

Impacts du changement climatique sur l'agriculture

1. Généralités sur la Température

La température est l'un des paramètres environnementaux fondamentaux qui influencent profondément les processus biologiques, chimiques et physiques à la surface de la Terre. Elle joue un rôle essentiel dans la régulation des climats, des écosystèmes et des activités biologiques, notamment celles des végétaux. En effet, la température affecte directement la photosynthèse, la croissance et le développement des plantes, ainsi que leur capacité à résister aux stress environnementaux. La température a de l'influences sur :

- **La Biodiversité et Distribution des Espèces** : La température détermine la distribution géographique des espèces animales et végétales. Les variations de température influencent la survie et l'adaptation des organismes vivants dans différents environnements.
- **Activités Biologiques** : Elle régule les taux métaboliques, la reproduction et la migration des animaux, ainsi que la croissance des végétaux.
- **Les Processus Chimiques et Physiques** :
 - i) **Réactions Chimiques** : La température accélère ou ralentit les réactions chimiques, ce qui affecte les cycles biogéochimiques et la qualité de l'eau.
 - ii) **État de l'Eau** : Elle influence l'évaporation, la condensation et la formation de précipitations, ce qui à son tour affecte les cycles hydrologiques.
- **Écosystèmes Aquatiques** : Elle régule la concentration d'oxygène dissous dans l'eau, affectant la vie aquatique et la santé des écosystèmes aquatiques.

1.1 Définition

La température est une grandeur physique qui caractérise l'état thermique d'un système, déterminée par l'énergie cinétique moyenne des particules constituant la matière. En botanique et en écologie, elle joue un rôle crucial dans divers processus biologiques et écologiques.

2. Mesures et expression de la Température de l’Air

L'évolution des instruments de mesure de température reflète une progression significative dans la précision et la technologie. À l'époque ancienne, les premiers thermomètres à mercure et alcool ont été utilisés pour mesurer la température, bien que leur précision était limitée. Au XVIIIe siècle, le thermomètre Six a été développé pour enregistrer les températures maximales et minimales. Au XIXe siècle, le thermographe a permis l'enregistrement continu des températures sur papier, améliorant ainsi la capacité à suivre les variations temporelles. Dans la période moderne, les thermomètres numériques offrent une lecture rapide et plus précise. Les stations météo automatiques mesurent les températures maximales, minimales et moyennes avec horodatage, tandis que les capteurs infrarouges permettent la mesure à distance. Enfin, les réseaux météo modernes utilisant l'Internet pour transmettre les données en temps réel via des réseaux sans fil ou mobiles.

Période	Instrument	Fonction	Remarques
 Ancien	Thermomètre mercure / alcool	Lecture manuelle de la température instantanée	Sensible à la casse / besoin d'une lecture humaine
 Thermomètre Six (XVIIIe siècle)	Spécial T° max / min	Deux colonnes, indicateurs poussés par le liquide	Utilisé en agriculture et météorologie
 Thermographe (XIXe siècle)	Enregistrement continu sur papier	Bras à encre, rouleau mobile	Archive visuelle continue
 Thermomètre numérique	Lecture rapide, plus précise	Basé sur des capteurs électroniques	
 Stations météo automatiques	Mesure T max, T min, T moy avec horodatage	Capteurs thermiques, mémoire interne	
 Capteurs infrarouges / IR	Mesure à distance (infra rouge)	Utilisé dans satellites, drones	
 Réseaux météo modernes (IoT)	Transmission en temps réel (WiFi, GSM...)	Permet de créer des bases de données climatiques	



Thermomètre six

Unités de température :

➤ Celsius (°C) :

- Utilisée couramment en météorologie et dans la vie quotidienne.
- Basée sur deux points : 0 °C (point de congélation de l'eau) et 100 °C (point d'ébullition de l'eau à pression normale).

➤ Kelvin (K) :

- Utilisée dans les sciences, notamment en physique.
- Échelle absolue de température : 0 K correspond au zéro absolu (température la plus basse théoriquement possible).
- Conversion :

$$T(K) = T(^{\circ}C) + 273,15$$

➤ Fahrenheit (°F) :

- Utilisée surtout dans les pays anglo-saxons.
- Points de référence : 32 °F (congélation de l'eau), 212 °F (ébullition de l'eau).
- Conversion :

$$T(^{\circ}F) = 9/5 \cdot T(^{\circ}C) + 32$$

Unités de Température

Unité	Symbole	Référence	Conversion	Utilisation
Celsius	°C	0 °C = eau gèle 100 °C = eau bout	—	Quotidien, météo, médecine
Kelvin	K	0 K = zéro absolu	K = °C + 273,15	Sciences, physique

Unité	Symbole	Référence	Conversion	Utilisation
Fahrenheit	°F	32 °F = eau gèle 212 °F = eau bout	$^{\circ}\text{F} = (9/5 \times ^{\circ}\text{C}) + 32$ $^{\circ}\text{C} = (^{\circ}\text{F} - 32) \times 5/9$	Pays anglo-saxons (USA, etc.)

3. Variation de température

La température à la surface de la Terre n'est pas uniformément répartie. Cette inégalité est le fruit de nombreux facteurs géographiques, astronomiques et atmosphériques. Comprendre cette répartition est essentiel pour appréhender les climats du monde, les dynamiques météorologiques et même les grands équilibres écologiques.

3.1 L'inégale répartition de l'énergie solaire

La Terre est constamment exposée au rayonnement solaire, mais l'intensité de ce rayonnement varie selon la latitude. À l'équateur, les rayons du soleil arrivent de manière quasi perpendiculaire, concentrant l'énergie sur une petite surface, ce qui engendre des températures élevées. En revanche, vers les pôles, l'inclinaison des rayons solaires les rend plus obliques, dispersant l'énergie sur une plus grande surface, ce qui réduit la température.

a) L'effet de la rotation et de l'inclinaison de la Terre et Les variations saisonnières

L'inclinaison de l'axe terrestre (23,5°) provoque des saisons, modifiant la distribution de la chaleur au cours de l'année. Par exemple, en été dans l'hémisphère nord, les régions tempérées et polaires reçoivent davantage d'ensoleillement, entraînant une hausse des températures. La manière dont cette énergie solaire est reçue diffère selon la latitude :

- **Zones équatoriales** : Ces régions reçoivent une quantité d'énergie solaire presque constante tout au long de l'année, car les rayons du soleil y frappent la surface terrestre de manière plus perpendiculaire. Résultat : les températures y sont élevées et relativement stables.
- **Régions polaires** : Les rayons solaires y arrivent de manière très oblique, ce qui réduit l'intensité de la chaleur reçue. De plus, une partie importante de la lumière est réfléchi par la neige et la glace (effet d'albédo), accentuant le froid.
- **Régions tempérées** : Elles connaissent une variation notable des températures au cours de l'année, en raison de l'inclinaison de l'axe terrestre et du déplacement apparent du soleil.

Cette inégalité de température crée des **zones climatiques distinctes**, allant des climats tropicaux aux climats polaires, en passant par les climats tempérés.

b) Les variations saisonnières

L'un des facteurs majeurs responsables des différences de température au cours de l'année est **l'inclinaison de l'axe terrestre (23,5°)** combinée au **mouvement de révolution de la Terre autour du Soleil**.

- En **été**, l'hémisphère incliné vers le Soleil reçoit plus de rayonnement, les journées sont longues et les températures augmentent.

- En **hiver**, l'hémisphère est incliné à l'opposé du Soleil, les journées sont courtes et les températures chutent.
- Le **printemps** et l'**automne** sont des saisons de transition où les températures évoluent progressivement.

3.2 Effets de la topographie locale sur la température

La répartition de la température est influencée par plusieurs facteurs, notamment la topographie et l'urbanisation, qui jouent un rôle crucial dans le déplacement des masses d'air. Voici comment ces facteurs interviennent :

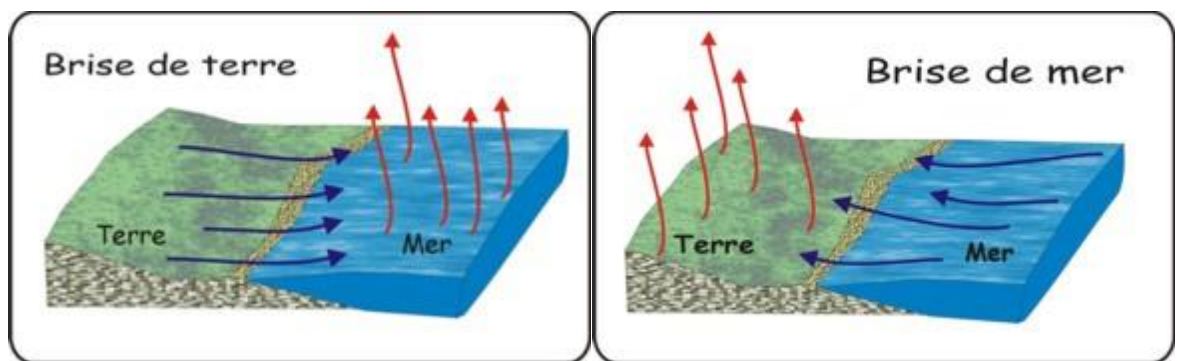
3.2.1 L'altitude et Température

La topographie affecte la température en modifiant les conditions climatiques locales. L'altitude, par exemple, est un facteur majeur qui influence la température. En général, la température de l'air diminue avec l'altitude, environ $0,55^{\circ}\text{C}$ pour chaque 100 mètres de dénivellation. Ce phénomène est bien illustré par les gradients thermiques observés dans les montagnes, où la température peut varier significativement entre les vallées et les sommets.

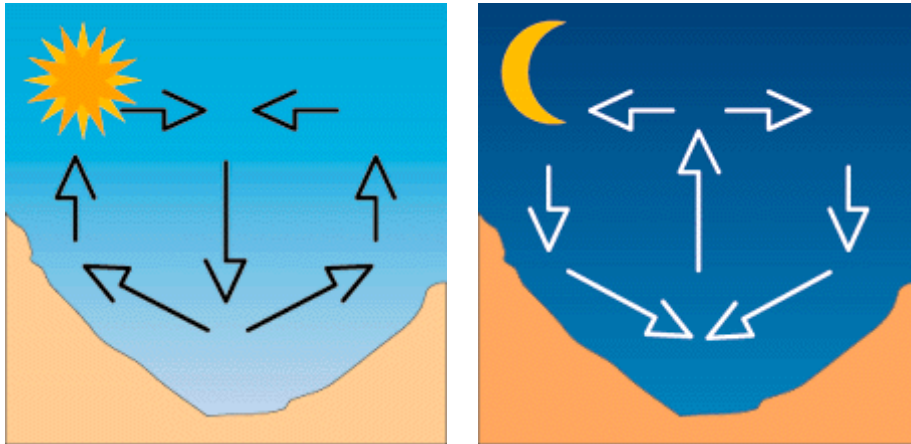
Plusieurs phénomènes thermiques locaux sont influencés par la topographie et l'urbanisation :

Brise de Mer et Brise de Terre : Ces phénomènes sont générés par le contraste thermique entre la terre et la mer. La nuit, la terre se refroidit beaucoup plus rapidement que la mer. La nuit et tôt le matin, se forme alors une brise soufflant de la terre vers la mer : **la brise de terre**. Afin de combler la baisse de pression au-dessus la mer, l'air au-dessus du sol se déplace vers la mer. La nuit, l'eau plus chaude réchauffe l'air qui est en contact. L'air amorce un vers le haut.

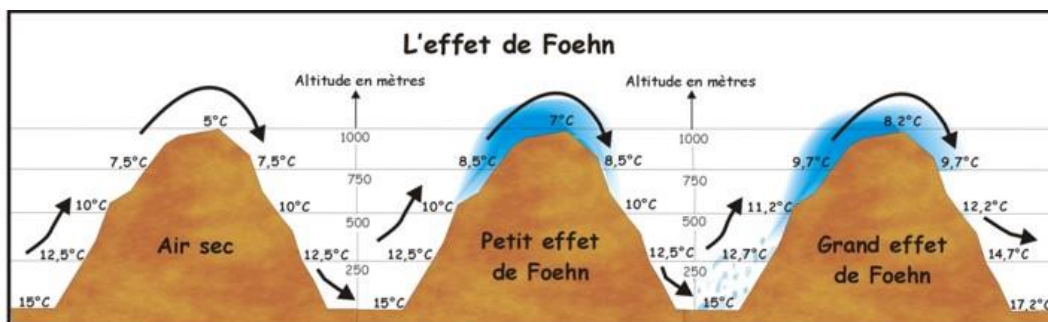
Le jour, la terre se réchauffe plus rapidement, Le soleil réchauffe le sol, l'air chaud monte et crée une baisse de pression. Afin de combler l'air qui monte, l'air plus frais au-dessus de la mer se déplace vers la terre.



- **Brise de Montagne :** Ce phénomène est similaire mais se produit dans les régions montagneuses. Le réchauffement diurne de la vallée crée une brise montante, tandis que la nuit, une brise descendante se forme.



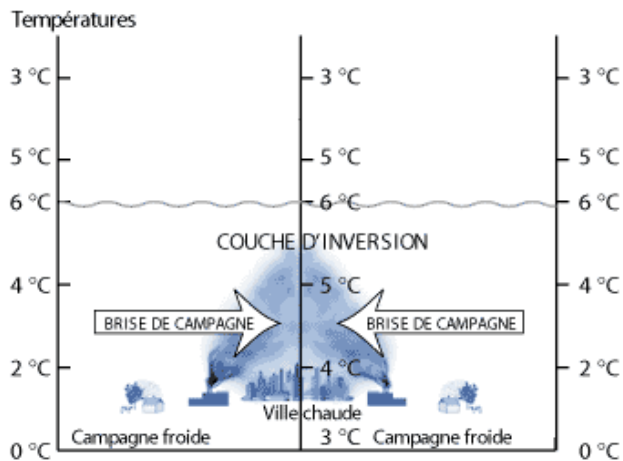
- **Effet de Föhn :** Lorsqu'un vent traverse une chaîne de montagnes, il peut provoquer un réchauffement et une sécheresse sur le versant opposé, connu sous le nom d'effet de Föhn. Cela se produit lorsque l'air se réchauffe en descendant après avoir perdu son humidité par condensation.



Brise de Campagne

Les bâtiments et les différentes activités au sein d'une agglomération (transport, chauffage...) changeant les caractéristiques thermiques de l'air. L'agglomération constitue un îlot de chaleur qui subsiste à la tombée du jour, tandis que la campagne environnante se refroidit. L'air chaud s'élève, au-dessus de la ville, provoquant alors une dépression qui attire l'air plus frais des campagnes alentours

Ces phénomènes illustrent comment la topographie et l'urbanisation influencent la répartition de la température et les conditions climatiques locales.



4. Action de la température sur les végétaux

4.1. Température et Mécanismes Physiologiques Végétaux

La température joue un rôle déterminant dans la régulation des processus métaboliques des plantes. Une **augmentation modérée de la température** peut initialement stimuler certaines fonctions physiologiques, tant que les autres ressources (notamment l'eau et les nutriments) ne deviennent pas limitantes. Cependant, au-delà d'un certain **seuil thermique optimal**, ces processus sont **déséquilibrés** et peuvent engendrer des effets **négatifs** sur la croissance, la productivité et la survie des plantes (Sage & Kubien, 2007).

4.2. Photorespiration

La **photorespiration** est un processus métabolique dans lequel l'enzyme **Rubisco** fixe l'oxygène (O_2) au lieu du dioxyde de carbone (CO_2), générant une perte nette de carbone pour la plante. Ce phénomène **s'intensifie** avec la chaleur car :

- La solubilité du CO_2 diminue plus rapidement que celle de l' O_2 avec l'élévation de la température.
- La Rubisco voit son affinité pour l' O_2 augmenter, ce qui favorise la voie photorespiratoire au détriment de la photosynthèse (Sharkey, 1988). La plante **perd de l'énergie et du carbone**, réduisant l'efficacité photosynthétique globale, surtout chez les plantes comme le blé ou le riz.

4.3. Respiration Nocturne : Augmentation des Coûts Métaboliques

La **respiration nocturne** des plantes correspond à la dégradation des glucides accumulés durant le jour, afin de produire de l'ATP pour les fonctions cellulaires. Sous forte température nocturne :

- Le taux de respiration augmente fortement (Atkin & Tjoelker, 2003).
- Les **réserves carbonées s'épuisent plus rapidement**, réduisant la disponibilité en énergie pour la croissance et la reproduction. Ce qui conduit à une **diminution nette de la croissance** car le coût respiratoire excède les gains de la photosynthèse diurne.

4.4. Conductance Stomatique

Une **régulation Complexe sous Stress Thermique**, les **stomates** sont des pores régulant les échanges gazeux entre la plante et l'atmosphère. La **conductance stomatique** (ouverture des stomates) est influencée par la température via :

- L'évapotranspiration : plus il fait chaud, plus la transpiration augmente.
- La contrainte hydrique : la plante ferme ses stomates pour conserver l'eau.

Cependant :

- Une fermeture prolongée **réduit l'entrée de CO₂**, ce qui **limite la photosynthèse** (Flexas et al., 2004).
- Elle perturbe aussi la **régulation thermique** des feuilles, entraînant des **dommages thermiques** et des risques de **stress oxydatif**.

4.5. Photosynthèse

La **photosynthèse** a une température optimale spécifique selon les espèces. Lorsque cette température est dépassée :

- Les **enzymes du cycle de Calvin**, notamment la Rubisco, deviennent moins efficaces.
- Les **thylakoïdes des chloroplastes** peuvent être endommagés, perturbant la chaîne de transport des électrons.
- La **photo-inhibition thermique** limite la capture de lumière et la conversion d'énergie.

La **capacité de fixation du CO₂ diminue**, ce qui affecte la croissance et la biomasse (Yamori et al., 2014).

4.6. Désorganisation Enzymatique et Stress Oxydatif

À haute température :

- Les protéines et enzymes subissent une **dénaturation thermique**.
- Des **radicaux libres** (ROS) sont produits en excès, causant des dommages aux membranes, à l'ADN et aux protéines.
- La synthèse de **chaperonnes thermiques** (HSPs) est activée, mais insuffisante en cas de stress prolongé.

Ces dérèglements s'accompagnent souvent d'une **altération des flux hydriques** et d'un **effondrement des mécanismes antioxydants**.

4.7. Rôle de la Disponibilité en Eau

Les effets thermiques décrits ci-dessus sont **amplifiés** lorsque la disponibilité en eau est limitée :

- La sécheresse renforce la fermeture stomatique.
- La combinaison chaleur + déficit hydrique conduit à une **embolisation du xylème**, bloquant le transport de la sève brute (Brodribb & Cochard, 2009).
- Les tissus foliaires peuvent subir une **nécrose thermique**, surtout si l'évapotranspiration est inefficace.

4.8. Seuils Critiques et Effets Déclencheurs

Les effets négatifs s'installent **progressivement** à partir de seuils spécifiques :

- 35–40 °C : Diminution de la photosynthèse chez de nombreuses plantes tempérées.
- 45 °C : Risques élevés de **dégâts cellulaires irréversibles**.
- Chez certaines espèces tropicales ou xérophiles, les seuils sont plus élevés, témoignant d'une **adaptation évolutive**.

La température joue un rôle déterminant dans la régulation des processus métaboliques des plantes. Une augmentation modérée de la température peut initialement stimuler certaines

fonctions physiologiques, tant que les autres ressources (notamment l'eau et les nutriments) ne deviennent pas limitantes. Cependant, au-delà d'un certain seuil thermique optimal, ces processus sont déséquilibrés et peuvent engendrer des effets délétères sur la croissance, la productivité et la survie des plantes (Sage & Kubien, 2007).

4.9 Effet des basses températures

Les **basses températures hivernales** peuvent induire deux types de stress physiologique majeurs chez les plantes :

- **Congélation intracellulaire**, causant l'**éclatement des cellules** par formation de cristaux de glace qui endommagent les membranes plasmiques.
- **Interruption de la circulation de la sève par embolies hivernales** : lorsque la sève gèle dans les vaisseaux du xylème, les gaz dissous deviennent insolubles et forment des **bulles d'air**. Lors du dégel, ces bulles s'agrandissent et bloquent le flux de sève (Tyree & Zimmermann, 2002).

Ces embolies, si elles sont fréquentes ou mal réparées, peuvent causer une **perte irréversible de conductivité hydraulique**, affectant la survie de l'arbre en période hivernale.

a). Embolie Hivernale : Un Mécanisme Déterminant dans la Répartition des Espèces

La **vulnérabilité des espèces végétales au gel** varie fortement selon leur capacité à tolérer ou éviter l'embolie hivernale. Ce phénomène physiologique explique en partie la **limitation géographique** des espèces sous climat froid.

- Les espèces des zones boréales ou montagnardes développent des **mécanismes de résistance ou de réparation des embolies**, notamment par des structures anatomiques particulières (Trifilò et al., 2014).
- À l'inverse, les espèces sensibles montrent un **dépérissement hivernal** accru en cas de gels répétés, même modérés.

b). Endurcissement Automnal et Rôle des Réserves Glucidiques

À l'approche de l'hiver, les arbres entrent dans une phase de **pré-acclimatation au froid**, appelée **endurcissement**. Ce processus repose principalement sur :

- La **transformation de l'amidon en sucres solubles** (glucose, fructose, sorbitol) dans les tissus du bois et de l'écorce.

- Ces **sucres agissent comme des cryoprotecteurs**, abaissant le point de congélation du cytoplasme et **préservant l'intégrité des membranes cellulaires** (Levitt, 1980).

Les arbres disposant de **réserves glucidiques faibles** n'arrivent pas à s'endurcir efficacement, les rendant **plus vulnérables** aux premiers froids.

c). Périodes Critiques et Sensibilité Phénologique

La **résistance maximale au gel** est généralement atteinte entre **janvier et février**, lorsque l'endurcissement est complet. Néanmoins, plusieurs **fenêtres de vulnérabilité** subsistent :

- **Gels précoces d'automne** : surviennent avant que l'arbre ne soit totalement endurci.
- **Gels tardifs de printemps** : affectent les jeunes tissus récemment débourrés, encore non lignifiés et très sensibles.
- **Cycles gel-dégel hivernaux** : fragilisent les cellules en alternant cristallisation et fonte de l'eau, ce qui augmente les risques d'éclatement cellulaire et d'embolies.

Ces phénomènes dépendent non seulement des températures extrêmes mais aussi de la **vitesse et de l'amplitude des fluctuations thermiques**, ainsi que de **l'état physiologique de la plante** au moment de l'exposition (Inouye, 2000).

d). Basses Températures du Sol : Effets sur les Racines et l'Hydraulique

Le froid du sol ralentit fortement l'**activité métabolique racinaire** :

- L'**augmentation de la viscosité de l'eau** limite son déplacement vers les racines.
- La **perméabilité membranaire** des racines est altérée, réduisant l'absorption de l'eau et des nutriments (Steponkus, 1984).
- La baisse de l'absorption conduit à une **déshydratation des tissus aériens**, aggravant les risques de dépérissement.

Une **perte de conductivité au niveau du xylème**, associée à des racines endommagées, est souvent **irréversible** en cas de gels sévères suivis de périodes sèches ou chaudes.

e). Interactions avec d'Autres Stresses Climatiques

Les épisodes de **gel-dégel** ne sont pas isolés dans leur effet. Ils peuvent **synergiser** avec :

- Des **sécheresses hivernales ou printanières** : affectent la capacité de reconstitution des tissus endommagés.
- Des **canicules estivales** : accentuent la demande hydrique des plantes, déjà affaiblies.
- La combinaison de ces stress **augmente le risque de dépérissement forestier massif**, notamment dans les zones de transition climatique (Allen et al., 2010).

5. Conséquences biogéographiques

5.1. Contraintes Thermiques et Distribution Spatiale des Espèces Végétales

La Répartition géographique des espèces est conditionnée par leurs exigences édaphique et climatique. L'augmentation des contraintes hydrique et le réchauffement auraient des répercussions varier et directe sur la photosynthèse, respiration, la croissance des plantes et affecter la saison de croissance, le changement climatique peut conduire à un changement des habitats des espèces affectant les interactions biocénétiques.

Les impacts du changement climatique sur la végétation varieront selon les régions et dépendront de plusieurs facteurs, notamment la composition des espèces, les conditions du site et le microclimat local. Ainsi, la capacité des diverses espèces de s'adapter au réchauffement climatique, perturbations telles que la prolifération des insectes et les événements climatiques extrêmes. Il devient difficile de prévoir les impacts à l'échelle régionale

La physiologie et la productivité de la végétation sont directement affectées par la température, la concentration de dioxyde de carbone (CO₂) dans l'air, la disponibilité des nutriments et le régime hydrique, et indirectement par l'effet de l'interaction interspécifique.

Il est probable que le réchauffement des températures agrandira les zones d'activité des ravageurs forestiers, raccourcira leurs cycles de prolifération et augmentera leur taux de survie.

Les insectes ont une grande mobilité et une immense capacité de reproduction Une augmentation de la température affecte pratiquement l'ensemble des processus physiologiques. La photorespiration, la respiration nocturne, la conductivité stomatique, la photosynthèse et le taux de croissance augmentent généralement avec une hausse de la température avec la disponibilité en eau.

Des épisodes de gel-dégel en hiver, de gels hâtifs à l'automne, de gels tardifs au printemps, de canicule ou de périodes prolongées sans pluie pourraient causer des dommages aux écosystèmes. Les dégâts dépendront non seulement de la température extrême, mais aussi de la durée de l'exposition, des caractéristiques des fluctuations thermiques (augmentation ou diminution, vitesse de variation et écarts entre maxima et minima de température) et de l'état physiologique de la plante au moment où se produisent ces phénomènes, les espèces sensibles au dégel, pourraient montrer des signes de dépérissement.

En automne, le réchauffement pourrait avoir un aspect positif en retardant l'apparition des premières gelées qui constituent un facteur limitant dans certaines régions pour certaines

espèces résineuses et feuillues (cèdre, douglas, peupliers) à période de croissance longue et tardive.

Paradoxalement, l'augmentation des températures en automne et en hiver pourrait rendre certaines espèces plus sensibles aux froids hivernaux. En effet la tolérance des tissus végétaux au froid (endurcissement) est conditionnée par la baisse progressive des températures en automne.

(Walther et al., 2002).

5.2. Variabilité Géographique des Réponses au Réchauffement

L'impact du réchauffement climatique sur la végétation varie selon les régions et dépend de plusieurs facteurs : composition floristique, structure d'âge des peuplements, caractéristiques du sol et microclimat local. La capacité adaptative des espèces à tolérer ou à exploiter ces nouvelles conditions thermiques devient ainsi un déterminant crucial de leur persistance ou de leur déclin (Jump & Peñuelas, 2005). Les espèces à faible plasticité thermique ou à cycle de vie long pourraient être plus vulnérables face à l'accélération du changement climatique.

5.3. Impacts Écosystémiques à Long Terme

Sur un plan écosystémique, le réchauffement peut induire des changements dans la **productivité primaire** et la **dynamique des cycles biogéochimiques**. Par exemple, une température plus élevée augmente le taux de **minéralisation** de la matière organique dans les sols, ce qui libère des nutriments à court terme, mais peut altérer durablement l'équilibre du système (Davidson & Janssens, 2006). Ces effets indirects du climat sur la **fertilité des sols** et la **compétition interspécifique** influencent fortement la résilience globale des écosystèmes.

Ces limitations physiologiques expliquent en partie :

- La **structure verticale** des forêts (ex. : hêtres plus sensibles en lisière ou en altitude).
- La **répartition altitudinale ou latitudinale** des espèces ligneuses.
- Les **changements de composition floristique** attendus sous l'effet du changement climatique, en raison du **déplacement des niches thermiques optimales**.

A). Modification des aires de culture

L'augmentation globale des températures déplace les zones de culture vers des latitudes plus élevées ou des altitudes plus importantes. Par exemple, certaines cultures traditionnellement associées aux régions tempérées, comme le maïs ou le tournesol, sont désormais viables plus

au nord qu'auparavant. Inversement, dans certaines régions tropicales ou arides, la hausse des températures rend certaines terres agricoles inadaptées à la culture, entraînant une perte de rendement.

B). Altération des cycles biologiques

La température influence fortement les phases de croissance, de floraison et de maturation des plantes. Une température trop élevée ou des périodes de chaleur prolongées peuvent accélérer certains processus (phénologie) au détriment du développement complet des fruits ou des graines. Cela peut affecter la qualité nutritionnelle ou commerciale des récoltes.

C). Stress hydrique et interactions écologiques

L'augmentation des températures s'accompagne souvent d'un stress hydrique accru, car l'évaporation est plus importante. Cela entraîne une dépendance croissante à l'irrigation et à l'eau douce, ressource déjà sous pression dans de nombreuses régions. De plus, le stress thermique peut rendre les plantes plus vulnérables aux maladies, parasites ou espèces envahissantes, dont la répartition géographique est elle aussi modifiée par le changement climatique.

D). Répercussions sur la biodiversité cultivée

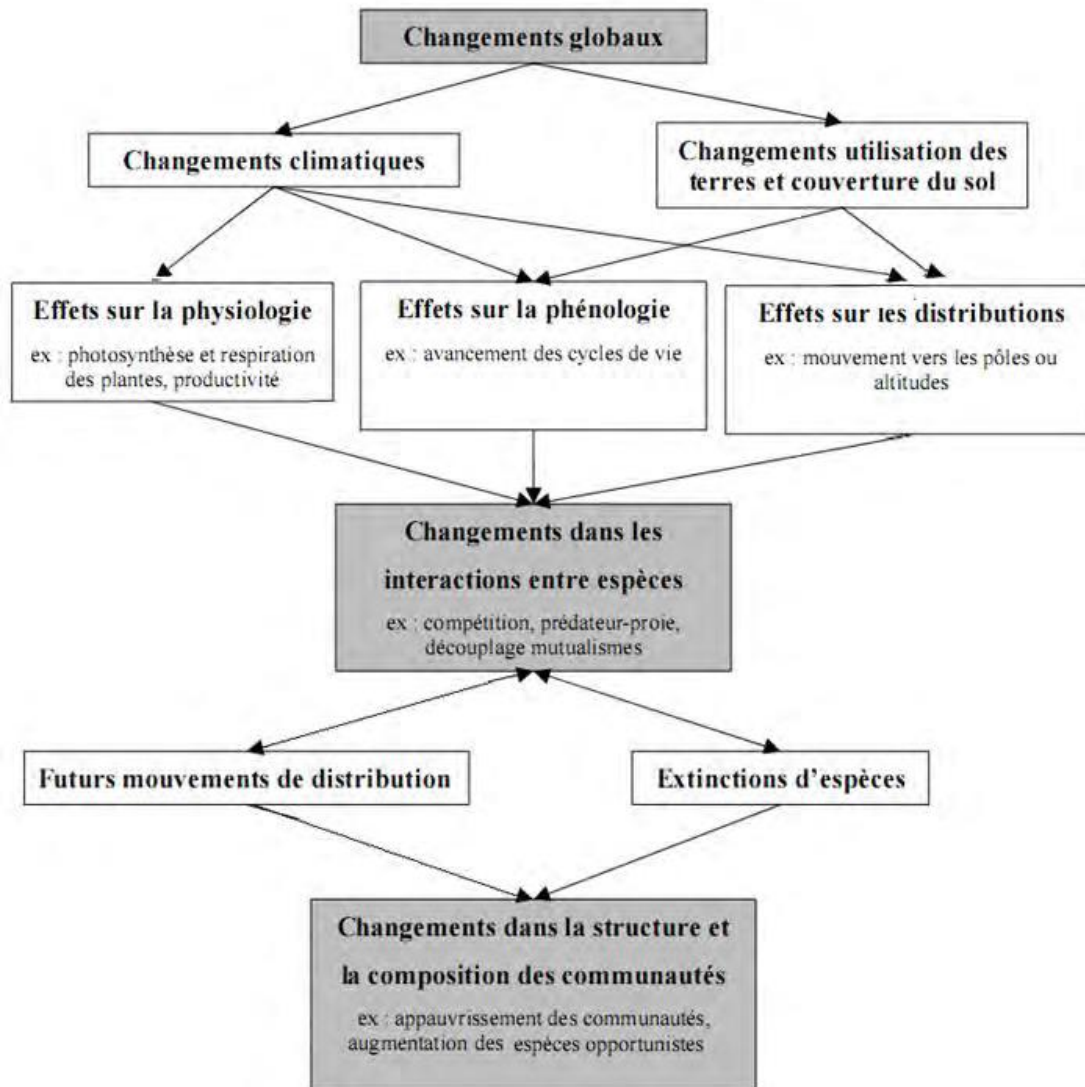
Les plantes cultivées sont souvent sélectionnées pour des conditions climatiques précises. Avec la hausse des températures, certaines variétés locales risquent de disparaître, remplacées par des variétés plus résistantes à la chaleur ou à la sécheresse. Cela peut conduire à une érosion génétique, réduisant la diversité des cultures, ce qui limite l'adaptabilité future de l'agriculture face à de nouvelles perturbations climatiques.

E). Impacts socio-économiques liés à la distribution géographique

Les régions qui voient leurs conditions de culture se dégrader peuvent souffrir d'insécurité alimentaire et de pertes économiques, en particulier les pays du Sud. À l'inverse, d'autres zones pourraient tirer avantage d'une expansion des terres cultivables, mais cela pose des défis en matière de durabilité, de conservation des écosystèmes naturels et de gestion des ressources.

La variation des températures modifie en profondeur la géographie agricole mondiale. Pour s'adapter, il est crucial de développer des stratégies agricoles résilientes : diversification des cultures, amélioration variétale, conservation de la biodiversité agricole, et pratiques

agroécologiques. Sans adaptation proactive, les conséquences pourraient être sévères, tant pour la sécurité alimentaire mondiale que pour l'équilibre écologique des régions concernées.



Effets possibles des changements globaux sur les communautés

(Les espèces peuvent répondre de trois façons provoquant un changement dans les interactions biotiques. Ces changements peuvent mener à l'extinction d'espèces ou à de possibles mouvements dans les aires de distributions, provoquant un changement dans les communautés)

Chapitre II : Le Bilan Hydrique

1. Généralités sur le Bilan Hydrique

Définition

Le **bilan hydrique** est une équation qui permet de quantifier la **disponibilité en eau** dans un compartiment donné (sol, bassin versant, plante, etc.), à partir des flux entrants (précipitations, irrigation) et sortants (évapotranspiration, drainage, ruissellement). Il exprime **l'équilibre ou le déséquilibre** hydrique sur une période donnée (journalière, saisonnière, annuelle).

Formule de base :

$$\Delta R = P - (ET + R + D)$$

Où :

- ◆ ΔR = variation de la réserve en eau du sol
- ◆ P = précipitations (ou apports en eau)
- ◆ ET = évapotranspiration (évaporation + transpiration)
- ◆ R = ruissellement
- ◆ D = drainage profond (pertes gravitaires)

Cette formule peut être adaptée à l'échelle d'un **écosystème**, d'un **champ cultivé** ou d'un **bassin versant**.

1.1. Importance du Bilan Hydrique

Le bilan hydrique est essentiel pour :

-  **Prévenir les déficits hydriques** (stress hydrique des plantes),
-  **Planifier l'irrigation** et l'aménagement des cultures,
-  **Modéliser les effets du changement climatique** sur les écosystèmes ou les agrosystèmes,
-  **Gérer les ressources en eau** (quantité et qualité),
-  **Comprendre la dynamique des forêts** dans des contextes de sécheresse prolongée.

2. Composantes du Cycle Hydrologique dans le Bilan Hydrique

Le bilan hydrique s'inscrit dans le **cycle hydrologique global**, où l'eau circule continuellement entre l'atmosphère, la surface terrestre, le sol et les nappes phréatiques. Voici ses composantes détaillées :

2.1. Précipitations (P)

- Ce sont les **apports d'eau atmosphériques** sous forme de pluie, neige, grêle ou rosée.
- Leur **variabilité spatiale et temporelle** est le principal moteur du bilan hydrique.
- Les précipitations efficaces (celles qui pénètrent dans le sol) peuvent être réduites par **l'interception végétale**.

En zones arides ou semi-arides, **la rareté et l'irrégularité** des précipitations conditionnent fortement le régime hydrique.

2.2. Interception Végétale

- Une partie des précipitations est interceptée par le feuillage, puis **évaporée directement vers l'atmosphère** sans atteindre le sol.
- Ce phénomène dépend de la **structure du couvert végétal**, de sa densité (LAI - Leaf Area Index) et de la durée des pluies.

2.3. Evaporation (E)

- Perte d'eau à partir de **surfaces libres** : sol, flaques, canopée humide, etc.
- Elle dépend de la **température, humidité, vent, rayonnement solaire** et nature du sol (albédo, rugosité).

2.4. Transpiration (T)

- Eau perdue par les **stomates** des feuilles lors des échanges gazeux.
- Étroitement liée à l'**activité photosynthétique** et à l'**état hydrique de la plante**.
- Avec l'évaporation, elle constitue l'**évapotranspiration (ET)**, une variable clé dans l'agriculture de précision.

$$ET = E + T$$

Elle peut être mesurée par des méthodes directes (chambre de transpiration, lysimètre) ou estimée par modélisation (ex. : méthode de Penman-Monteith).

2.5. Ruissellement (R)

- L'excès d'eau qui ne s'infiltre pas dans le sol s'écoule en surface, générant le **ruissellement superficiel**.
- Ce processus dépend de :
 - La **pente**,
 - La **texture et structure du sol**,
 - Le **couvert végétal**,
 - L'**intensité des précipitations**.

Un ruissellement élevé augmente l'**érosion des sols** et la perte de nutriments.

2.6. Infiltration et Stockage dans le Sol (ΔR)

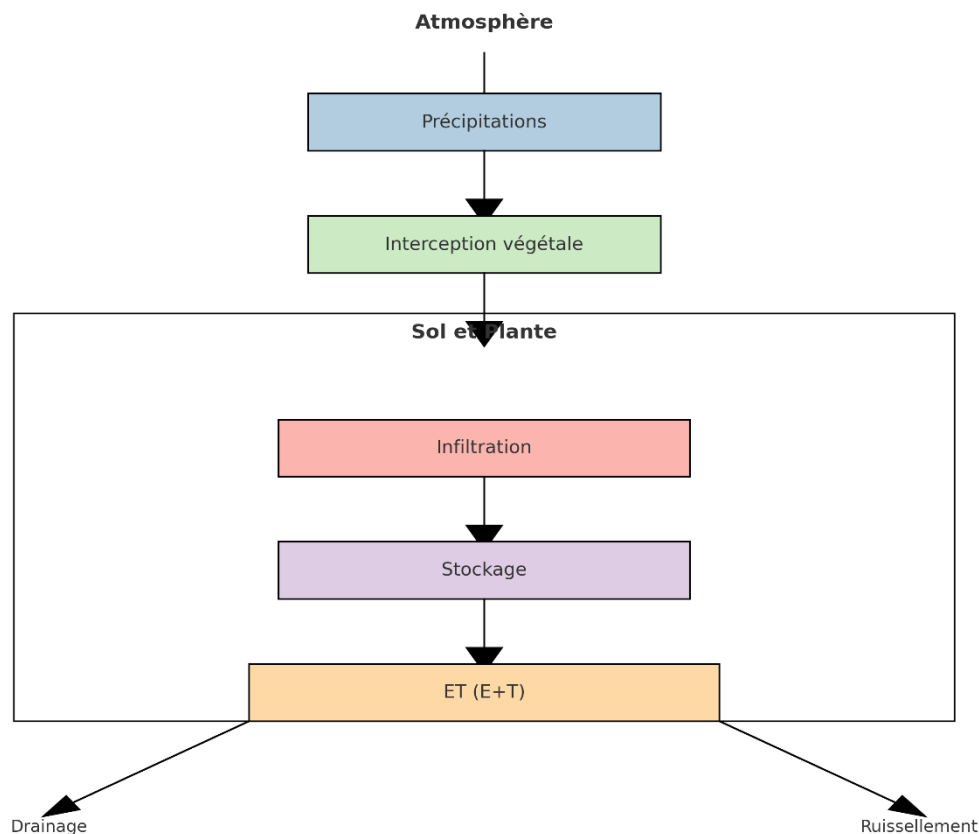
- L'eau s'infiltre dans la **zone racinaire** où elle est stockée temporairement.
- La capacité de **rétenion en eau** dépend de la **texture** (argile, limon, sable), de la **porosité du sol**, la **charge caillouteuse**, et de la **matière organique ainsi que la profondeur du sol**.

La **réserve utile** (RU) est la quantité d'eau que le sol peut stocker et rendre disponible à la plante entre les seuils de capacité au champ et point de flétrissement.

2.7. Drainage Profond (D)

- Une partie de l'eau peut percoler en profondeur sous la zone racinaire et rejoindre la **nappe phréatique**.
- Cette perte est particulièrement significative dans les sols sableux ou très humides.

Schéma Résumé du Bilan Hydrique



Bilan Hydrique et Changements Climatiques

Le bilan hydrique est **hautement sensible au changement climatique** :

- ▲ **Réchauffement** → Augmentation de l'**évapotranspiration potentielle**,
- ▼ **Précipitations irrégulières** → Baisse des apports nets,

Changements dans les régimes de ruissellement et infiltration → Modification de la recharge des nappes.

Cela conduit à une **augmentation des déficits hydriques**, affectant l'agriculture, la sylviculture et la gestion de l'eau potable.

Exemple de calcul du bilan hydrique

Cette partie est destinée à maîtriser le modèle du bilan hydrique selon la méthode de Thornthwaite,

La formule de Thornthwaite utilisée est la suivante :

$$ETP(m) = 16 * \left[\frac{10 * \bar{T}(m)}{I} \right]^a * F(m,\varphi)$$

Avec :

- ETP (m) : l'évapotranspiration moyenne du mois m (m = 1 à 12) en mm,
- T : moyenne interannuelle des températures du mois, °C
- a : $0.016 * I + 0.5$
- F(m,φ) ou K : coefficient de correction régionale.
- 9I indice thermique annuel :

$$I = \sum_{m=1}^{12} i(m) \quad i(m) = \left[\frac{\bar{T}(m)}{5} \right]^{1.514}$$

Dont :

- i (m) : indice thermique mensuel.
- T (m) : Température moyenne mensuelle.

Réserve utile maximale RUM :

Dans cette section nous avons procédé au calcul par chaque pixel de la grille la réserve en eau maximale que le sol peut retenir à travers les diverses profondeurs. La modélisation est une technique qui nous permette de calculer un tel paramètre important en prenant en compte les paramètres texturaux du sol pour chaque cellule de la grille. De ce fait, nous avons utilisé dans, ce travail, Les équations de régression linéaire de Rawls (1982), qui est estimé par la différence entre la teneur en eau du sol au champ (CC = 2.0) et le point de flétrissement (PF = 4.2). Et cela pour toutes les profondeurs du sol (Bruand et al., 2003), en prenant en compte la densité apparente du sol en la multipliant la différence précédemment citée, dans le but d'exprimer les

valeurs de la teneur en eau calculées en référence volumique (Bruand et al 1996) et en soustrayant la charge caillouteuse du sol CC.

La formule de calcul est la suivante en tenant en compte la charge caillouteuse du sol pour tous les horizons du sol :

$$RUM2 = \left(1 - \frac{\sqrt{CC}^3}{100}\right) \sum_{h=1}^H \theta_{-33kPa} - \theta_{-1500kPa} Dh$$

Dont

RUM= réserve utile Maximale du sol

CC= charge caillouteuse du sol,

W330 = teneur en eau à -330 hPa (en mm/m) qui est la capacité au champ

W15000 = teneur en eau à -15 000 hPa (en mm/m) qui est les points de flétrissements.

Dh : épaisseur de l'horizon (en m)

Pour le calcul de la teneur en eau du sol à la capacité au champ et au point de flétrissements nous avons utilisé les formules suivantes en tenant en compte les caractéristiques granulométriques du sol :

$$W330 = 257,6 - (2 \times Sa) + (3,6 \times Ar) + (29,9 \times MO)$$

$$W15000 = 26 + (5 \times Ar) + (15,8 \times MO)$$

Dont

SA : teneur en sable (en %)

Ar : teneur en argile (en %)

MO : teneur en Matière organique (en %)

Réserve utile réelle RUR :

La réserve utile réelle du sol a été calculée pour chaque mois,

La méthodologie de calcul vise à déterminer les distributions spatiotemporelles (mensuelles) de la réserve en eau réel du sol à travers toutes les profondeurs pour toutes les points (stations), en utilisant une méthode simple comme indiqué ci-dessous :

Réserve en eau réelle = quantité d'eau du sol antécédente + précipitation – (évapotranspiration + ruissellement + interception + infiltration).

Chapitre III : Les Variations climatiques

1. Le climat de la Terre

Le climat de la Terre désigne l'ensemble des conditions météorologiques moyennes observées sur de longues périodes, généralement sur plusieurs décennies voire des siècles. Il ne se limite pas à la température, mais inclut aussi les précipitations, l'humidité, la pression atmosphérique, les vents et d'autres éléments. Le climat varie selon les zones géographiques, influencé par la latitude, l'altitude, la proximité des océans et les courants marins. Par exemple, les zones équatoriales sont plus chaudes et humides, tandis que les pôles sont froids et secs. La stabilité climatique joue un rôle essentiel dans le développement des écosystèmes, de l'agriculture et, plus largement, de la civilisation humaine. Depuis des milliers d'années, le climat terrestre a connu des fluctuations naturelles, mais l'ère industrielle a marqué un tournant, avec une augmentation notable des gaz à effet de serre (GES) liés aux activités humaines. Cette perturbation anthropique modifie progressivement l'équilibre climatique, entraînant des effets globaux sur l'environnement et les sociétés.

2 - Variations climatiques constatées

Les archives climatiques naturelles, telles que les glaces polaires, les sédiments marins ou encore les cernes des arbres, montrent que le climat terrestre a toujours été marqué par des variations naturelles. Des cycles de périodes glaciaires et interglaciaires se sont succédé durant des centaines de milliers d'années. Cependant, depuis le début du XXe siècle, les mesures terrestres et satellitaires indiquent une élévation significative et rapide de la température moyenne mondiale, sans précédent à l'échelle récente de l'histoire géologique. Ce réchauffement semble s'être produit en deux grandes phases : la première de 1910 à 1945, et la seconde, plus marquée, à partir de 1976 jusqu'à aujourd'hui, séparées par une période intermédiaire de léger refroidissement.

Cette tendance au réchauffement est étroitement corrélée à l'augmentation rapide des gaz à effet de serre (GES) dans l'atmosphère, notamment le dioxyde de carbone (CO_2), le méthane (CH_4) et le protoxyde d'azote (N_2O). Depuis le début de l'ère industrielle, la composition chimique de l'atmosphère s'est modifiée de manière exceptionnelle, tant par l'ampleur des concentrations atteintes que par la rapidité des changements. Par exemple, la concentration de CO_2 est passée d'environ 270 ppm à plus de 370 ppm, et celle du méthane a presque doublé. De nouveaux composés synthétiques comme les CFC sont également apparus. Ces évolutions sont

confirmées à la fois par les analyses de carottes glaciaires et par des mesures directes menées dans un nombre croissant d'observatoires à travers le monde.

Les conséquences de ces changements se manifestent déjà : fonte accélérée des glaciers, élévation du niveau des mers, événements météorologiques extrêmes plus fréquents (canicules, sécheresses, inondations, ouragans), et perturbations importantes dans les cycles de l'eau et la répartition des précipitations.

2. Facteurs de changements climatiques

Les changements climatiques peuvent résulter de facteurs naturels comme de causes anthropiques. Historiquement, plusieurs mécanismes naturels ont influencé le climat terrestre : variations de l'orbite terrestre (cycles de Milankovitch), fluctuations de l'activité solaire, éruptions volcaniques massives, et changements dans les courants océaniques. Ces phénomènes ont contribué aux grandes transitions climatiques de l'histoire géologique, telles que les périodes glaciaires ou les phases de réchauffement naturel.

Cependant, depuis le début de l'ère industrielle, les activités humaines ont introduit un nouveau facteur de perturbation, beaucoup plus rapide et puissant. La combustion massive d'énergies fossiles (charbon, pétrole, gaz naturel) pour produire de l'électricité, faire fonctionner les transports ou alimenter l'industrie, a considérablement augmenté les émissions de gaz à effet de serre. À cela s'ajoutent la déforestation, l'agriculture intensive, l'élevage industriel et l'usage de produits chimiques comme les engrais azotés ou les CFC. Ces pratiques modifient la composition de l'atmosphère, en augmentant la concentration de gaz qui retiennent la chaleur, et en réduisant la capacité des puits naturels de carbone (forêts, océans, sols) à absorber le CO₂.

Ce dérèglement climatique d'origine humaine se distingue par sa vitesse : en quelques décennies seulement, la température moyenne mondiale a augmenté plus rapidement que lors de n'importe quelle période similaire des 800 000 dernières années. Cette accélération rend plus difficile l'adaptation des espèces et des sociétés humaines, dont les infrastructures et les systèmes de production sont souvent dépendants d'un climat relativement stable.

4. Le forçage radiatif

Le forçage radiatif est un concept clé pour comprendre les déséquilibres climatiques. Il représente la différence entre l'énergie solaire reçue par la Terre et l'énergie qu'elle renvoie vers l'espace. Ce bilan énergétique détermine si le système climatique se réchauffe ou se refroidit. Lorsque le forçage radiatif est positif, cela signifie que la Terre absorbe plus d'énergie

qu'elle n'en émet, ce qui entraîne un réchauffement. À l'inverse, un forçage négatif conduit à un refroidissement.

Les gaz à effet de serre contribuent de manière significative à un forçage radiatif positif, car ils piègent le rayonnement infrarouge émis par la surface terrestre, empêchant ainsi une partie de cette chaleur de s'échapper dans l'espace. Le CO₂, le méthane, le protoxyde d'azote et l'ozone sont les principaux responsables de ce phénomène. Par ailleurs, certains aérosols, tels que les particules soufrées issues de la combustion du charbon, ont un effet de refroidissement temporaire en réfléchissant le rayonnement solaire vers l'espace.

Depuis l'ère préindustrielle, le forçage radiatif global a fortement augmenté, ce qui explique en grande partie le réchauffement observé. Les scientifiques utilisent cette notion pour quantifier l'impact des différents facteurs (naturels et anthropiques) sur le climat et pour affiner les modèles climatiques. En d'autres termes, plus le forçage radiatif est élevé, plus l'accumulation de chaleur dans le système climatique est importante, et plus les changements climatiques risquent d'être intenses et rapides.

5. Amplifications des modifications climatiques (Mécanismes de rétroaction)

Dans le système climatique, les mécanismes de rétroaction jouent un rôle déterminant en amplifiant ou en atténuant les perturbations initiales. Les rétroactions positives accentuent le réchauffement, tandis que les rétroactions négatives tendent à le stabiliser. Actuellement, ce sont principalement les rétroactions positives qui dominent, aggravant les effets du changement climatique.

Un exemple marquant est celui de la fonte des glaces en Arctique. La disparition de la banquise diminue l'albédo – c'est-à-dire la capacité des surfaces à réfléchir la lumière solaire. Ainsi, l'océan, plus sombre, absorbe davantage de chaleur, ce qui accélère encore la fonte des glaces : un cercle vicieux. Autre rétroaction majeure : le dégel du pergélisol dans les régions nordiques libère d'importantes quantités de méthane et de CO₂, piégés dans les sols gelés depuis des millénaires. Ces gaz intensifient à leur tour l'effet de serre.

Les océans jouent aussi un rôle crucial. En temps normal, ils absorbent environ un quart du CO₂ émis par les activités humaines. Mais à mesure que les océans se réchauffent, leur capacité d'absorption diminue, et l'acidification perturbe leur équilibre chimique, affectant le phytoplancton, acteur central du cycle du carbone.

Enfin, les incendies de forêt, de plus en plus fréquents et intenses, relâchent dans l'atmosphère le carbone accumulé par la végétation, alimentant encore le réchauffement. Ces effets d'amplification rendent la dynamique climatique non linéaire et imprévisible à long terme, renforçant l'urgence d'une action climatique globale.

Chapitre V : Les conséquences du réchauffement

Le réchauffement climatique affecte profondément les écosystèmes végétaux, qu'ils soient naturels ou agricoles. L'augmentation des températures, les dérèglements pluviométriques, la multiplication des événements climatiques extrêmes et la concentration croissante de gaz à effet de serre dans l'atmosphère modifient les conditions de croissance des plantes sur tous les continents. Les saisons sont décalées, les zones climatiques se déplacent vers les pôles ou en altitude, et les périodes de floraison, de fructification et de récolte sont perturbées.

Les forêts boréales migrent lentement vers le nord, tandis que les forêts tropicales subissent des stress hydriques de plus en plus marqués. La savane grignote certaines zones forestières, et la désertification progresse dans les régions semi-arides. Pour la végétation cultivée, les impacts sont contrastés : certaines cultures peuvent temporairement bénéficier d'une hausse de CO₂ (effet fertilisant), mais les gains sont souvent annulés par la chaleur excessive, les sécheresses prolongées, les maladies ou la perte de qualité des sols. Les grands bassins agricoles (comme les Grandes Plaines nord-américaines, l'Asie du Sud, ou le sud de l'Europe) sont particulièrement exposés à des pertes de rendement.

Le bassin méditerranéen est identifié comme un **"hotspot" du changement climatique**. Cette région se réchauffe environ **20 % plus vite que la moyenne mondiale**. Les étés y deviennent plus longs, plus chauds et plus secs, tandis que les précipitations annuelles diminuent. Cela affecte la végétation naturelle méditerranéenne, comme les maquis, les forêts de chênes-lièges et les pinèdes, qui subissent une mortalité accrue, des incendies fréquents et un appauvrissement de la biodiversité.

Côté agriculture, les cultures emblématiques comme l'olivier, la vigne, les agrumes ou les céréales souffrent d'un manque croissant d'eau, de stress thermique et d'une dégradation de la fertilité des sols. La salinisation des terres côtières due à la remontée des eaux marines menace également les périmètres irrigués. Les périodes de récolte sont avancées, les rendements

deviennent irréguliers, et certaines cultures pourraient devenir non viables dans les décennies à venir sans adaptation.

Le continent africain est l'un des plus vulnérables aux effets du changement climatique, malgré sa faible contribution aux émissions mondiales de gaz à effet de serre. Le réchauffement y est rapide, et les systèmes agricoles, souvent extensifs et pluviaux, sont très sensibles aux aléas climatiques. La végétation naturelle régresse sous l'effet de la désertification, de la surexploitation des ressources (bois, pâturages) et de la sécheresse prolongée, notamment dans la bande sahélienne.

Les cultures de base comme le mil, le sorgho, le maïs, le manioc ou le riz de bas-fond connaissent des baisses de rendement récurrentes. L'insécurité alimentaire s'aggrave, notamment en Afrique de l'Ouest, de l'Est et dans la Corne de l'Afrique. Les populations rurales migrent vers les villes ou vers des zones plus humides, accentuant les pressions sociales et économiques. L'agroécologie, la gestion durable des terres et l'irrigation maîtrisée sont des pistes d'adaptation prometteuses, mais encore peu généralisées.

Le Nord de l'Algérie, qui concentre la majorité des terres agricoles et de la population, est particulièrement exposé aux effets du réchauffement climatique. Cette région méditerranéenne connaît déjà une réduction des précipitations annuelles, une augmentation de la fréquence des sécheresses et des vagues de chaleur, ainsi qu'un recul des nappes phréatiques. Ces changements climatiques affectent la **végétation naturelle** (forêts de chênes verts, maquis, cèdres de l'Atlas, etc.) par une plus grande sensibilité aux incendies, aux parasites et au manque d'eau, entraînant un déclin de la biodiversité végétale.

Sur le plan agricole, les **cultures stratégiques du Nord algérien**, comme les céréales (blé dur, orge), les arbres fruitiers (oliviers, figuiers, agrumes) et la vigne, subissent des rendements fluctuants, parfois en chute libre lors des années sèches. Les périodes de semis et de récolte sont perturbées. Le stress hydrique devient un facteur limitant majeur, surtout dans les zones de montagne et des hauts plateaux où l'irrigation est peu développée. De plus, la concurrence pour l'eau entre l'agriculture, l'industrie et les usages domestiques accentue les tensions sur la ressource.

Des solutions sont en cours d'expérimentation ou de mise en œuvre : plantation d'espèces résistantes à la sécheresse, valorisation des eaux usées traitées pour l'irrigation, techniques de conservation des sols, agriculture de précision. Mais sans une stratégie d'adaptation cohérente

à l'échelle nationale, les pertes agricoles pourraient s'aggraver, compromettant la sécurité alimentaire et la stabilité des zones rurales dans les années à venir.