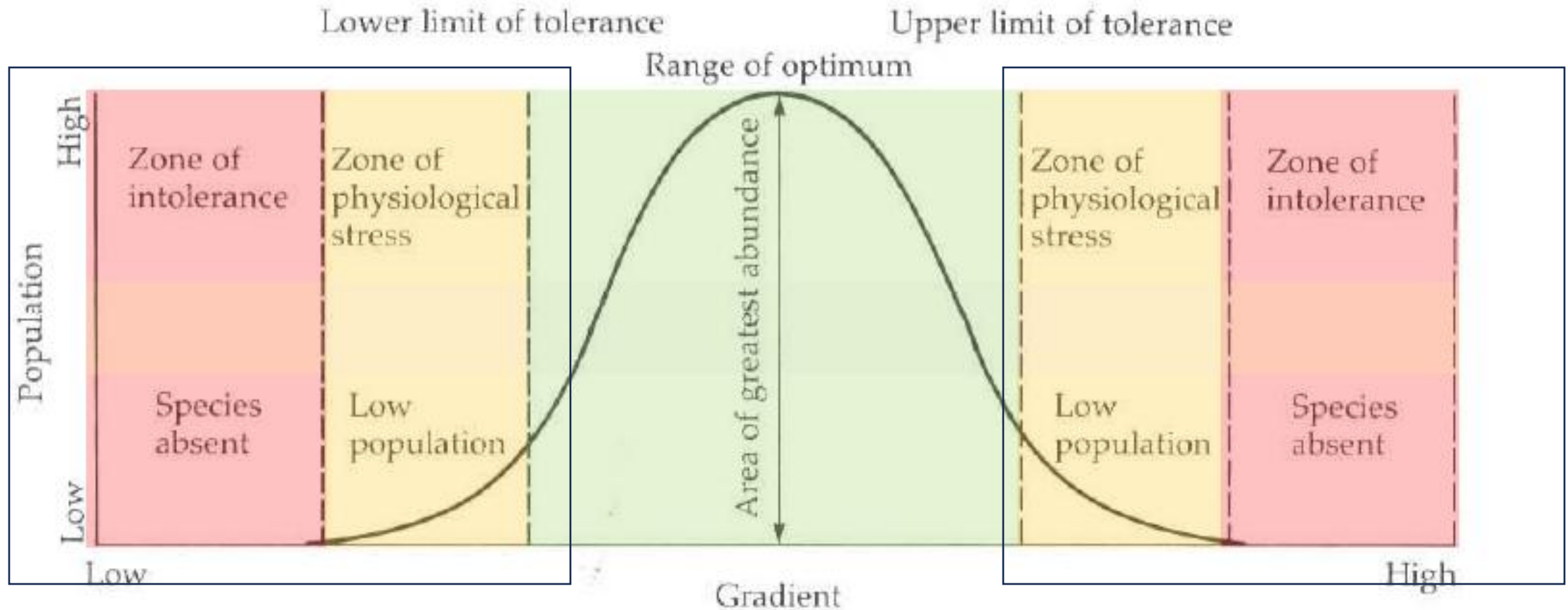
Les stress environnementaux

- En écologie, on pourra citer la loi du minimum pour la compréhension de ces phénomènes de stress liés à l'environnement: « un facteur écologique (ou environnementaux) joue un rôle de facteur limitant lorsqu'il est absent ou réduit au-dessus d'un minimum critique ou bien s'il excède le maximum tolérable » (Liebig 1803-1873).

Les stress environnementaux

- On peut aussi utiliser la loi de tolérance pour définir l'impact environnemental sur un être vivant: « pour tout facteur du milieu existe un domaine de valeur ou gradient dans le lequel tout processus écologique sous la dépendance de ce facteur pourra s'effectuer normalement » (Shelford 1877-1968).
- L'inverse est vrai aussi, il existera aussi un domaine de valeur pour lequel les processus écologiques ne se dérouleront pas normalement,

Les stress environnementaux



Présence de facteurs limitants

Domaine où les processus
écologique se passent bien, c'est
l'optimum écologique

Présence de facteurs limitants

Les stress environnementaux

- Il peut s'avérer facile de citer des exemples pour ces fameux stress environnementaux ou stress abiotiques. Néanmoins, il faut être capable de structurer ces exemples dans un ordre cohérent avec une certaine logique, si on se met à la place du diagnostiqueur. Il convient dans le cadre du cours, de citer les éléments englobants ces facteurs abiotiques et de les détailler ensuite un à un. Le diagnostiqueur, lui devra piocher dans le listage des éléments en fonction, de sa situation géographique et temporel, et en fonction de la réaction de la plante.

Les stress environnementaux

- Généralement, quand on parle de facteurs abiotiques pour les cultures durables, on pense au climat. On peut définir le **climat** comme un ensemble de phénomènes météorologiques (température, humidité, pression, vent, pluie, ensoleillement) qui caractérisent un état moyen de **l'atmosphère** en un lieu donné.
- L'état du sol peut aussi être considéré comme un facteur abiotique dans un sens (pH, humidité,...), si on exclut ses fonctions biologiques (voir cours sur le sol).

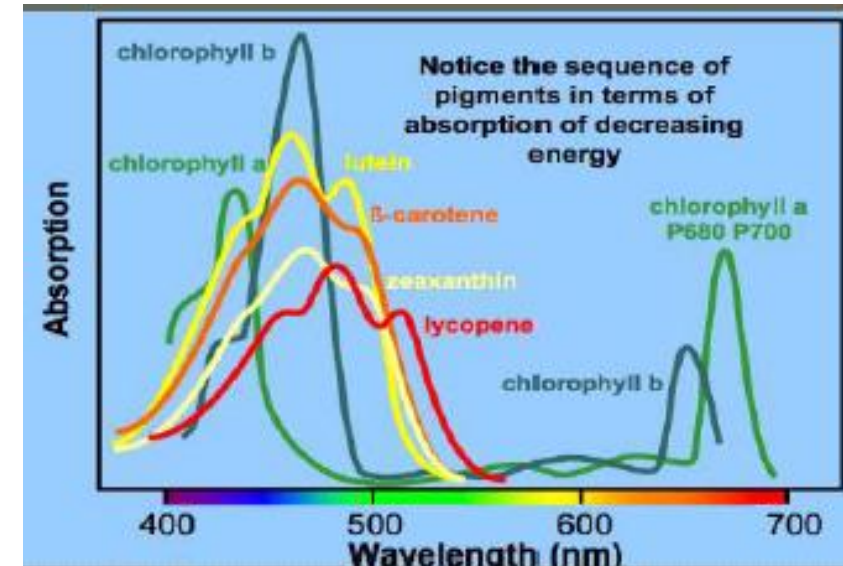
I) Les éléments associés au climat et la plante

- On pourra citer de nombreux éléments associés au climat, qui peuvent impacter directement ou indirectement la plante. Nous développerons notamment ces exemples suivant durant notre cours:
 - a) La lumière
 - b) La température
 - c) La pollution de l'air
 - d) Le déficit hydrique/l'excès d'eau

I) Les éléments associés au climat et la plante

- a) La lumière:



Il s'agit d'un rayonnement électromagnétique (charge électrique en mouvement qui peut influencer d'autre charge à distance) avec une certaine longueur d'onde. La lumière est composée de plusieurs couleurs qui ont chacune leurs propres longueurs d'ondes. La lumière visible pour l'œil humain est comprise entre 400 et 780 nm. Le spectre d'absorption des plantes pour la photosynthèse suit à peu près ces mêmes valeurs (400-700 nm), mais on peut observer que les longueurs d'ondes comprises entre 550 et 650 nm sont peu absorbées chez les plantes. Comme, beaucoup de plantes n'absorbent pas la lumière « verte », cette lumière est réfléchi à notre œil qui perçoit cette couleur.



I) Les éléments associés au climat et la plante

- a) La lumière:

Exemple de photorécepteurs présent chez les plantes:

- Phytochromes,  Capte la lumière rouge
- Cryptochromes,  Capte la lumière bleue, etc...
- Phototropines,

I) Les éléments associés au climat et la plante

- a) La lumière:

-La variation des cycles jours/nuit (photopériode) peut avoir un effet sur la morphogénèse de la plante (induction florale).

-Le phototropisme peut impacter le bon déroulé de la croissance. La plante en l'absence de lumière va allonger sa tige de sorte à trouver le plus de lumière possible (au détriment de sa qualité). C'est le phénomène d'étiollement, généralement ces plantes présentent une couleur blanchâtre.

-L'apport non-optimal de lumière à la plante peut impacter son rendement en culture, et son port structuré (compétition).

-Cela peut aussi impacter la germination.



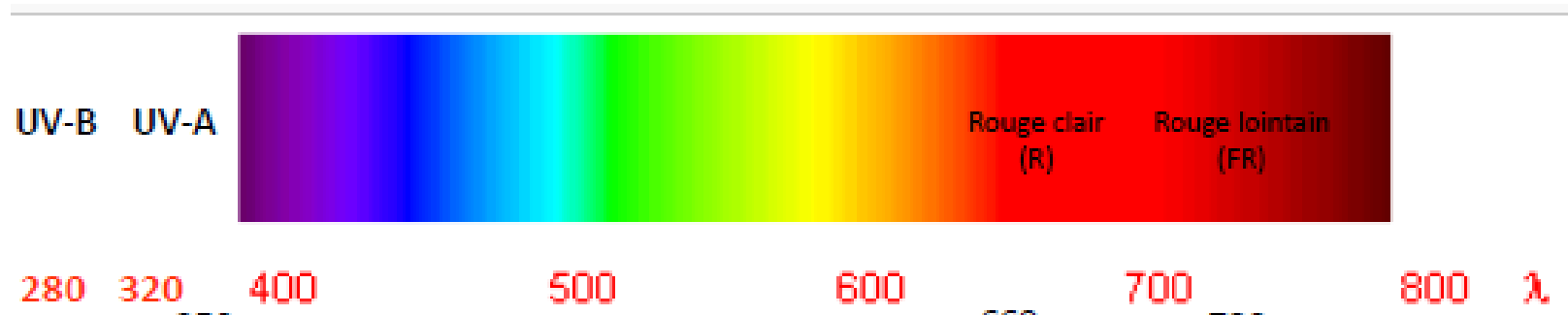
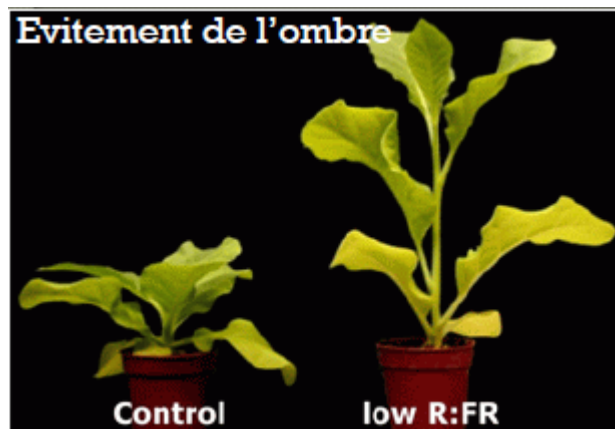
Phototropisme



I) Les éléments associés au climat et la plante

- a) La lumière:

-Le rapport quantité de lumière rouge clair (600-700 nm) sur le rouge lointain (700-800 nm) impacte la photomorphogénèse (croissance). Le rapport R/FR varie fortement au cours d'une journée. Sa perception par les plantes va déclencher un grand nombre de réactions développementales. Autre exemple, on estime que le phototropisme est induit par la lumière bleue (450-460nm).

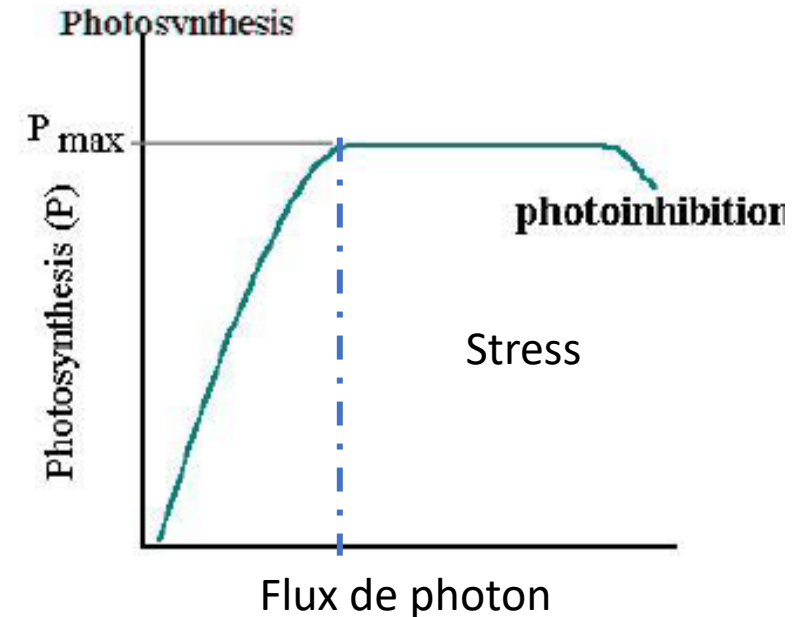


I) Les éléments associés au climat et la plante

- a) La lumière:

-Les rayonnements ultraviolets (20 à 400 nm) peuvent entraîner le phénomène de photo-inhibition (arrêt de la photosynthèse).

-Même dans le cadre du spectre du visible (400-800 nm), une trop forte exposition à la lumière peut porter préjudice à la plante. On peut observer une photo-inhibition chez des algues après une exposition à un flux de photons (rayonnement) de $2000 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (ce qui équivaut à un ensoleillement assez fort). Les feuilles des plantes terrestres en général, ont néanmoins la capacité de s'acclimater à ce type de condition (spécialement les jeunes feuilles), mais le changement d'exposition à la lumière ne doit pas être brusque. Sinon, il y a apparition de tâches brune sur la plante (mort cellulaire).



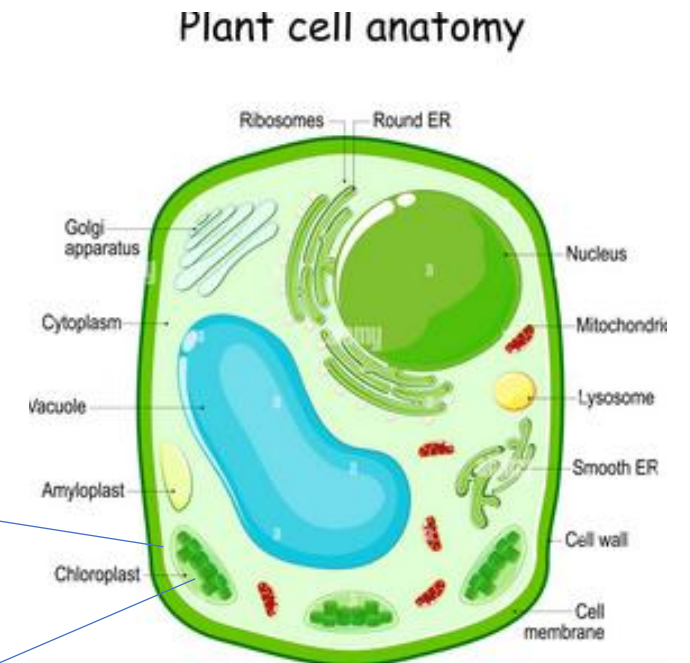
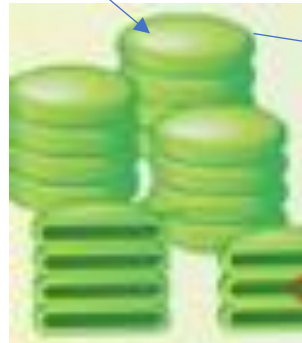
I) Les éléments associés au climat et la plante

- a) La lumière:

Concrètement un excès de lumière peut entraîner au niveau de la cellule la destruction des pigments photosynthétique et des thylacoïdes dans le chloroplaste.

L'ADN et les protéines sont aussi visés

On dit que l'excès de lumière a un effet photo-oxydant.



I) Les éléments associés au climat et la plante

- a) La lumière:

Pour résister à cette contrainte lumineuse, il convient de sélectionner des plantes adaptées à la région. Il est aussi possible de faire de la culture sous arbre (agroforesterie) ou utiliser l'ombre de couvert végétal pour protéger ses cultures. On peut aussi utiliser des films réfléchissant avec un fort albédo.

Si c'est impossible, il faut passer sous un système où la lumière est contrôlé: la serre.

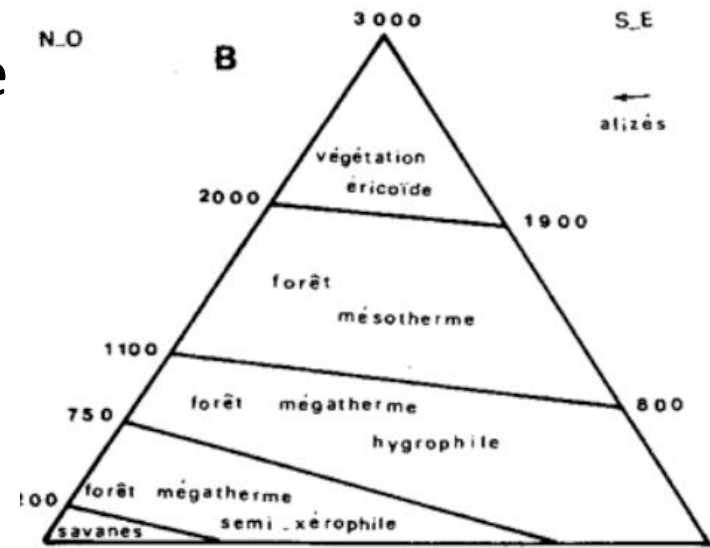
I) Les éléments associés au climat et la plante

- b) La Température:

C'est l'ensemble des conditions atmosphériques, variables, traduites subjectivement en sensations relatives de chaud et de froid, et dont l'appréciation exacte est fournie par le thermomètre.

Ce paramètre environnemental entraîne souvent une zonation des organismes selon leurs capacités adaptatives.

À la Réunion, les forêts sont classées selon des gradients de température et d'altitude.



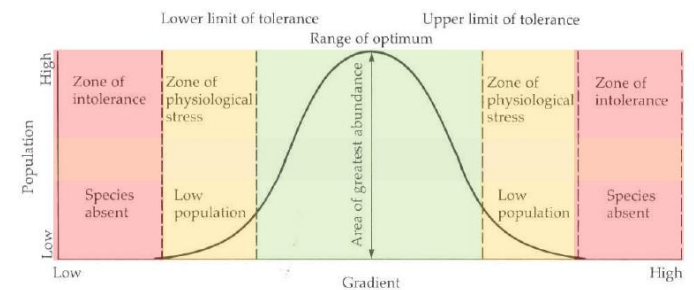
I) Les éléments associés au climat et la plante

- b) La Température:

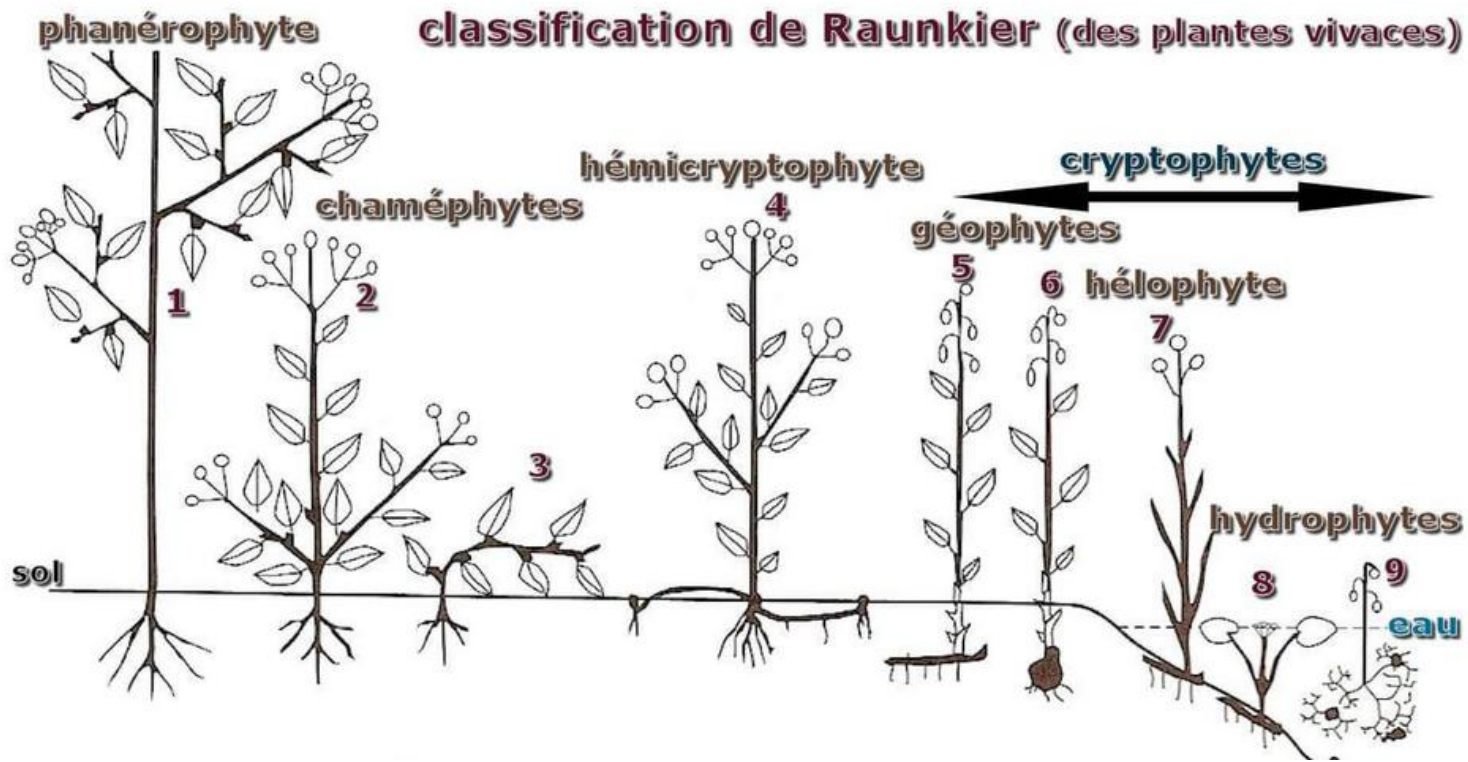
Mondialement, on retrouve ce type de répartition des espèces végétales dû en partie aux températures des milieux de vie. Cela s'observe notamment avec la classification de Raunkier (classification selon la taille des plantes).

Increasing drought (cold) of the climate	Type of climate	Large Phanerophytes	Small Phanerophytes	Chamaephytes	Hemicryptophytes	Crypto- or geophytes	Helo- and hydrophytes	Therophytes	Total
Seychelles	<i>Humid, tropical</i>	10	50	6	12	3	2	17	100
Spitsberg	<i>Cold, arctic</i>	-	1	22	60	13	2	2	100
Tripoli	<i>Dry, subtropical</i>	-	6	13	19	9	2	51	100

Il s'agit de mécanismes évolutif calé sur les paramètres environnementaux



*Classification de Raunkier



Phanérophytes : bourgeon sur une tige > 0.5 m du sol

Phanérophytes : bourgeon sur une tige > 0.5 m du sol

Chamaephytes : proche du sol < 0.5 m

Hémicryptophytes : bourgeons au ras du sol

Géophytes : bourgeons sous la surface du sol

Hydrophytes : plantes totalement immergée

Hélrophytes : bourgeons végétatifs sous l'eau -

reproduction en surface

Thérophytes : plantes annuelles / sans bourgeon hivernal persistant/ + banque de graines

I) Les éléments associés au climat et la plante

- b) La Température:

La sensibilité des plantes aux températures extrêmes est très variable. Cela va vraiment dépendre de l'espèce.

Les plantes sont des organismes poïkilothermes, c'est-à-dire qu'elles vont réagir aux changements de température du milieu.

Ces variations de températures vont perturber le métabolisme des plantes et influencer leurs répartitions.

I) Les éléments associés au climat et la plante

- b) La Température:

-Il y aura 2 types de stress liés à la température: celui lié aux hautes températures et celui lié aux basses températures. Nous développerons le stress liés aux hautes températures.

En cas de température élevée, il est souvent constaté que ce stress s'accumule à d'autres stress environnementaux comme la sécheresse. En général, les plantes ne survivent plus au-delà de 44 à 50 °C (mais il y a toujours des exceptions).

I) Les éléments associés au climat et la plante

- b) La Température:

On peut définir les espèces végétales sensibles ou résistantes à la chaleur de cette manière :

-espèce sensible: développement perturbé à des températures de 30-45°C (algues, plante d'ombre...)

-espèce résistante: peuvent survivre jusqu'à 50-60°C (Xérophytes, Malacophytes)

I) Les éléments associés au climat et la plante

- b) La Température:

Au niveau cellulaire, la température va provoquer des dommages au niveau des membranes cellulaires de la plante. Ce qui va augmenter leur fluidité, réduire leur perméabilité, et perturber le fonctionnement des protéines membranaires.

Ce qui implique que des éléments nécessaires à la cellule (nutriment, molécule signal,...) ne pourront plus entrer et sortir normalement. Tandis que des éléments pas forcément nécessaires, vont rentrer dans la cellule et pourront dans certains cas provoquer de la toxicité ou des déséquilibres.

I) Les éléments associés au climat et la plante

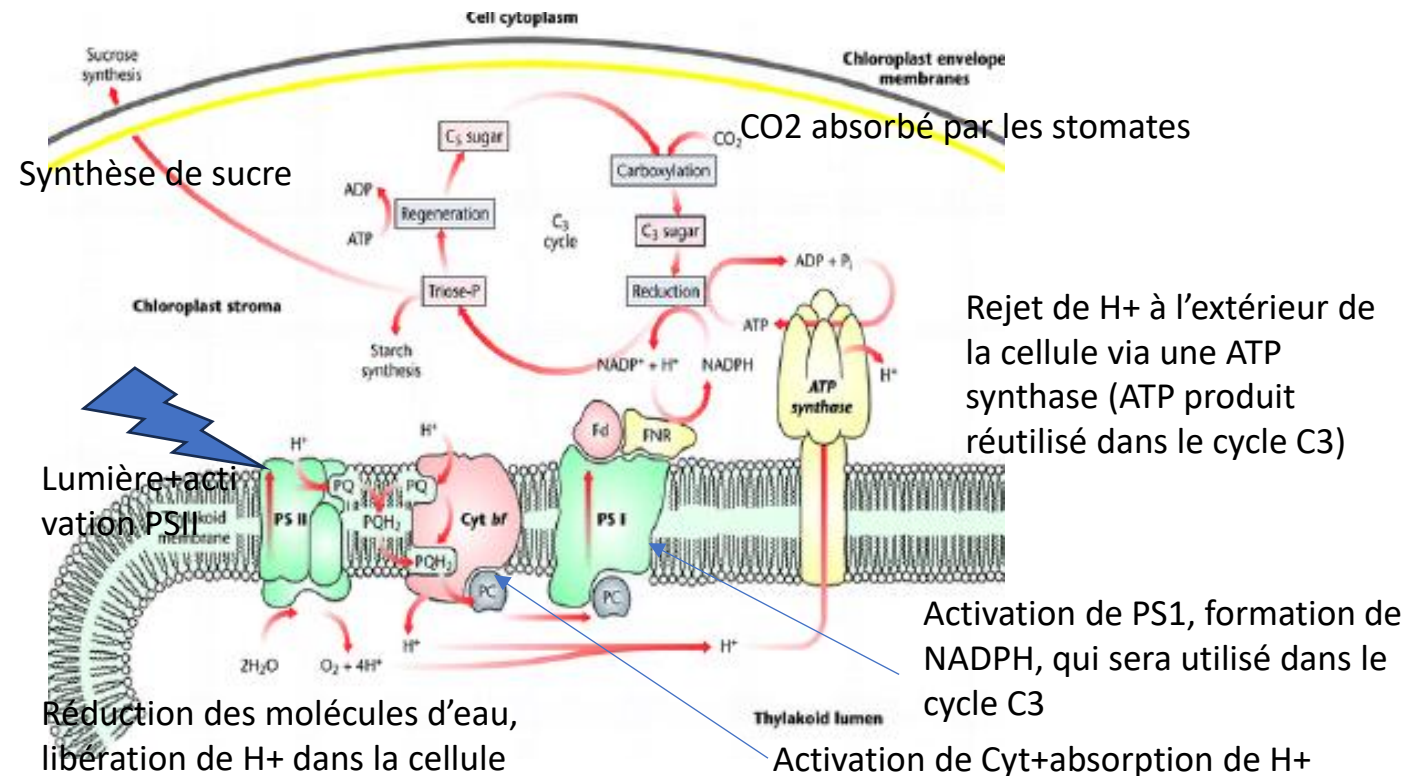
- b) La Température:

En plus des éléments cités précédemment, la capacité photosynthétique peut en être suffisamment affectée. En effet, nous avons dit précédemment que les membranes des cellules étaient affectées. Il ira de même pour les membranes des thylakoïdes (siège de la photosynthèse à l'intérieur de la cellule).

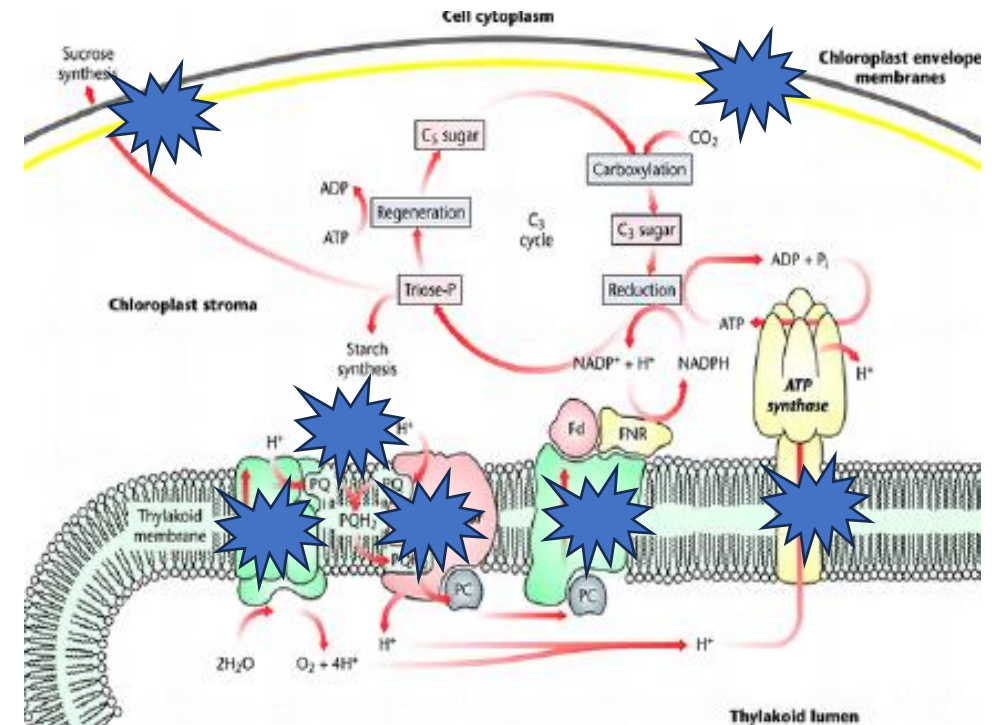
I) Les éléments associés au climat et la plante

• b) La Température:

Fonctionnement normal:



Zone potentiellement affectée par de trop forte température:

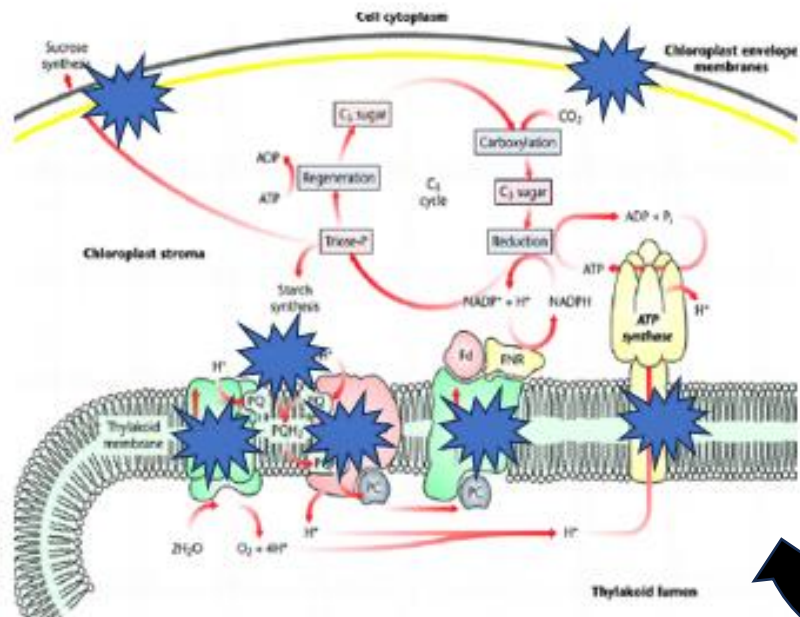


Adaptations des plantes à la chaleur

- Production de poils foliaires morts, remplis d'air et de surfaces cireuses qui réfléchissent la lumière
- Production de feuilles modifiées
- Diminution de la température au niveau des feuilles
- Fort taux d'humidité et de viscosité à l'intérieur de la plante
- Synthèse de protéine de résistance à la température : HSP (Heat Shock Protein)

Exemple des protéine HSP

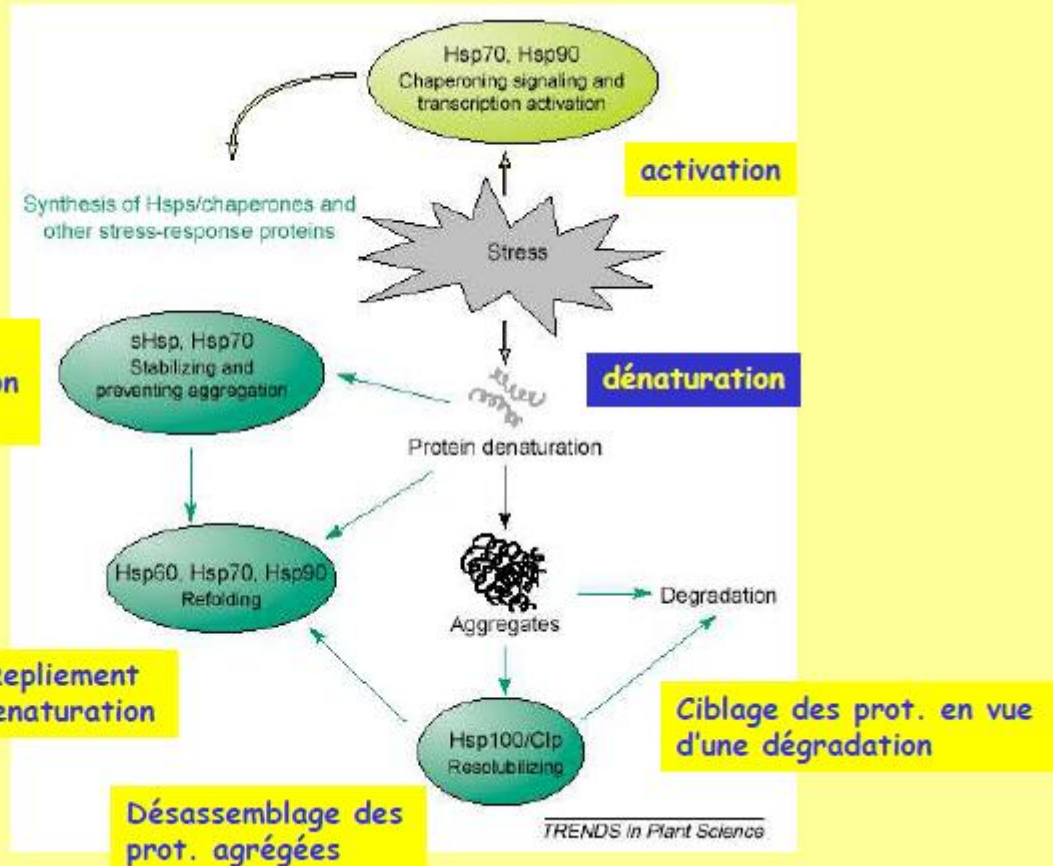
Zone potentiellement affectée par de trop forte température



- Stabilisation
- Prévention de l'agrégation des prot. dénaturées

- Repliement
- Renaturation

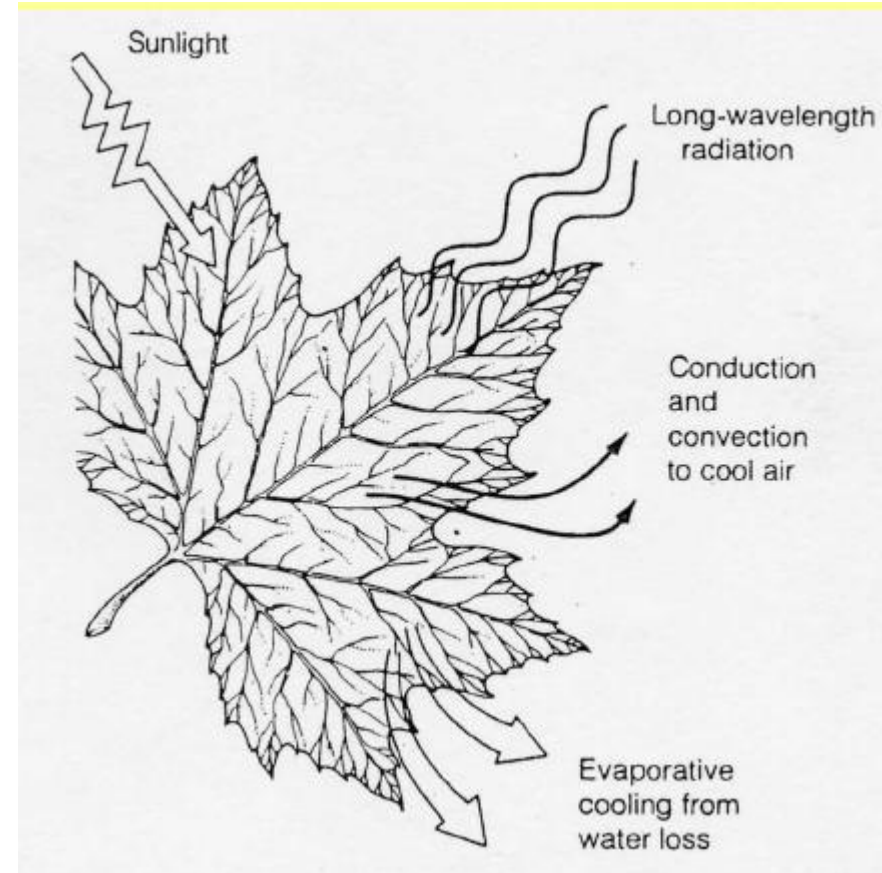
Désassemblage des prot. agrégées



Les protéines HSP vont avoir un rôle de stabilisation, un rôle de protection et un rôle de « réparation » (c'est plus un retour à la conformation initiale des repliements qu'une réparation) envers les protéines dénaturées par les fortes températures. Elles auront aussi un rôle de destruction envers les protéines défectueuses.

Adaptations des plantes à la chaleur

- Exemple de mécanisme de dissipation de la chaleur par la feuille



I) Les éléments associés au climat et la plante

- b) La Température:

Pour lutter contre cette température élevée, on peut mettre en place des ombrières. Travailler sur les méthodes d'irrigation (apporter l'eau directement aux racines, rafraîchir la surface des plantes, maintenir une humidité constante...). On peut aussi faire un paillage, et structurer le sol de sorte à ce qu'il retienne bien l'humidité. On peut planifier sa rotation culturale selon le moment de l'année et prendre des plantes adaptées au climat.

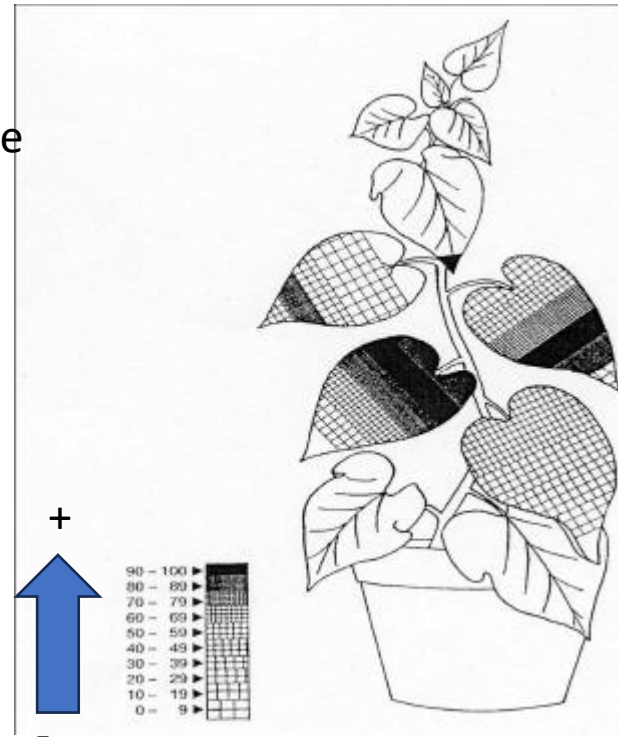
I) Les éléments associés au climat et la plante

- c) La pollution de l'air:

Cette pollution peut-être d'origine anthropique, ou naturelle. Les dégâts sont variables selon la nature des polluants.

Exemple de pollution de l'air au SO₂:

Fréquence d'apparition de nécrose



1) Les éléments associés au climat et la plante

- c) La pollution de l'air:

Exemple de molécules polluantes que l'on peut retrouver dans l'air et qui peuvent poser problème à la plante:

-SO₂  Impact sur la synthèse de protéine

-NO  Impact sur la photosynthèse

-O₃  Impact sur la photosynthèse, la respiration, les protéine, les stomates et les membranes

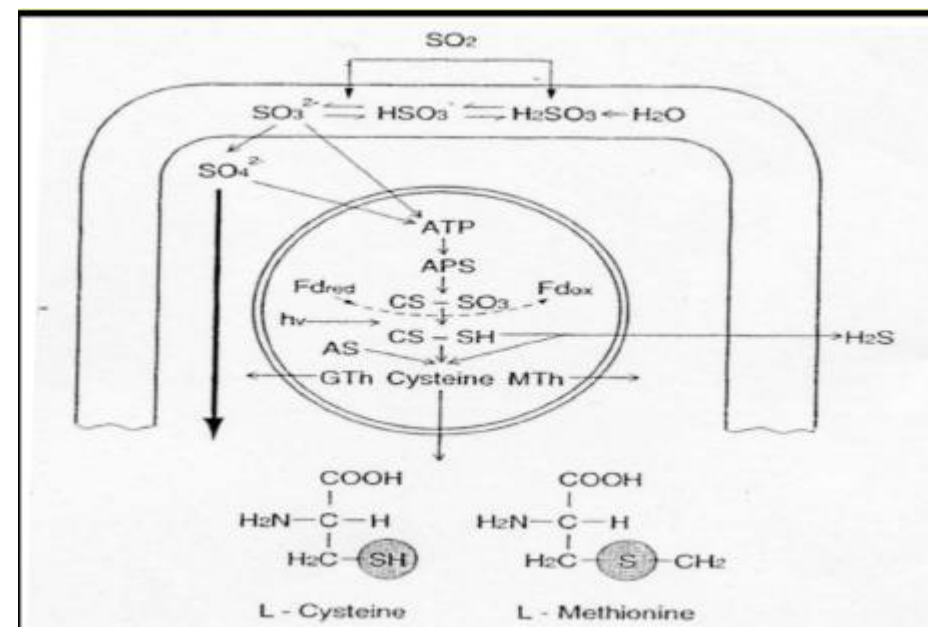
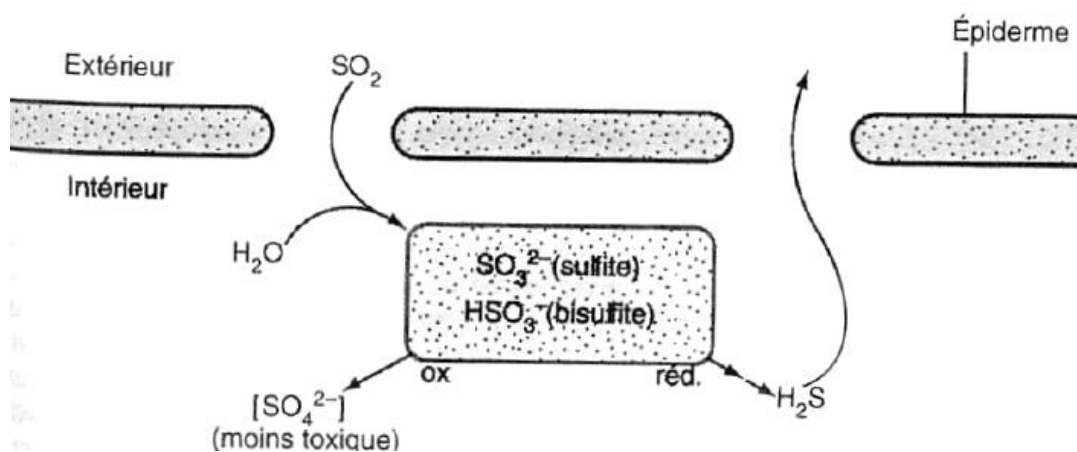
-etc... +toxicité

Généralement, ces éléments passent par les stomates des plantes. Ils se dissolvent dans l'eau des parois des cellules. Ensuite, ils viennent perturber les mécanismes biochimiques dans la plante.

Les éléments associés au climat et la plante

- c) La pollution de l'air:

Les différentes formes du Soufre dans la plante



Un déséquilibre dans l'apport de soufre ou dans sa forme stockée dans la plante, va impacter la production de protéine en bout de chaîne. Le pH à l'intérieur de la plante peut s'acidifier aussi.



Synthèse de protéine

I) Les éléments associés au climat et la plante

- c) La pollution de l'air:

Pour limiter les effets de la pollution de l'air, l'utilisation d'une haie, peut permettre l'absorption d'une partie des molécules néfastes. L'autre avantage de la haie est qu'elle protège du vent, et peut produire de l'ombre (car une des causes indirectes de la pollution de l'air est le réchauffement climatique).

Les éléments associés au climat et la plante

- D)Le déficit hydrique:

C'est le manque d'eau. Il s'agit d'une contrainte qui devient de plus en plus récurrente en raison du réchauffement climatique. Le stress hydrique est l'un des stress abiotiques existant le plus contraignant pour la plante. Il se traduit par de très faibles précipitations.

Table 1. Distribution of insurance indemnities for crop losses in the United States during the last 40 years (Boyer, 1982)

<i>Cause of crop loss</i>	<i>Proportion of payment (%)</i>
Drought	40.8
Excess water	16.4
Cold	13.8
Hail	11.3
Wind	7.0
Insects	4.5
Disease	2.7
Flood	2.1
Others	1.5

Les éléments associés au climat et la plante

- d) Le déficit hydrique:

On peut retenir 2 conséquences du stress hydrique perçu par la plante:

- La sécheresse de l'air (faible humidité relative)

- La sécheresse du sol (faible teneur en eau dans le sol)

C'est un stress qui se cumule généralement au stress thermique, qui s'installe lentement et qui augmente en intensité.

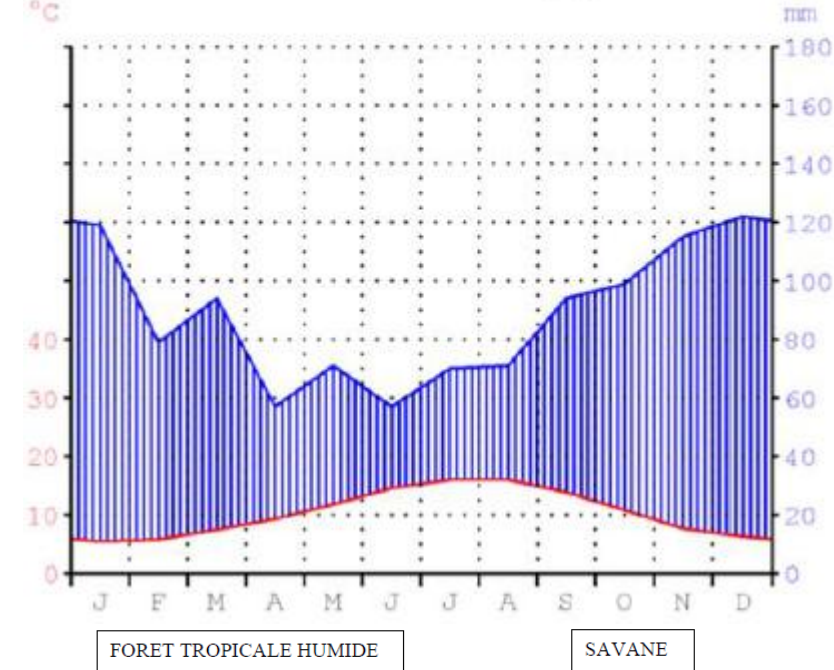
Les éléments associés au climat €

- d) Le déficit hydrique:

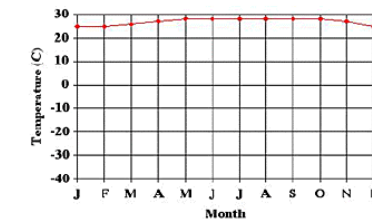
On suit généralement le volume annuel de précipitation pour diagnostiquer ce stress.

À l'échelle du région, on va regarder la différence entre le volume annuel de précipitation et l'évaporation annuelle. Cela se traduit souvent par ma mise en place de diagramme ombrothermique.

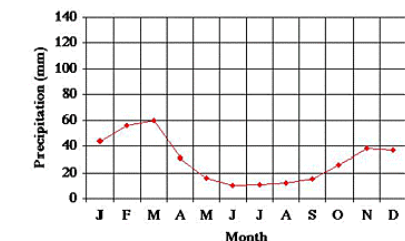
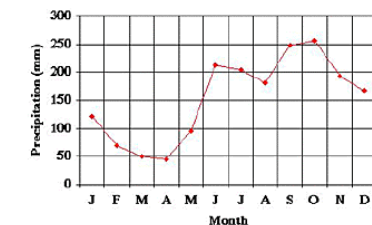
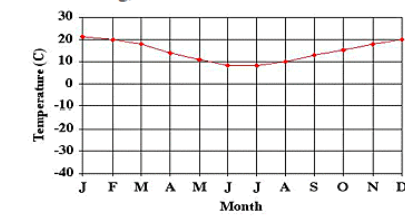
Cork/Irland
51°54'N/8°29'W
15m



Campa Pita, Belize



Middelburg, South Africa



I) Les éléments associés au climat et la plante

- d) Le déficit hydrique:

On peut aussi utiliser le calcul de la WUE pour quantifier un stress hydrique (intensité photosynthétique/transpiration)

$$WUE = \frac{\text{Biomasse (ou rendement)}}{\text{Eau utilisée}}$$

*Si la WUE est élevée, c'est bon signe. À l'inverse une WUE faible est synonyme de mauvaise pratique, de période de sécheresse ou de maladie

On peut calculer l'état de la balance hydrique de la plante à travers la RDI (Indice Relatif de Sécheresse).

$$RDI = \frac{P}{ET}$$

← Quantité d'eau apportée par les précipitation

← Quantité d'eau évaporé ou transpiré

RDI < 1: sécheresse

RDI = 1: équilibre, ressource en suffisante

RDI > 1: excès d'eau

l) Les éléments associés au climat et la plante

- d) Le déficit hydrique:

Au niveau de la plante, la sécheresse de l'air va créer un gradient de pression entre l'intérieur de la feuille et l'air extérieur. Cela va avoir pour effet d'augmenter l'intensité de la transpiration.

La sécheresse du sol va tout simplement rendre l'eau difficilement accessible aux racines.

La plante perd de l'eau et n'arrive pas à la remplacer.

l) Les éléments associés au climat et la plante

- d) Le déficit hydrique:

Pour contrer ce déficit hydrique, il convient de sélectionner des plantes adaptées à ces conditions (Malacophytes). Sinon, il faut stocker l'eau (eau de toiture ou retenue collinaire). On peut essayer de limiter les ruissellements et favoriser l'infiltration de l'eau. L'utilisation de biostimulants est possible aussi (exemple de la problématique Bactériolit/Bactériosol). Structurer son sol de sorte à ce qu'il retienne l'eau est une pratique à conserver aussi dans ce cas.

I) Les éléments associés au climat et la plante

- e) L'excès d'eau:

Inversement, l'excès d'eau peut être contraignant pour la plante. Cela impactera notamment le sol et l'atmosphère, puis la plante.

De nombreux symptômes peuvent être observés comme l'apparition de pourriture au niveau des racines. Toujours dans le sol, la saturation en eau va laisser peu de place au stockage de l'oxygène, ce qui va aussi entraîner la mort des racines.

I) Les éléments associés au climat et la plante

- e) L'excès d'eau:

Inversement, l'excès d'eau peut être contraignant pour la plante. Cela impactera notamment le sol et l'atmosphère, puis la plante.

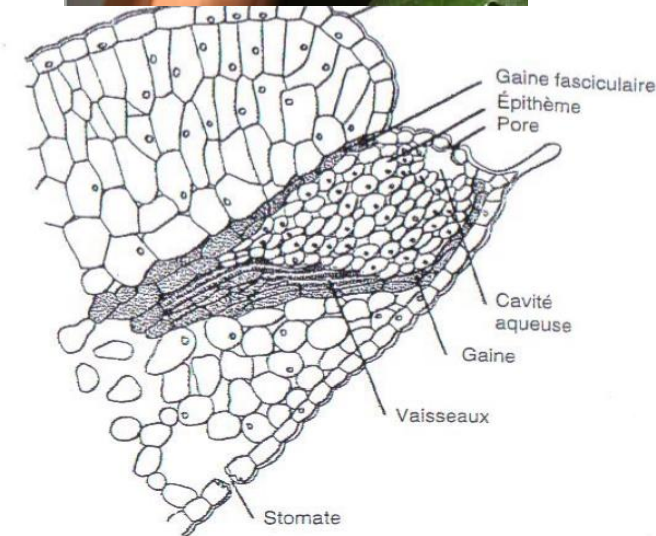
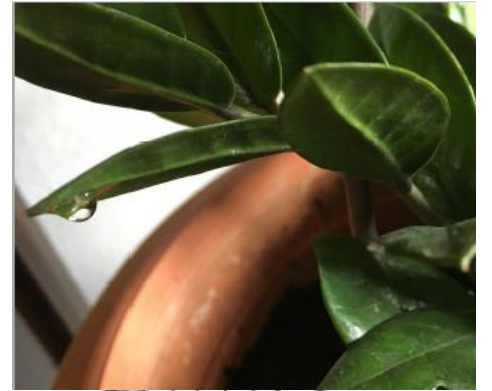
Pour l'atmosphère, une forte teneur en humidité va réduire le gradient de pression entre la stomate et le milieu extérieur. Ce qui va limiter la phyto-transpiration, c'est-à-dire que l'eau va monter difficilement dans la plante.

Les stomates peuvent se fermer. Ce qui implique qu'il n'y aura plus d'absorption de CO₂. Donc, ce sera difficile de synthétiser du sucre, via le cycle de Calvin.

I) Les éléments associés au climat et la plante

- e) L'excès d'eau:

Pour se défendre la plante va mettre en place un phénomène de guttation. Il s'agit d'un phénomène présent chez certaines plantes, qui permet l'émission d'eau liquide au niveau des feuilles. Attention, ce n'est pas la rosée. La rosée, résulte de la condensation de l'air à sur des surfaces froides, dont les plantes le matin, il s'agit d'un facteur abiotique. La guttation est un phénomène biotique. La guttation se fait par un organe appelé hydathode chez la plante.



Coupe longitudinale d'hydathode (*Saxifraga lingulata*)

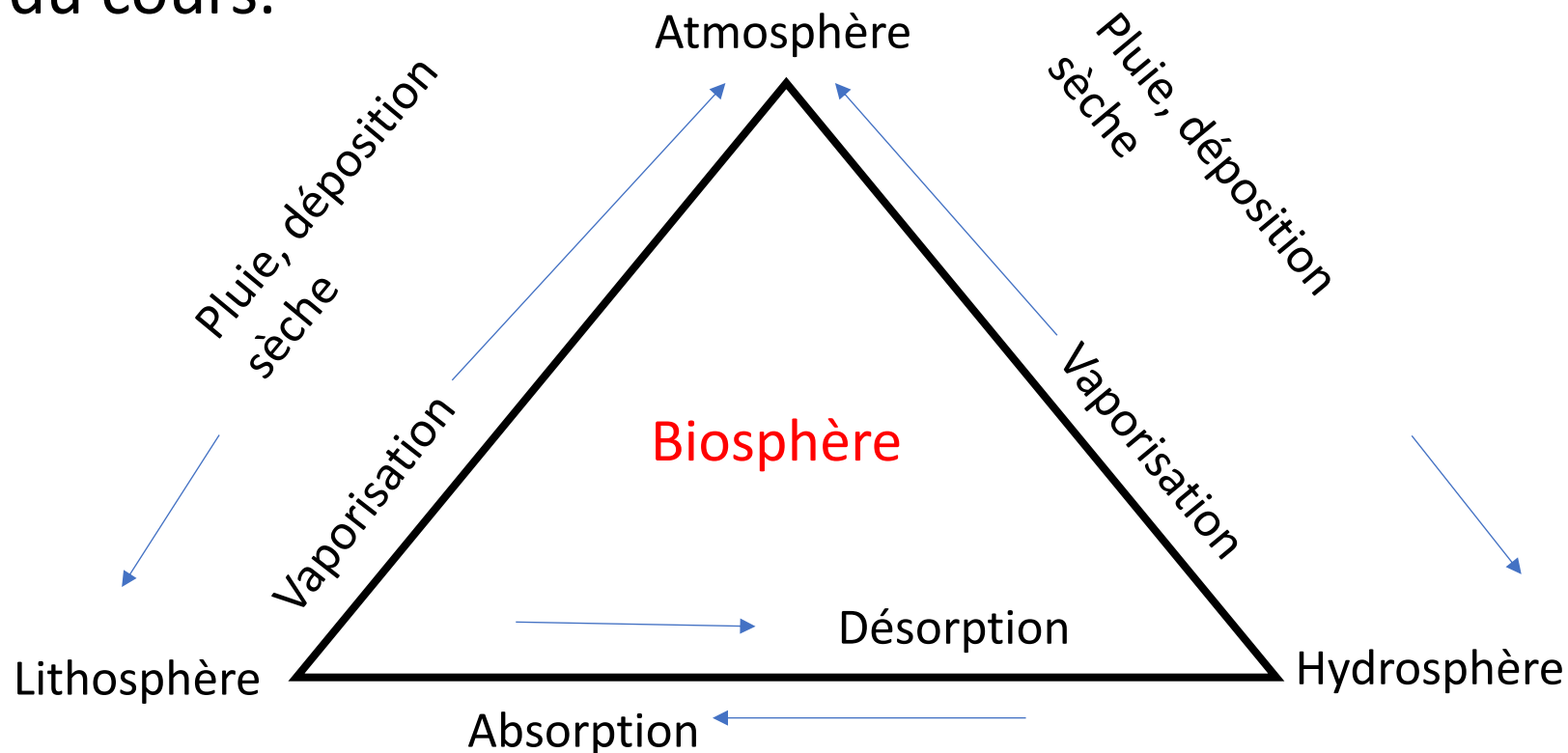
I) Les éléments associés au climat et la plante

- e) L'excès d'eau:

Comme méthode de lutte on peut proposer le drainage du sol. C'est-à-dire mettre en place des installations (pentes, fossés..) pour laisser l'eau s'écouler loin des cultures. Cela passe aussi par une meilleure gestion de son irrigation (utilisation de capteur, et de système automatisé). Il est possible de créer des buttes (structure surélevées) qui vont permettre aux plantes d'être maintenu hors de l'eau. Une fois de plus l'utilisation de plante de couvert peut-être utile, ici, elles auront pour intérêt d'absorber l'eau.

Les interfaces de la vie (rappel)

- Pour rappel on cite en général 3 interfaces « majeures » qui vont contenir la sur la planète (biosphère). Pour définir le climat, il fallait passer par la définition d'Atmosphère (1 de ces interfaces), vue au début du cours.



II) L'atmosphère c'est quoi ?

D'une part c'est composé de molécules à l'état gazeux:

Composants	Teneur (%)
Diazote(N ₂)	78,084 %
Oxygène (O ₂)	20,946%
Vapeur d'eau	3%
Argon	0,934%
Tous les autres gaz mineurs	<0,04%
Dioxyde de carbone CO ₂	<0,036%

II) L'atmosphère

On peut différencier 4 strates majeures dans notre atmosphère terrestre:

Mésosphère: possèdent des températures les plus froides de l'atmosphère. Les rayonnements cassent les molécules comme l'O₂ ou N₂

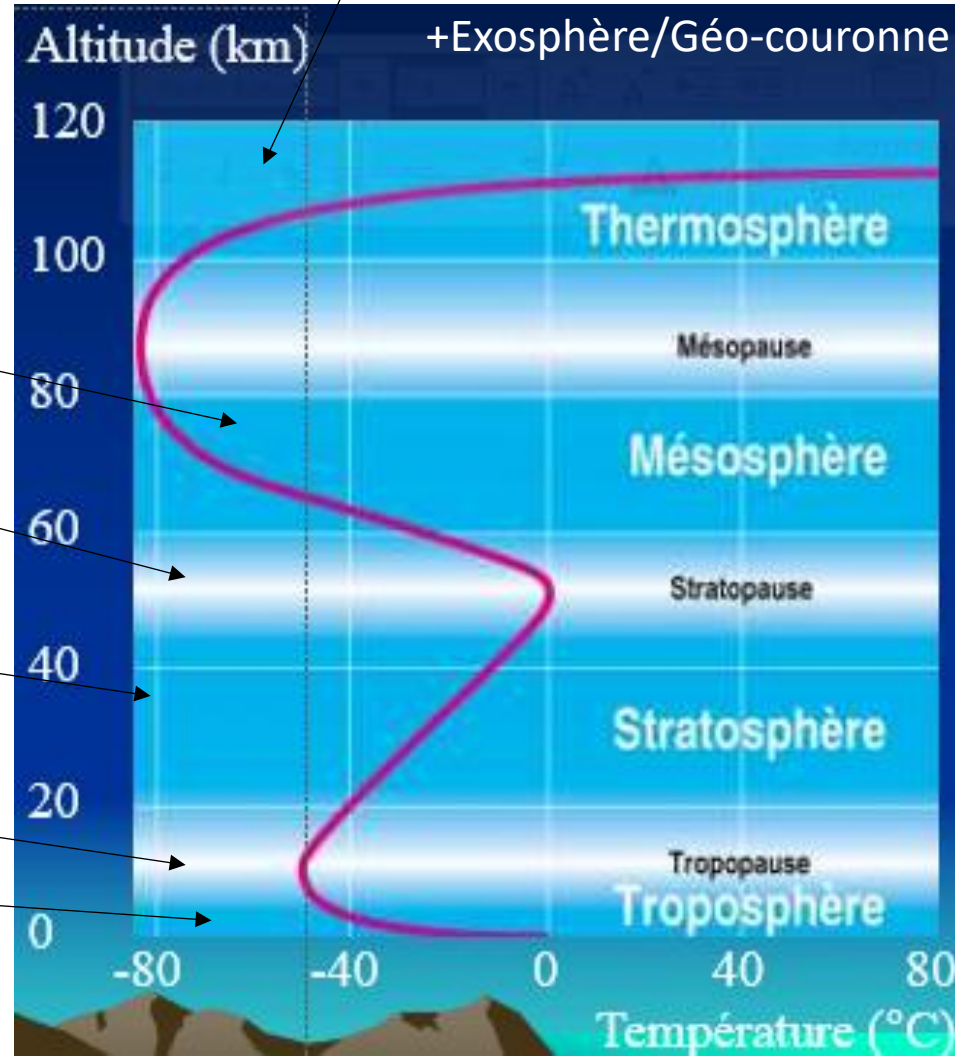
Stratopause: limite de la Stratosphère

Stratosphère: peu de vapeur d'eau, dégage de la chaleur lors de la formation d'ozone

Tropopause: limite de la biosphère

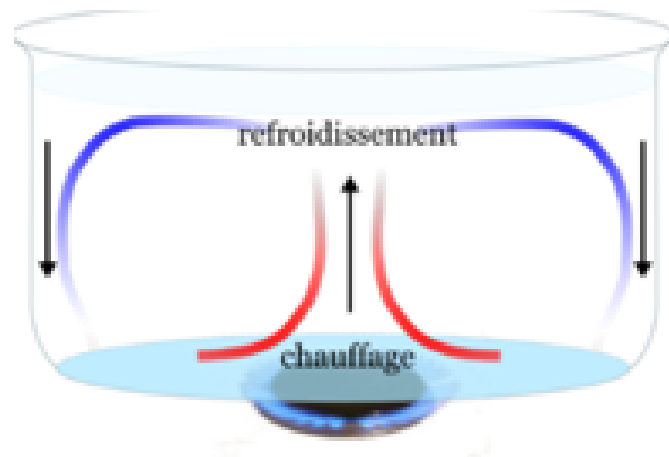
Troposphère: essentiel de l'activité météorologique s'y passe, présence de vapeur d'eau

Thermosphère: Possède un gradient de température toujours positif qui dépend de l'absorption des radiations solaires



a) La circulation atmosphérique

- Le mouvement des gaz dans l'atmosphère se fait via le phénomène de **convection**. C'est-à-dire que les rayonnements issus du soleil vont réchauffer l'atmosphère autour de la planète, ce qui va créer des mouvements ascendants pour l'air. En s'élevant l'air va se refroidir d'environ 1°C tous les 100m dans la troposphère. Cela va avoir pour effet de le faire redescendre. On dit que sa densité augmente quand l'air refroidit.

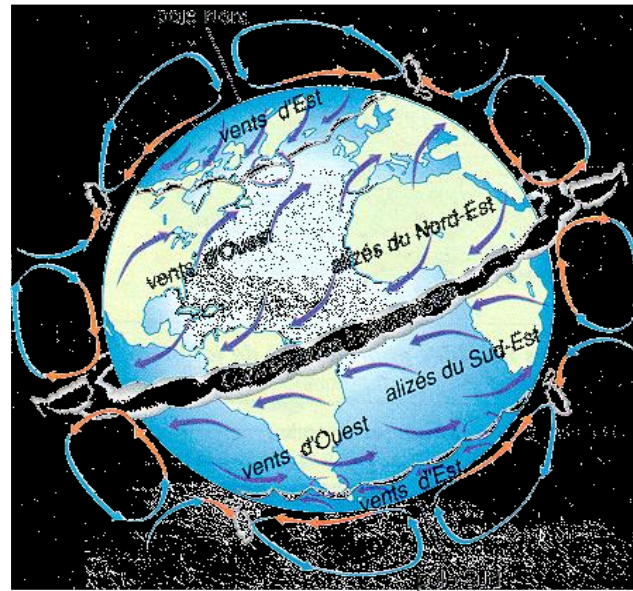


a) La circulation atmosphérique

- La théorie nous explique que les basses latitudes (ex: équateur) reçoivent en moyenne plus d'énergie solaire que les pôles. En effet, grâce à leur albedo, une bonne partie de la lumière est réfléchi aux pôles.
- On obtient donc à l'équateur un air chaud (peu dense) qui s'élève et se dirige vers les pôles. Une fois arrivé aux pôles, l'air se refroidit, et donc descend vers le bas, en direction de l'équateur.
- Cependant, ça ne se passe pas toujours comme ça à cause d'un phénomène appelé force de Coriolis. Cette force définit le fait que la Terre tourne sur elle-même.

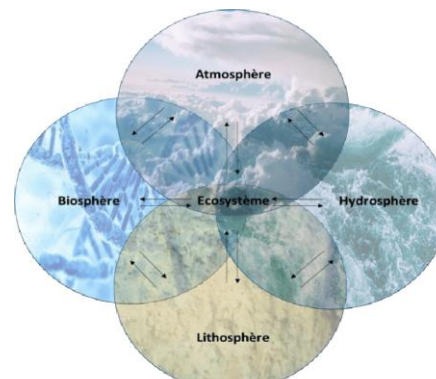
a) La circulation atmosphérique

- À l'équateur, l'air chauffé par le sol s'élève et se dirige vers le pôle nord, mais il sera dévié vers l'Est à cause de la force Coriolis. Une fois refroidis, l'air va retourner vers l'équateur, mais sera dévié vers l'Ouest. C'est ce que nous appelons le « vent ». C'est le résultat de cumulé de la convection induite par la température et des forces gravitationnelles.



III) Le cycle de l'eau

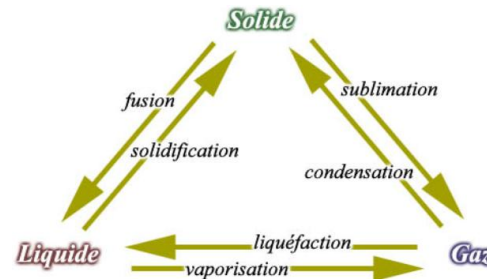
- Un autre élément qui méritait d'être pris en considération dans l'application des impacts du climat sur la plante et par rapport aux interfaces liées à la biosphère est l'eau. C'est plus précisément, le cycle de l'eau qui nous intéressera.
- Les étapes du cycle global de l'eau vont se diviser dans les 3 interfaces non-vivantes qui sont l'atmosphère, l'hydrosphère et la lithosphère. Néanmoins, il existe des interactions avec le vivant et l'eau, durant lesquelles, l'état de l'eau peut-être impacté. On peut donc dire que le cycle de l'eau est aussi quelque part, affecté par le vivant, donc la biosphère.



a) Les différents phases de l'eau

- Grâce à nos conditions planétaires, nous pouvons observer 3 phases associées à l'eau:

- Une phase solide,
- une phase liquide,
- une phase gazeuse,



On pourra aussi retenir que les changements de phase de cette eau sont dû à des facteurs physiques de pressions et de température et que cela est aussi affecté par les cycle biogéochimiques, notamment les cycles du carbone et de l'azote (changement climatique+impact sur la biomasse).

L'eau interagit également avec la topographie et transporte les sédiments vers les océans.

b) Les réserves d'eau sur Terre : les petits réservoirs

- L'eau est présente dans l'atmosphère, mais en très petite quantité par rapport aux océans. D'ailleurs, l'eau dans l'atmosphère représente 0,5% du volume de l'atmosphère totale, d'un autre côté, 60% de la surface de la planète est recouverte de nuage composé de molécule d'eau.
- La proportion d'eau stockée dans l'atmosphère, dans le sol et dans les cours d'eau est très faible et les temps de séjour sont courts, mais cette eau transitoire joue évidemment un rôle essentiel dans le cycle hydrologique mondial.

b) Les réserves d'eau sur Terre : les grands réservoirs

- Le volume total de l'eau sur terre est estimé à $1,4 \cdot 10^{18}$ m³ (1999). On dit souvent que plus de 70 à 80% de la planète est recouverte d'eau, cependant, il ne faut pas oublier que la masse totale de toute l'eau sur la planète est estimé équivalente à 0,02% du poids total de la planète ($6 \cdot 10^{24}$ kg). Les océans sont les plus grandes réserves d'eau sur la planète, ils seront suivis par les glaciers et les eaux souterraines.

b) Les réserves d'eau sur terre

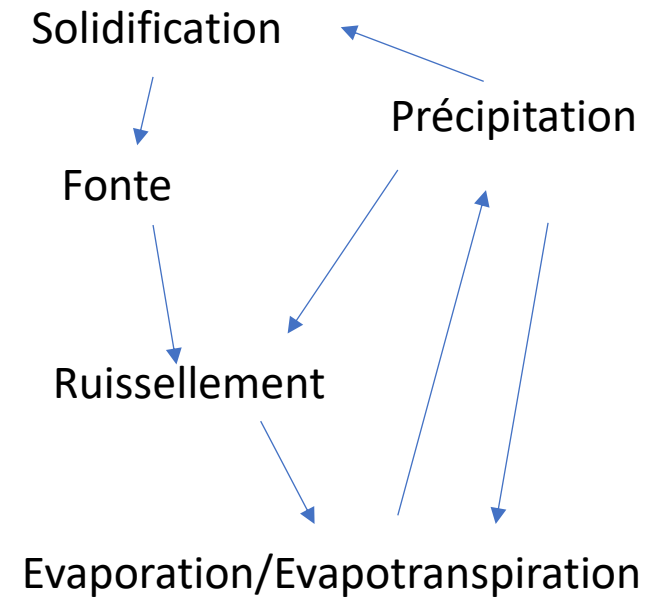
Form of water	Covering Area (km ²)	Total Volume (km ³)	Mean Depth (m)	Share of Volume (%)
World oceans	361 300 000	1 338 000 000	3 700	96.539
Glaciers and permanent snow cover	16 227 500	24 064 100	1 463	1.736
Ground water ^a	134 800 000	23 400 000	174	1.688
Gound ice in zones of permafrost strata	21 000 000	300 000	14	0.0216
Water in lakes	2 058 700	176 400	85.7	0.0127
Soil moisture	82 000 000	16 500	0.2	0.0012
Atmospheric water	510 000 000	12 900	0.025	0.0009
Marsh water	2 682 600	11 470	4.28	0.0008
Water in rivers	148 800 000	2120	0.014	0.0002
Biological water	510 000 000	1 120	0.002	0.0001
Total water reserves	510 000 000	1 385 984 610	2 718	100.00

Compartiment de
réserve

Proportion d'eau dans le
compartiment de réserve
par rapport à la quantité
totale d'eau stockée sur la
planète

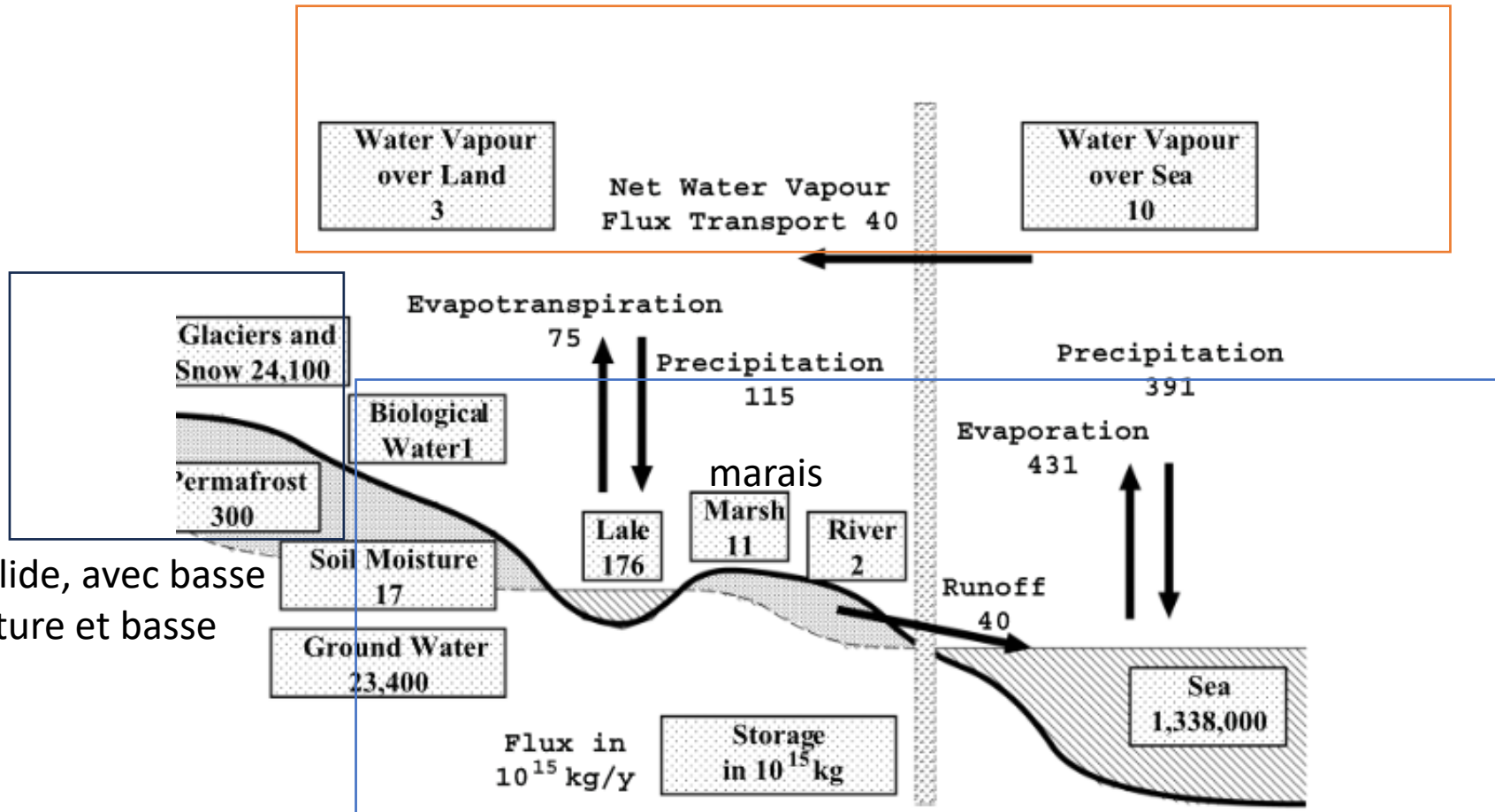
c) Cycle global de l'eau

Phase gazeuse, avec température haute et pression haute



Phase solide, avec basse température et basse pression

Phase liquide, avec température moyenne et pression moyenne
 Phase liquide, avec température normale et pression normale



c) Cycle global de l'eau: remarques et définitions

- À l'échelle mondiale, le ruissellement fluvial représente environ 8 % du flux atmosphérique dû à l'évaporation et aux précipitations.
- La vapeur d'eau participe à l'absorption dans l'atmosphère de certains rayonnements
- La condensation de la vapeur d'eau (passage en phase liquide) peut libérer une grande quantité de chaleur latente ($2,5 \times 10^6$ J/kg), ce qui réchauffe l'atmosphère et affecte la circulation atmosphérique (climat).
- Les précipitations (résultats de la condensation) sont très variables dans l'espace et dans le temps. Elles déterminent le cycle hydrologique à la surface de la terre et modifient la salinité de surface dans l'océan.

c) Cycle global de l'eau: remarques et définitions

- L'évapotranspiration est le flux de retour de l'eau de la surface de la Terre vers l'atmosphère et fournit un flux de chaleur latente depuis la surface. L'évapotranspiration est influencée par les conditions atmosphériques et pédologiques, ainsi que par la végétation.
- L'humidité du sol influence le bilan énergétique à la surface de la terre, car un manque d'eau disponible supprime l'évapotranspiration et modifie la capacité à absorber les rayonnements dans l'atmosphère.
- L'humidité du sol affecte également le ruissellement (« écoulement en surface) et l'infiltration de l'eau.

c) Cycle global de l'eau: remarques et définitions

- La végétation peut évapo-transpirer l'eau des couches profondes du sol, c'est-à-dire transformer la solution du sol en gaz. La végétation modifie également le bilan énergétique et hydrique de la surface en modifiant l'albédo, c'est-à-dire qu'elle va renvoyer une partie des rayonnements solaires.
- La couverture neigeuse possède un albédo élevé (réfléchis beaucoup les rayonnements), et vont posséder une température de surface inférieure à 0°C.
- Les eaux souterraines contribuent au ruissellement, en particulier pendant les périodes sèches. L'état des nappes phréatiques profondes peut également refléter le climat.

c) Cycle global de l'eau: remarques et définitions

- Le ruissellement renvoie l'eau vers l'océan. La quantité d'eau transportée par les rivières est inférieure à celle transportée par l'atmosphère et les océans, mais elle n'est pas négligeable. Le ruissellement dans les océans est important pour l'équilibre de l'eau douce et la salinité des océans.
- Les océans constituent un sous-système majeur du cycle global de l'eau. La circulation océanique transporte d'énormes quantités d'énergie et d'eau. Les courants océaniques de surface sont entraînés par les vents de surface, et l'atmosphère elle-même est sensible aux températures de surface de la mer. La température et la salinité déterminent la densité de l'eau de mer, ce qui contribue au retournement et à la circulation générale des eaux profondes.

Temps de passage de l'eau dans ses compartiments de réserve

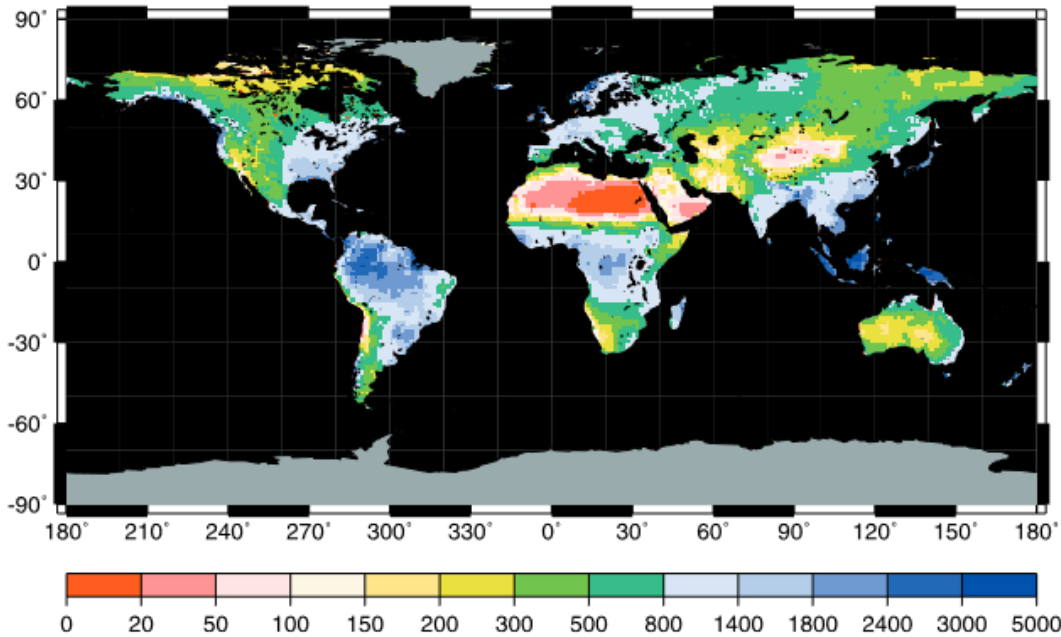
Form of water	Covering Area (km ²)	Total Volume (km ³)	Mean Depth (m)	Share of Volume (%)	Mean Residence Time
World oceans	361 300 000	1 338 000 000	3 700	96.539	2 500 years
Glaciers and permanent snow cover	16 227 500	24 064 100	1 463	1.736	56 years
Ground water ^a	134 800 000	23 400 000	174	1.688	8 years
Gound ice in zones of permafrost strata	21 000 000	300 000	14	0.0216	
Water in lakes	2 058 700	176 400	85.7	0.0127	
Soil moisture	82 000 000	16 500	0.2	0.0012	
Atmospheric water	510 000 000	12 900	0.025	0.0009	9 days
Marsh water	2 682 600	11 470	4.28	0.0008	
Water in rivers	148 800 000	2120	0.014	0.0002	18 days
Biological water	510 000 000	1 120	0.002	0.0001	
Total water reserves	510 000 000	1 385 984 610	2 718	100.00	

Temps de séjour moyen de l'eau dans le compartiments de réserves

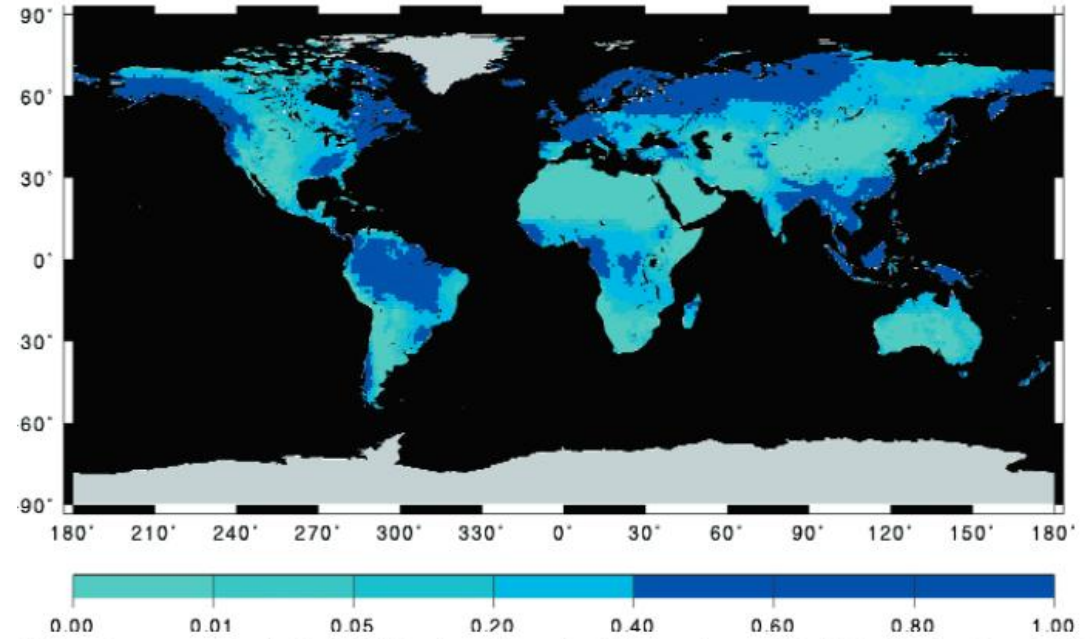
Les temps de séjour peuvent varier considérablement d'une région à l'autre, mais ils donnent une indication générale de la sensibilité de chaque réserve à la pollution et aux mesures visant à améliorer la qualité de l'eau.

d) Répartition des ruissellements dans le monde

Mean_Annual_Precipitation[mm/yr] 1986-1995



Mean annual precipitation (mm/y) for 1986-95 from the forcing data for the Global Soil Wetness Project Phase II



2. Annual mean runoff ratio for 1986-95 estimated by a simple land surface model with forcing data from the Global Wetness Project Phase II

d) Répartition des ruissellement dans le monde

- La distribution spatiale du taux de ruissellement est partiellement influencée par la distribution des précipitations.
- Elle est également influencée par le schéma saisonnier des précipitations et de l'évaporation potentielle, ainsi que par les caractéristiques de la surface terrestre, telles que la topographie et la couverture du sol.
- Le ruissellement ne disparaît pas, il est acheminé vers les océans par les cours d'eau.

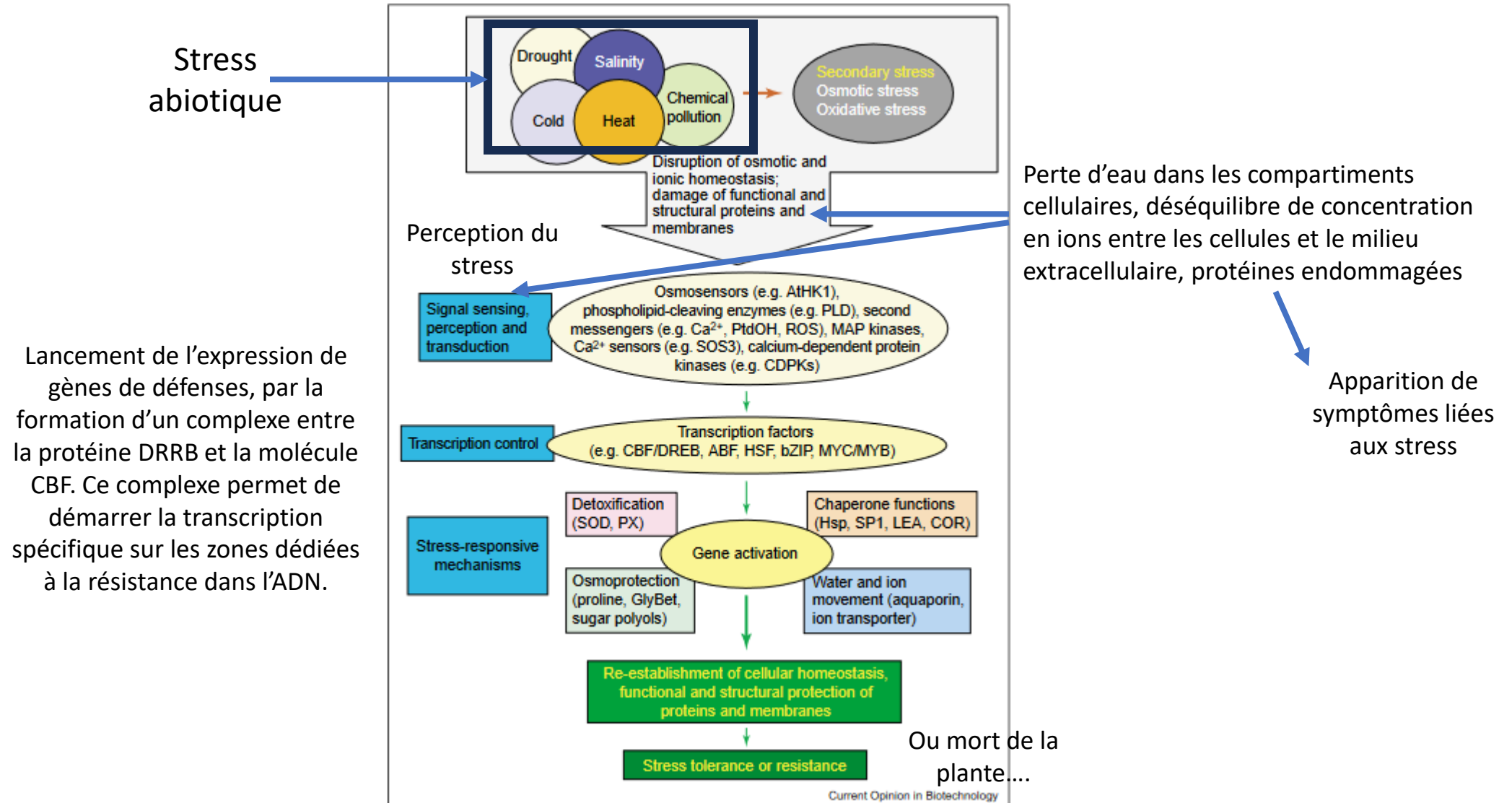
Rappel: stress hydrique chez la plante

- Stress abiotique=condition environnementale qui réduit la croissance et la production de biomasses (rendement) par rapport à un niveau optimal.
- Le stress hydrique est l'un des stress abiotiques existants les plus contraignants pour la plante.
- Le réchauffement climatique amplifie la fréquence d'apparition de ce stress.
- Ce type de stress va avoir un impact au niveau cellulaire de la plante.

Table 1. Distribution of insurance indemnities for crop losses in the United States during the last 40 years (Boyer, 1982)

<i>Cause of crop loss</i>	<i>Proportion of payment (%)</i>
Drought	40.8
Excess water	16.4
Cold	13.8
Hail	11.3
Wind	7.0
Insects	4.5
Disease	2.7
Flood	2.1
Others	1.5

Perception du stress hydrique chez la plante au niveau moléculaire

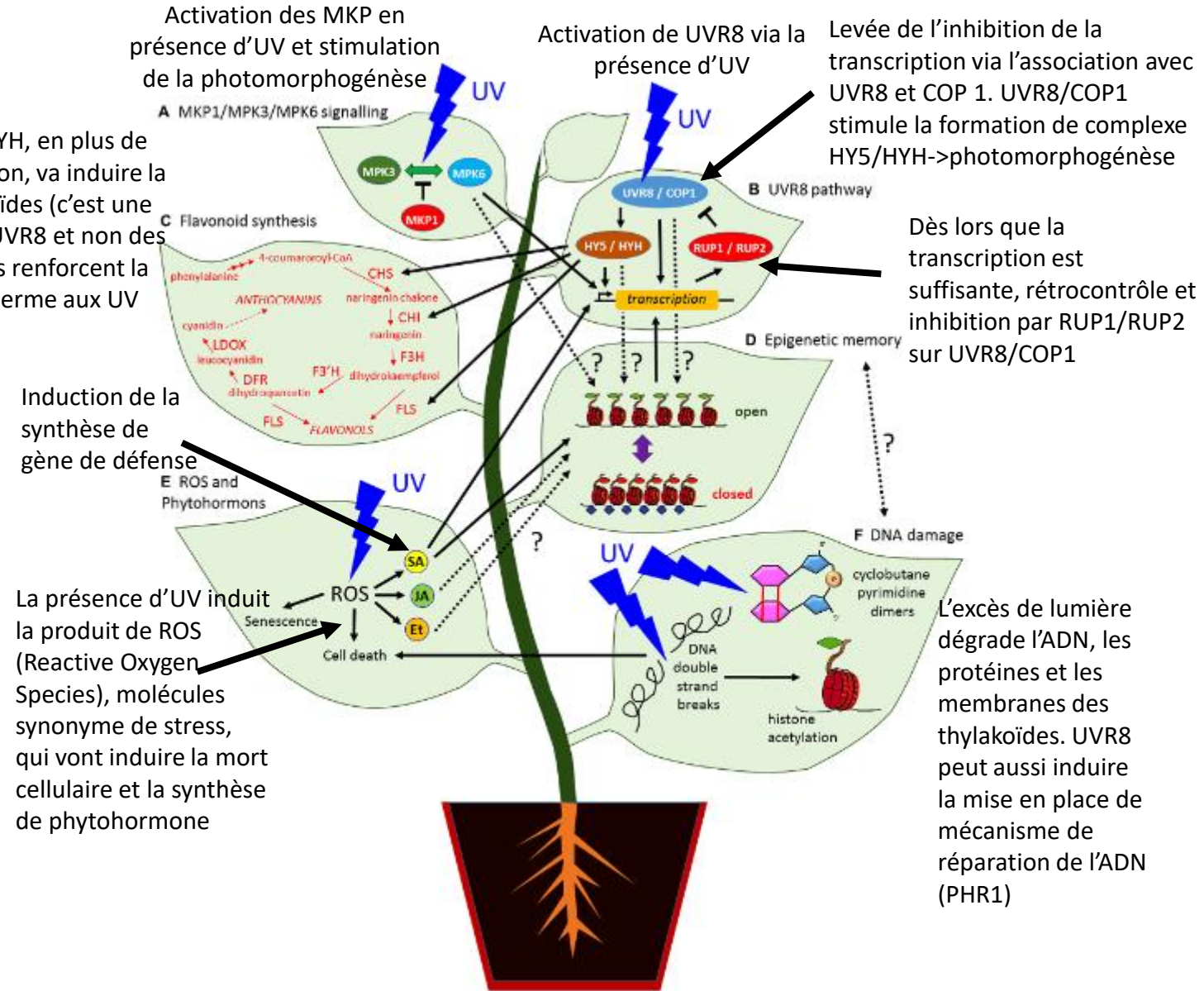


Lancement de l'expression de gènes de défenses, par la formation d'un complexe entre la protéine DRRB et la molécule CBF. Ce complexe permet de démarrer la transcription spécifique sur les zones dédiées à la résistance dans l'ADN.

Autre exemple de perception de stress au niveau moléculaire

- Ici il s'agira du stress lumineux. La réaction de la plante sera notamment tourner autour du gène UVR8.

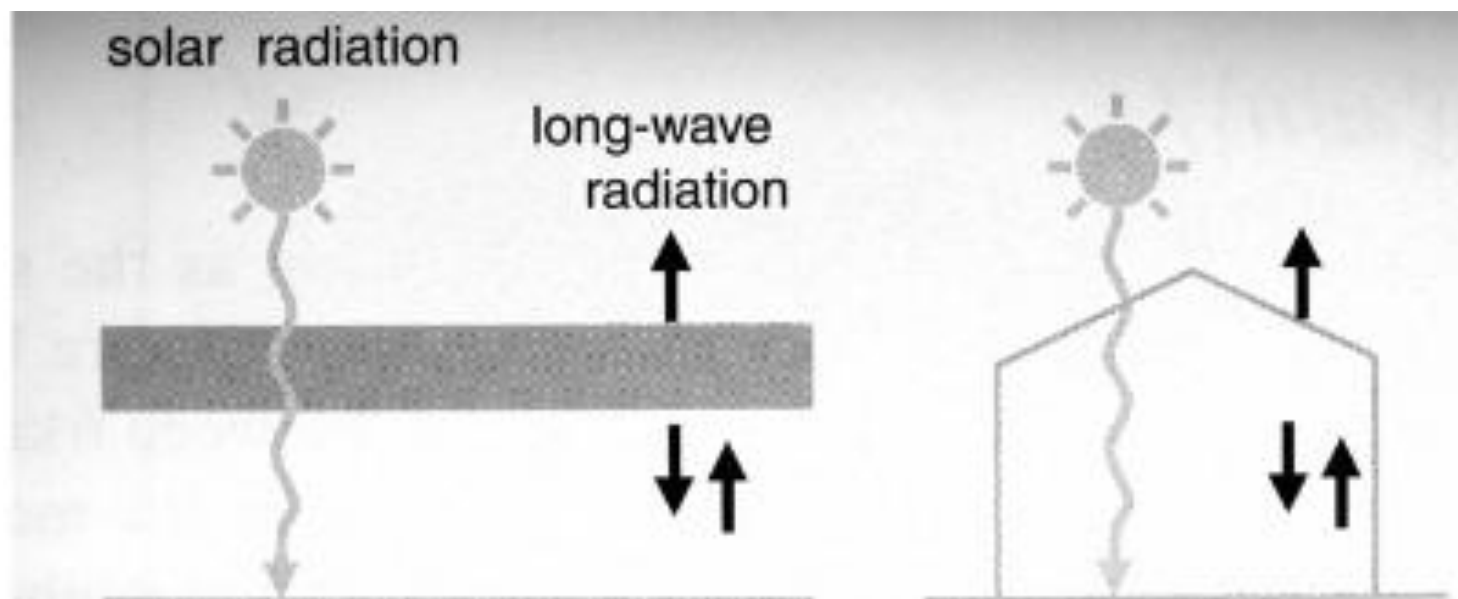
Le complexe HY5/HYH, en plus de stimuler la transcription, va induire la synthèse de Flavonoïdes (c'est une voie dépendante de UVR8 et non des UV). Les Flavonoïdes renforcent la résistance de l'épiderme aux UV



IV) Le réchauffement climatique

- Le réchauffement de la planète désigne l'effet sur le climat des activités humaines, en particulier la combustion de combustibles fossiles (charbon, pétrole et gaz) et la déforestation à grande échelle.
- Ces activités humaines vont entraîner le relargage de gaz à effet de serre dans l'atmosphère. On peut citer comme gaz à effet de serre le CO₂, le NO₂, le CH₄ etc...
- L'effet de serre est dû à la présence dans l'atmosphère de gaz à effet de serre, qui absorbent le rayonnement thermique réfléchi à la surface de la Terre. Ces gaz à effet de serre agissent, donc comme une couverture sur la surface de la planète, empêchant les pertes de chaleur.

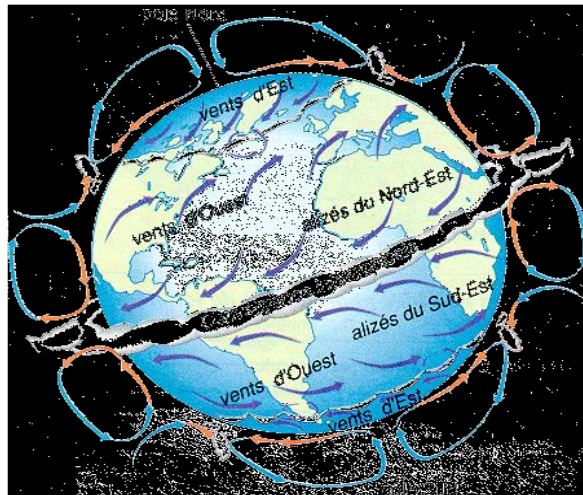
IV) Le réchauffement climatique



Les gaz à effet de serre limite l'efficacité habituelle de la réflexion de la lumière. Ce qui entraîne une hausse de la chaleur.

IV) Le réchauffement climatique

- Le changement climatique mondial est une modification des schémas météorologiques à long terme qui caractérisent les régions du monde. À long terme, le changement climatique pourrait affecter l'agriculture de plusieurs manières, comme la quantité et la qualité des cultures en termes de productivité, de taux de croissance, de taux de photosynthèse et de transpiration, de disponibilité de l'humidité, etc.



En raison des montées en température, les phénomènes de convection sont modifiés, ce qui modifie le mouvement des vents.

IV) Le réchauffement climatique

- L'augmentation de la température saisonnière moyenne peut réduire la durée de nombreuses cultures et, par conséquent, leur rendement. Dans les régions où les températures sont déjà proches des maxima physiologiques pour les cultures, le réchauffement aura un impact plus immédiat sur les rendements.
- Les scénarios de changement climatique comprennent des températures plus élevées, des changements dans les précipitations et des concentrations atmosphériques de CO₂ plus élevées. L'effet de serre peut être important pour l'agriculture de trois manières.

IV)Le réchauffement climatique

- L'effet de serre peut être important pour l'agriculture de trois manières:
 - 1)L'augmentation des concentrations de CO₂ dans l'atmosphère.
 - 2) La modification des niveaux de température, de précipitations et d'ensoleillement qui peuvent influencer la productivité des plantes.
 - 3)Sur du très long terme, l'effet de serre va induire de la perte de foncier agricole en raison de la montée des eaux. Indirectement, les conditions de salinité habituelles pourraient changer.

IV) Le réchauffement climatique

- 1) L'augmentation des concentrations de CO₂ dans l'atmosphère peut avoir un effet direct sur le taux de croissance des plantes cultivées et des adventices.

La photosynthèse suit généralement cette équation:



La réduction de l'eau va fournir des ions H⁺ qui seront excrétés des thylakoïdes via une ATP synthase. La réduction de CO₂ se fera dans le cycle de Calvin, où il sera transformé en squelette carboné (élément structural des cellules) et en sucre.

Une augmentation de la quantité de CO₂ va donc dans le sens du positif pour la photosynthèse.

IV) Le réchauffement climatique

- 1) L'augmentation des concentrations de CO₂ dans l'atmosphère peut avoir un effet direct sur le taux de croissance des plantes cultivées et des adventices.

La teneur en CO₂ va aussi influencer le phénomène d'ouverture des stomates. Elles auront tendance à rester fermées si la concentration en CO₂ est élevée. Si les stomates sont fermés l'eau peut difficilement circuler dans la plante. Couplée à une période de sécheresse cela peut-être contraignant.

IV) Le réchauffement climatique

- 1) L'augmentation des concentrations de CO₂ dans l'atmosphère peut avoir un effet direct sur le taux de croissance des plantes cultivées et des adventices.

Face à la forte teneur en CO₂, les feuilles seront plus riches en sucre qu'à l'accoutumée. À l'inverse le taux d'azote dans les feuilles baisse. En effet, les stomates étant fermées, impossible d'acheminer correctement cet azote dans la plante.

IV) Le réchauffement climatique

- 1) L'augmentation des concentrations de CO₂ dans l'atmosphère peut avoir un effet direct sur le taux de croissance des plantes cultivées et des adventices.

À cause du manque d'azote dans la feuille, sa valeur nutritive baisse. Les phytophages ou potentiels ravageurs, pour compenser ce manque vont devoir consommer plus de masse foliaire que d'habitude.

Par valeur nutritive qui baisse, il faut comprendre non seulement moins d'azote (protéine) mais aussi moins d'éléments minéraux. Ce qui peut être une contrainte économique.

IV) Le réchauffement climatique

- 1) L'augmentation des concentrations de CO₂ dans l'atmosphère peut avoir un effet direct sur le taux de croissance des plantes cultivées et des adventices.

La manière d'absorber le CO₂ va définir le type de photosynthèse chez une plante. On pourra en compter 3 types: les plantes en C₃ (majoritaire), en C₄ et les plantes CAM. Les plantes en C₄ comprennent la plupart des graminées tropicales et subtropicales et plusieurs cultures importantes, notamment le maïs, la canne à sucre. Les plantes en C₄ utilisent une pompe biochimique pour concentrer le CO₂ aux endroits de la feuille où l'enzyme RUBISCO assure l'incorporation du CO₂ par le cycle photosynthétique de Calvin. C'est-à-dire que base, ces plantes font en sorte d'obtenir plus de CO₂ que les plantes en C₃ en dépensant un peu plus d'énergie pour son absorption.

IV) Le réchauffement climatique

- 1) L'augmentation des concentrations de CO₂ dans l'atmosphère peut avoir un effet direct sur le taux de croissance des plantes cultivées et des adventices.

Compte tenu de leurs constitutions, il semble que les plantes en C₄, soient moins impactées que les plantes en C₃ par les fortes teneurs en CO₂, à cause de leurs métabolismes spécifiques, qui leur permet de supporter de forte dose de CO₂ tout en limitant les risques liés à la gestion de l'eau dans la plante.

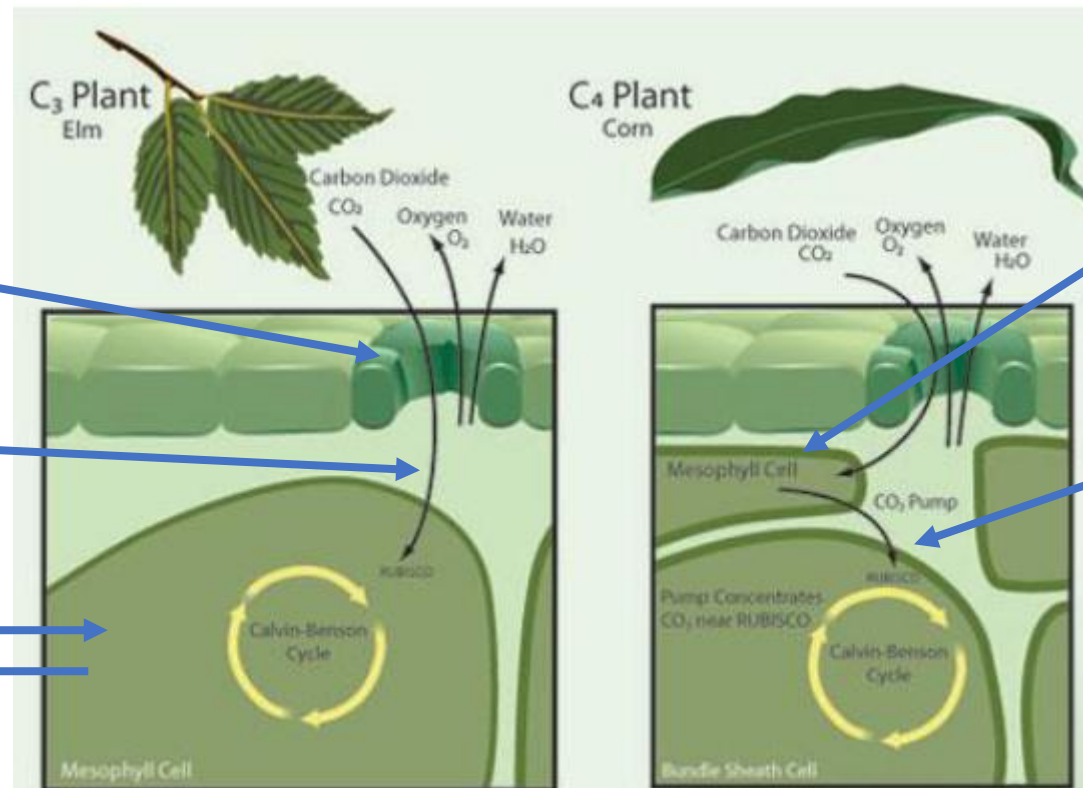
IV) Le réchauffement climatique

- 1) L'augmentation des concentrations de CO₂ dans l'atmosphère peut avoir un effet direct sur le taux de croissance des plantes cultivées et des adventices.

Attention, il existe toujours des exceptions! En l'occurrence, les Fabaceae (Légumineuses), sont des plantes C₃, mais supportent plutôt bien les fortes teneurs en CO₂. Les Légumineuses entretiennent d'étroites relations mutualistes avec des bactéries qui vivent dans les nodules formés sur les racines de la plante. Ces bactéries sont capables de « fixer » l'azote atmosphérique, qui sera absorbée et utilisée par les plantes. Les légumineuses vont transférer l'excès de carbone (CO₂) vers les nodules racinaires où il peut servir de source de carbone et d'énergie pour les symbiotes bactériens.

IV) Le réchauffement climatique

- 1) L'augmentation des concentrations de CO₂ dans l'atmosphère peut avoir un effet direct sur le taux de croissance des plantes cultivées et des adventices.



Stomate ouverte

Diffusion passive du CO₂, pas d'énergie consommée, mais c'est un mécanisme lent. Le CO₂ arrive au fur et à mesure en petite quantité.

Echange Carbone/Azote dans le cas des Légumineuses mutualistes avec des bactéries.

Tissus de stockage et de transition du CO₂. Si le milieu est saturé, le mésophylle peut contrôler la sortie du CO₂. L'alternative étant la fermeture des stomates.

Transport actif du CO₂, de l'énergie est consommée (ATP), et c'est un mécanisme rapide. Le CO₂ arrive en grande quantité. Il est converti en malate, avant d'intervenir dans le cycle de Calvin.

IV) Le réchauffement climatique

2) La modification des niveaux de température, de précipitations et d'ensoleillement qui peuvent influencer la productivité des plantes

Il conviendra alors de sélectionner des plantes adaptées (C4, Fabaceae, etc...) aux nouvelles conditions climatiques et de mettre en place les méthodes de protections adéquates (paillage, amendement, etc...). Comme plantes adaptées à ce type de conditions, on peut citer les plantes CAM.

IV) Le réchauffement climatique

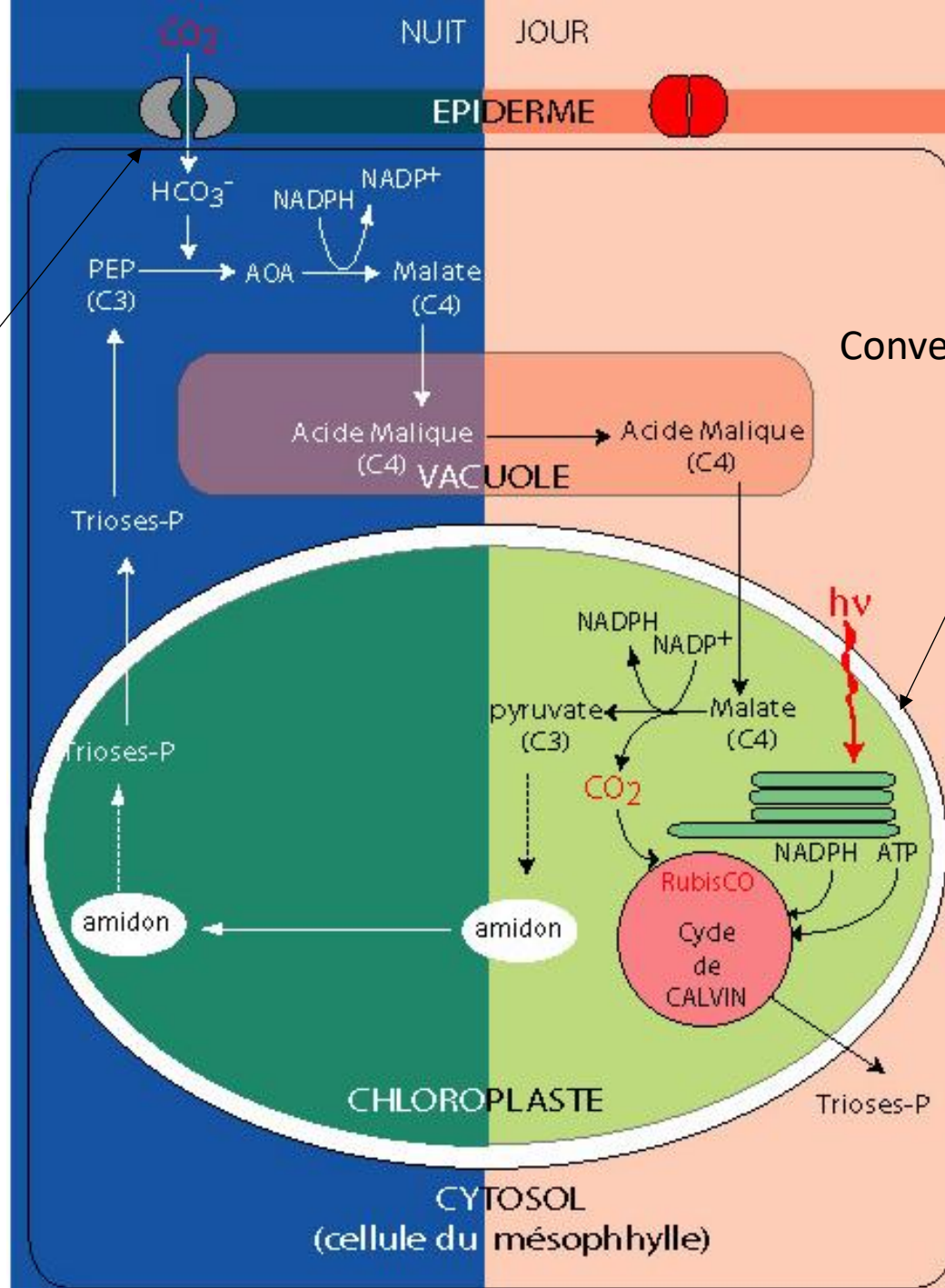
2) La modification des niveaux de température, de précipitations et d'ensoleillement qui peuvent influencer la productivité des plantes

Comme plantes adaptées à ce type de conditions, on peut les plantes CAM (Crassulacean Acid Metabolism = métabolisme acide des Crassulacées). Il s'agit généralement de plante Xérophytes (adaptées à la sécheresse) ou succulentes (qui possèdent des mucilages et une constitution spéciales qui leur permettent de mieux retenir l'eau).

Mécanismes d'incorporation du CO₂ chez une plante CAM

Transport actif du CO₂ dans la cellule (comme pour une plante en C₄) et de nuit, ce qui permet de limiter les pertes en eau lors de l'ouverture des stomates. Stockage dans la vacuole. La nuit l'eau peut circuler correctement dans la plante.

Ce type de métabolisme représente une bonne adaptation à la sécheresse puisque la plante peut limiter sa transpiration le jour en fermant totalement ses stomates et conserver une incorporation du CO₂ la nuit aux heures les plus fraîches. Remarquons que de nombreuses plantes CAM montrent de plus d'autres adaptations anatomiques ou morphologiques à la sécheresse (réduction de la surface des feuilles, épines, réserves d'eau, etc.)



Conversion du CO₂ en sucre de jour, et fermeture des stomate

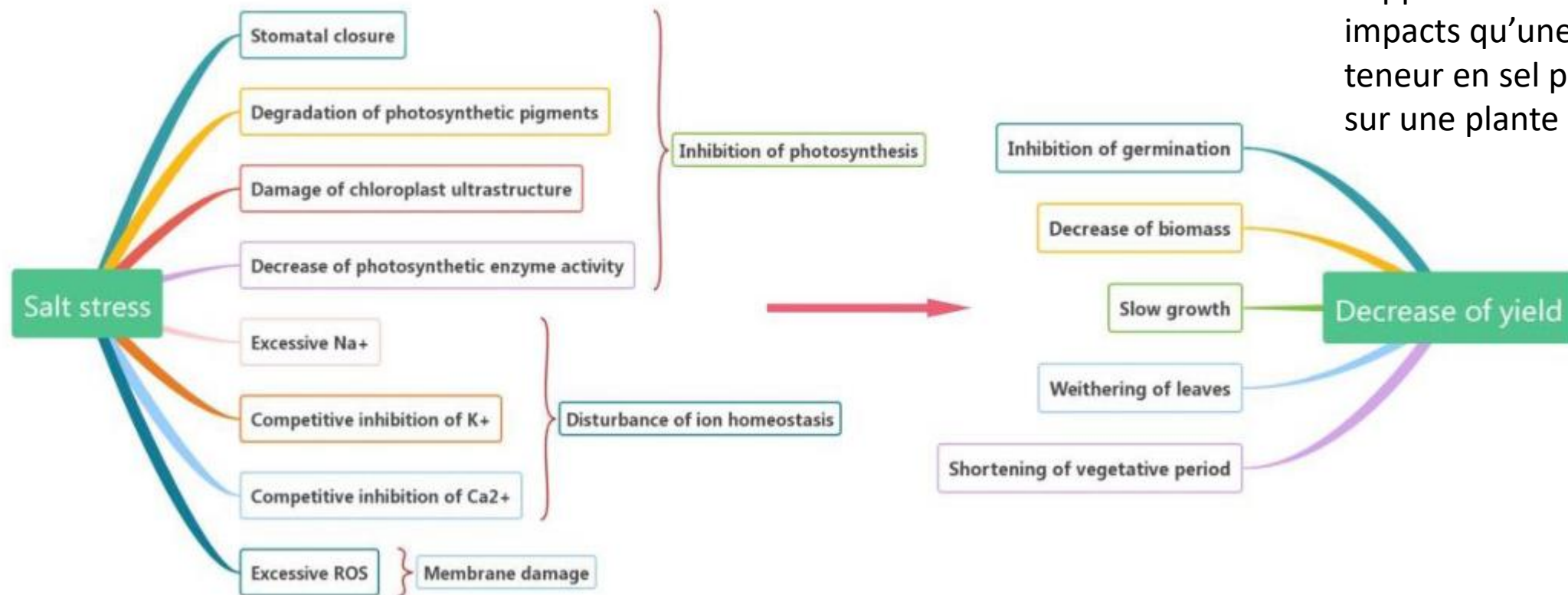
IV)Le réchauffement climatique

3) Sur du très long terme, l'effet de serre va induire de la perte de foncier agricole en raison de la montée des eaux. Indirectement, les conditions de salinité habituelle pourraient changer.

Dans ce cas précis, il convient de sélectionner des plantes dont la valeur nutritive et le rendement ne sont pas affectés par le réchauffement climatique et soit suffisamment hauts. Si possible ces plantes devront être halophiles aussi.

IV) Le réchauffement climatique

3) Sur du très long terme, l'effet de serre va induire de la perte de foncier agricole en raison de la montée des eaux. Indirectement, les conditions de salinité habituelles pourraient changer.

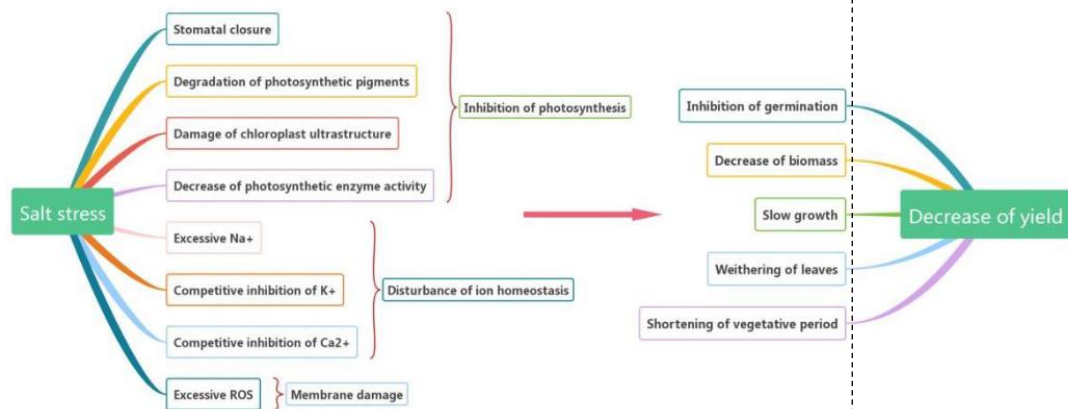


Rappel sur les différents impacts qu'une trop forte teneur en sel peut avoir sur une plante

Conclusion

- Une fois les contraintes, symptômes et mécanismes identifiés, il faut être capable de proposer des solutions à tout type d'échelle.

Échelle du diagnostiqueur



Module 4.2

Échelle de l'agriculteur

Cultures adaptées,
irrigation contrôlée,
paillage et
amendement pour
conserver l'humidité
du sol, passage à la
serre etc...

Module 4.1-4.4-7.2-8.1-8.2

Échelle de expérimentale

Sélection variétale,
OGM,
Ensemencement
bactérien,
Phytorémédiation,
etc...

Module 5.1-5.2

- Bien évidemment, cela passe par la compréhension des spécificités climatiques d'une région, des plants qui y sont adaptées et des moyens de lutte à disposition.