



Forum forestier africain

Une plateforme pour les acteurs du secteur forestier africain



Science de base du changement climatique

UN RECUEIL DE COURS POUR LA FORMATION TECHNIQUE
DANS LE SECTEUR FORESTIER EN AFRIQUE

02





Forum forestier africain

Une plateforme pour les acteurs du secteur forestier africain

Science de base du changement climatique

**UN RECUEIL DE COURS POUR LA FORMATION
TECHNIQUE DANS LE SECTEUR FORESTIER
EN AFRIQUE**

Citation correcte: Science de base du changement climatique: Un compendium pour la formation technique en foreste

© Forum forestier africain 2019. Tous droits réservés.

Forum forestier africain
United Nations Avenue, Gigiri
B. P, 30677-00100
Nairobi, Kenya

Tél : +254 20 722 4203

Fax : +254 20 722 4001

Site Web : www.afforum.org

ISBN 978-9966-7465-2-8



Photos de la couverture : *Milicia excelsa* dans une forêt sacrée à Toffo au Sud du Bénin (à gauche), lit du fleuve Zio à Alokoegbé-kpota au Sud du Togo (au milieu), plantation privée de *Moringa oleifera* au Sud du Bénin (à droite). Crédit : Dèdéou A. Tchokponhoué

Photo de la couverture arrière : Le feuillage dense de la *Milicia excelsa* dans une forêt sacrée à Toffo au Sud du Bénin. Crédit : Dèdéou A. Tchokponhoué

Conception et mise en page : Conrad Mudibo, Ecomedia

Avertissement

Les terminologies utilisées et les données présentées dans cette publication ne sont en aucune manière l'expression d'une opinion quelconque de la part du Forum Forestier Africain sur le statut juridique ou les autorités de quelque pays, territoire ou région que ce soit, ou sur la délimitation de leurs frontières ou les limites de leur système économique ou de leur niveau de développement. Des extraits peuvent être reproduits sans autorisation, à condition que la source soit dûment citée. Les opinions exprimées dans cette publication ne reflètent pas nécessairement celles du Forum Forestier Africain.

Contents

Abréviations et acronymes	vii
Remerciements	viii
Préface	ix
Résumé exécutif	xii
Vue d'ensemble	xii

Chapitre 1 : Introduction au changement climatique 1

1.1	Comprendre les terminologies relatives au changement climatique global.....	2
1.1.1	Introduction.....	2
1.1.2	Définitions du changement climatique et des terminologies connexes	2
1.2	Les fondements de la science du climat et des cycles biogéochimiques	6
1.2.1	Introduction.....	6
1.2.2	Définition de la climatologie	6
1.2.3	Le climat de la terre.....	6
1.1.4	Cycles biogéochimiques.....	7
1.2.5	L'atmosphère	8
1.3	Systèmes météorologiques.....	11
1.3.1	Introduction.....	11
1.3.2	Zone de convergence intertropicale (ZCIT)	11
1.3.3	Température de surface de la mer (TSM)	11
1.3.4	Les moussons.....	12
1.3.5	Jet d'Est tropical	12
1.3.6	Cyclone tropical	12
1.4	Le cycle hydrologique.....	15
1.5	Éléments du changement global.....	18
1.5.1	Introduction.....	18
1.5.2	Industrialisation	18
1.5.3	Progrès technologique	19
1.6	Définition et éléments du climat	20
1.6.1	Introduction	20
1.6.2	Température.....	20
1.6.3	Précipitations	20
1.6.4	Pression.....	21
1.6.5	Vent	21
1.7	Opportunités et défis associés au changement climatique.....	22
1.7.1	Introduction.....	22
1.7.2	Opportunités associées au changement climatique.....	22
1.7.3	Politiques nationales, régionales et internationales liées au changement climatique .	23
1.7.4	Avantages de l'engagement défis.....	23
1.7.5	Les défis liés au changement climatique.....	24
1.8	Physique et chimie de l'atmosphère	27
1.8.1	Composition du gaz atmosphérique	27

1.9	Principales couches de l'atmosphère.....	29
1.10	Pollution atmosphérique	31
1.11	Physique atmosphérique et rayonnement solaire	36
1.12	Physico-chimie de l'eau.....	39
1.12.1	Réservoirs d'eau et propriétés.....	39
1.13	Pollution/qualité de l'eau.....	46
1.14	Traitement de l'eau	54
1.15	Physico-chimie des sols	58
1.15.1	Pollution du sol et remède.....	58
1.16	Dégradation et réhabilitation des terres dégradées	76
1.17	Interactions eau-terre-atmosphère.....	80
1.17.1	Terre-atmosphère : Effet de serre	80
1.18	Atmosphère-eau-végétation	82
Chapitre 2 : Preuves et causes du changement climatique.....		90
2.1	Causes des GES et effets liés au changement climatique	91
2.1.1	Introduction.....	91
2.1.2	Gaz à effet de serre.....	91
2.1.3	Dioxyde de carbone.....	91
2.1.4	Sources de gaz à effet de serre.....	92
2.1.5	Risques associés au changement climatique.....	93
2.2	Tendances et scénarios nationaux, régionaux et mondiaux du changement climatique.....	96
2.2.1	Introduction.....	96
2.2.2	La tendance moderne de la température.....	96
2.2.3	Élévation du niveau de la mer	97
Références		99
Chapitre 3 : Surveillance des changements climatiques		101
3.1	Types et sources de données	102
3.1.1	Introduction.....	102
3.1.2	Types de données.....	102
3.1.3	Sources des données	103
3.2	Méthodes de collecte des données	104
3.2.1	Introduction.....	104
3.2.2	Méthodes de collecte des données.....	104
3.3	Outils et instrumentation	106
3.3.1	Introduction.....	106
3.1.2	Outils et instruments utilisés pour enregistrer les données climatiques.....	106
3.4	Introduction à la Gestion des données, analyses descriptives et interprétation.....	115
3.4.1	Introduction.....	115
3.4.2	Gestion des données	115
3.4.3	Analyse et interprétation des données.....	116
Références		118

Chapitre 4 : Vulnérabilité et impact de changement climatique 120

4.1.	Le concept de vulnérabilité : définitions des terminologies	121
4.1.1	Introduction.....	121
4.1.2	Définitions et terminologies de la vulnérabilité aux changements climatiques	121
4.2	Vulnérabilité des systèmes biophysiques et impacts	123
4.2.1	Introduction.....	123
4.2.2	Définitions et terminologies de la vulnérabilité des systèmes biophysiques aux impacts du changement climatique	123
4.2.3	Vulnérabilité de la biodiversité aux impacts du changement climatique	124
4.2.4	Vulnérabilité des facteurs édaphiques aux impacts du changement climatique.....	124
4.3	Vulnérabilité et impacts socio-économiques et sur les moyens de subsistance.....	126
4.3.1	Introduction.....	126
4.3.2	Vulnérabilité des infrastructures et des établissements aux impacts du changement climatique	126
4.3.3	Vulnérabilité sectorielle aux impacts du changement climatique.....	127
4.4	Changement climatique et réduction des risques de catastrophe	131
4.4.1	Introduction.....	131
4.4.2	Définitions et terminologies en matière de changement climatique et de réduction des risques de catastrophes.....	131
4.4.3	Les facteurs météorologiques qui contribuent aux catastrophes.....	131
4.4.4	Stratégies de réduction des risques de catastrophes liées au changement climatique.....	132
Références	133

Chapitre 5 : Connaissances de base sur les organismes et leur milieu de vie..... 135

5.0	Comprendre les bases des sciences de la terre et de la vie	136
5.0.1	Botanique.....	136
5.1	Zoologie	144
5.2	Ecologie appliquée	154
5.3	Pédologie	162
5.4	Hydrologie.....	168
5.5	Description des écosystèmes	175
5.5.1	Écosystèmes terrestres.....	175
5.5.2	Écosystèmes aquatiques	175
5.6	L'organisation de l'écosystème.....	177
5.8	L'homme et l'écosystème.....	1849
5.9	Outils et méthodes de caractérisation des écosystèmes.....	191
5.9.1	Téledétection et systèmes d'information géographique (SIG).....	191
5.9.2	Inventaire forestier.....	191
5.9.3	Inventaire de la biodiversité.....	192
5.9.4	Description phytosociologique.....	193
5.10	Variabilité structurelle et spatiale des écosystèmes	194
5.10.1	Structure démographique horizontale.....	194
5.10.2	Structure démographique verticale.....	194

5.11	Phytogéographie	195
5.11.1	Domaines phytogéographiques.....	195
5.11.2	Districts phytogéographiques.....	196
5.12	Objectifs de suivi	198
5.13	Évaluation de l'état et de la dynamique de la biodiversité.....	199
5.13.1	Évaluation et surveillance de la biodiversité (Biomonitoring)	199
5.14	Indices de biodiversité	201
Références	204

Abréviations et acronymes

CH ₄	Méthane
CO ₂	Dioxyde de carbone
FAO	Organisation des États-Unis pour l'alimentation et l'agriculture
GES	Gaz à effet de serre
H ₂	Hydrogène
H ₂ O	Vapeur d'eau
GIEC	Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat
ZCIT	Zone de convergence intertropicale
N ₂ O	Protoxyde d'azote
ONG	Organisations non gouvernementales
NH ₄ ⁺	Ammoniac
O ₃	Ozone
OMM	Organisation Météorologique Mondiale

Remerciements

Ce compendium a été élaboré selon un processus organique qui a initialement conduit à la mise au point de «modules de formation sur l'adaptation aux changements climatiques liés aux forêts, l'atténuation de leurs effets, le commerce du carbone et le paiement d'autres services environnementaux». Ces modules ont été développés pour la formation professionnelle et technique, et pour des formations de courte durée dans les pays d'Afrique Subsaharienne. Le compendium fournit le contenu nécessaire à la mise en œuvre efficace de la formation envisagée dans les modules de formation ; en d'autres termes, il est structuré en fonction des modules de formation. Dans ce contexte, de nombreuses personnes et institutions, y compris celles du gouvernement, de la société civile, des universités, de la recherche, des entreprises, du secteur privé et d'autres communautés, ont contribué de diverses manières au processus qui a abouti à l'élaboration de ces compendiums. Nous tenons à remercier collectivement toutes ces personnes et institutions pour leurs précieuses contributions, étant donné qu'il est difficile, dans un texte aussi court, de les mentionner individuellement.

Nous apprécions également le soutien financier reçu du gouvernement suisse par l'intermédiaire de l'Agence Suisse de Développement et de Coopération (SDC) pour mettre en œuvre un projet de l'AFF sur les forêts africaines, les peuples et le changement climatique, qui a généré une grande partie des informations ayant servi de base à la rédaction de ce recueil. L'AFF est également redevable à l'Agence Suédoise de Coopération et de Développement Internationale (ASDI) pour son soutien à un autre de ses projets sur le «Renforcement de la gestion durable des forêts en Afrique» qui a également fourni des contributions, en plus d'avoir aidé à supporter les charges de plusieurs contributeurs à ce compendium. Les questions abordées par les deux projets démontrent l'intérêt des populations suisse et suédoise pour le secteur forestier africain et le changement climatique.

Nous sommes également reconnaissants envers les principaux auteurs, les contributeurs mentionnés dans ce compendium et envers l'expert pédagogique, ainsi que ceux qui ont révisé les différentes versions du compendium.

Nous espérons que le compendium contribuera à une approche plus organisée et systématique de dispenser la formation dans ce domaine, et éventuellement à une meilleure gestion des forêts africaines et des arbres hors forêt.

Préface

Les forêts et les arbres de l'Afrique soutiennent les secteurs clés de l'économie de nombreux pays africains, notamment l'agriculture et l'élevage, l'énergie, la faune, la flore sauvages et le tourisme, les ressources en eau et les moyens de subsistance. Ils sont essentiels au maintien de la qualité de l'environnement sur tout le continent, tout en fournissant des biens et services publics internationaux. Les forêts et les arbres fournissent la majeure partie de l'énergie utilisée en Afrique. Les forêts et les arbres sont donc au centre du développement socio-économique et de la protection de l'environnement du continent.

Les forêts et arbres hors des forêts en Afrique sont affectés de plusieurs façons par le changement climatique et influent à leur tour sur le climat. Par conséquent, ces forêts et arbres deviennent de plus en plus stratégiques dans la lutte contre le changement climatique. La grande diversité des types et conditions des forêts en Afrique est à la fois la force et la faiblesse du continent dans la conception de réponses optimales au changement climatique basées sur les forêts. A cet égard, étant donné le rôle des forêts et des arbres dans le développement socio-économique et la protection de l'environnement, les mesures prises pour faire face au changement climatique en Afrique doivent simultanément améliorer les moyens de subsistance des populations tributaires des forêts et la qualité de l'environnement. Il est donc nécessaire pour l'Afrique de comprendre comment le changement climatique affecte les relations entre l'alimentation, l'agriculture, l'utilisation et les sources d'énergie, les ressources naturelles (y compris les forêts et les zones boisées) et les populations en Afrique, et dans le contexte des politiques macro-économiques et des systèmes politiques qui définissent l'environnement dans lequel elles opèrent toutes. Bien que cela soit extrêmement complexe, il est essentiel de comprendre comment le changement climatique affecte ces interrelations pour pouvoir influencer le processus, le rythme, l'ampleur et la direction du développement nécessaire pour améliorer le bien-être des populations et l'environnement dans lequel elles vivent.

Au niveau du secteur forestier, le climat affecte les forêts, mais les forêts affectent aussi le climat. Par exemple, la séquestration du carbone augmente dans les forêts en croissance, un processus qui influence positivement le niveau des gaz à effet de serre dans l'atmosphère, ce qui, en retour, peut réduire le réchauffement de la planète. En d'autres termes, les forêts, en régulant le cycle du carbone, jouent un rôle vital dans le changement et la variabilité climatiques. Par exemple, le rapport spécial du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) de 2018 sur les effets d'un réchauffement climatique de 1,5°C au-dessus des niveaux préindustriels sous-estime l'importance de l'afforestation et du reboisement, de la restauration et de la séquestration du carbone des sols dans l'élimination du dioxyde de carbone. Plus précisément, dans les voies limitant le réchauffement de la planète à 1,5°C, l'agriculture, la foresterie et l'utilisation des terres (AFOLU) sont projetées avec un niveau de certitude moyen pour éliminer 0-5, 1-11 et 1-5 GtCO₂/an en 2030, 2050 et 2100, respectivement. Il y a également les co-bénéfices associés aux mesures d'élimination du dioxyde de carbone liées au secteur AFOLU, telles que l'amélioration de la biodiversité, de la qualité des sols et de la sécurité alimentaire locale. Le climat, par contre, affecte la fonction et la structure des forêts. Il est important de bien comprendre la dynamique de cette interaction pour être en mesure de concevoir et de mettre en œuvre des stratégies d'atténuation et d'adaptation appropriées pour le secteur forestier.

Entre 2009 et 2011, le Forum Forestier Africain a cherché à comprendre ces relations en rassemblant les informations scientifiques disponibles sous la forme d'un livre traitant du changement climatique dans le contexte des forêts, des arbres et des ressources fauniques en Afrique. Ce travail, qui a été financé par l'Agence Suédoise de Coopération et de Développement Internationale (ASDI), a fait ressortir des lacunes considérables dans la compréhension qu'a l'Afrique du changement climatique dans le secteur forestier, dans la manière de relever les défis et saisir les opportunités y afférentes et dans la capacité à le faire.

La contrainte la plus flagrante à laquelle l'Afrique doit faire face pour répondre au changement climatique a été identifiée comme étant le manque de moyens pour y parvenir. L'AFF reconnaît que l'établissement et l'opérationnalisation des capacités humaines sont essentiels pour une approche de solution efficace aux diverses questions liées au changement climatique, ainsi que pour améliorer la qualité du transfert de connaissances. Par exemple, les Organisations de la Société Civile, les agents de vulgarisation et les communautés locales sont des parties prenantes dans la mise en œuvre des activités d'adaptation et d'atténuation implicites dans de nombreuses stratégies de lutte contre le changement climatique. En outre, les Organisations de la Société Civile et les agents de vulgarisation sont plus susceptibles de diffuser largement les résultats de recherche pertinents aux communautés locales, qui sont et seront touchées par les effets néfastes du changement climatique. Il est donc crucial que tous les niveaux de la société soient conscients des mécanismes de réduction de la pauvreté à travers leur contribution à la résolution des problèmes environnementaux. La formation et la mise à jour des connaissances des Organisations de la Société Civile, des agents des services de vulgarisation et des communautés locales est l'une des approches logiques à cet égard. De même, le personnel professionnel et technique en foresterie et dans les domaines connexes devrait avoir des connaissances et des compétences dans ces secteurs d'activités relativement nouveaux.

C'est sur cette base que le Forum a organisé un atelier sur le renforcement des capacités et le développement des compétences en matière d'adaptation au changement climatique basée sur les forêts et d'atténuation de leurs effets à Nairobi (Kenya) en novembre 2012, qui a réuni des participants de certaines institutions universitaires, de recherche et de la société civile, ainsi que du secteur privé. L'atelier a identifié les besoins de formation sur le changement climatique pour les institutions d'enseignement et de recherche dans le domaine de la foresterie aux niveaux professionnel et technique, ainsi que les besoins de formation pour les groupes de la société civile et les agents de vulgarisation qui interagissent avec les communautés locales et aussi le secteur privé sur ces questions. Les besoins de formation recensés au cours de l'atelier ont porté sur quatre domaines principaux, à savoir la Science de changement climatique, les Forêts et l'adaptation au changement climatique, les Forêts et l'atténuation du changement climatique, et les Marchés et le commerce du carbone. Cela a servi de base aux participants à l'atelier pour élaborer des modules de formation professionnelle et technique, ainsi que des cours de courte durée pour les agents de vulgarisation et les groupes de la société civile. L'élaboration des modules de formation a impliqué la participation de 115 scientifiques venant de toute l'Afrique. Les modules de formation donnent des indications sur la façon dont la formation pourrait être organisée mais ne contiennent pas le texte nécessaire pour la formation; un besoin qui a été présenté à l'AFF par les institutions de formation et les agents concernés.

Entre 2015 et 2018, l'AFF a rassemblé 50 scientifiques africains pour élaborer le texte requis, sous forme de compendium, et de manière pédagogique. Ces travaux ont été financés en grande partie par l'Agence Suisse de Développement et de Coopération (SDC) et avec une certaine contribution de l'Agence Suédoise de Coopération et de Développement Internationale (ASDI). Au cours de cette période, huit compendiums ont été élaborés, à savoir :

1. La science de base du changement climatique : un compendium pour la formation professionnelle en foresterie africaine ;
2. La science de base du changement climatique : un compendium pour la formation technique en foresterie africaine ;
3. La science de base du changement climatique : un compendium pour les formations de courte durée en foresterie africaine ;
4. Marchés et commerce du carbone : un compendium pour la formation technique en foresterie africaine ;
5. Marchés et commerce du carbone : un compendium pour la formation professionnelle en foresterie africaine ;

6. Marchés et commerce du carbone : un compendium pour les formations de courte durée en foresterie africaine ;
7. Dialogues, processus et mécanismes internationaux sur le changement climatique : compendium pour la formation professionnelle et technique en foresterie africaine ;
8. Modélisation du climat et élaboration des scénarios : un compendium pour la formation professionnelle en foresterie africaine.

Une autre contribution notable au cours de la période 2011-2018 a été l'utilisation du module de formation sur « Les marchés et le commerce du carbone » pour renforcer les capacités de 574 formateurs de 16 pays africains sur l'évaluation rapide du carbone forestier (RaCSA), l'élaboration d'une note d'idée de projet (NIP) et d'un document descriptif de projet (DDP), l'exposition au commerce et aux marchés du carbone forestier, et le financement du carbone, entre autres. Les pays qui ont bénéficié de la formation sont : l'Éthiopie (35), la Zambie (21), le Niger (34), la Tanzanie (29), le Soudan (34), le Zimbabwe (30), le Kenya (54), le Burkina Faso (35), le Togo (33), le Nigeria (52), Madagascar (42), le Swaziland (30), la Guinée Conakry (40), la Côte d'Ivoire (31), la Sierra Leone (35) et le Liberia (39). En outre, le même module a été utilisé pour doter les petites et moyennes entreprises (PME) africaines, œuvrant dans le domaine forestier, de compétences et de connaissances sur la manière de développer et de s'engager dans le commerce du carbone forestier. A cet égard, 63 formateurs de formateurs issus des pays africains ci-après ont été formés sur le RaCSA: l'Afrique du Sud, le Lesotho, le Swaziland, le Malawi, l'Angola, la Zambie, le Zimbabwe, le Mozambique, la Tanzanie, l'Ouganda, le Kenya, l'Éthiopie, le Soudan, le Ghana, le Liberia, le Niger, le Nigeria, la Gambie, Madagascar, la République démocratique du Congo, le Cameroun, la Côte d'Ivoire, le Burkina Faso, le Gabon, la République du Congo, le Tchad, la Guinée Conakry, le Sénégal, le Mali, la Mauritanie, le Togo et le Bénin.

Une évaluation entreprise par l'AFF a confirmé que de nombreux formateurs formés sur le RaCSA font déjà bon usage des connaissances et compétences acquises de diverses manières, y compris dans l'élaboration de projets de carbone forestier bancables. En outre, de nombreuses parties prenantes ont déjà utilisé les modules de formation et les compendiums pour améliorer les programmes de leurs institutions et la manière dont l'éducation et la formation au changement climatique dans le contexte forestier sont dispensées.

L'élaboration des compendiums est donc un processus évolutif qui a vu le renforcement progressif des capacités de nombreux scientifiques africains par l'élaboration des matériels d'enseignement et de formation pour leurs institutions et le grand public. D'une certaine manière, cela a suscité l'intérêt de la fraternité forestière africaine pour renforcer progressivement la capacité d'élaborer de tels textes et éventuellement des livres dans des domaines d'intérêt pour le continent, comme moyen de compléter les informations autrement disponibles auprès de diverses sources, avec pour objectif ultime d'améliorer la compréhension de ces questions ainsi que de mieux préparer les générations présentes et futures à y faire face.

Nous encourageons donc la large utilisation de ces compendiums, non seulement à des fins d'éducation et de formation mais aussi pour accroître la compréhension des aspects du changement climatique dans la foresterie africaine par le grand public.



Macarthy Oyebo

Président du Conseil d'administration de l'AFF



Godwin Kowero

Secrétaire exécutif de l'AFF

Résumé exécutif

Vue d'ensemble

L'augmentation des émissions de gaz à effet de serre (GES) dans l'atmosphère est une préoccupation mondiale. Cela s'explique par le fait que ces émissions ont entraîné un changement de température, des conditions météorologiques imprévisibles et des précipitations sporadiques qui ont causé de graves inondations, entre autres effets néfastes. Par conséquent, de nombreux pays appliquent diverses politiques et stratégies pour aider à atténuer les changements climatiques et à s'y adapter. Il faudra pour cela comprendre les processus qui y contribuent. Ce recueil initiera donc les apprenants à la science de base du changement climatique en mettant l'accent sur la compréhension du changement global, le concept de changement climatique, les causes du changement climatique, la vulnérabilité et l'impact du changement climatique, la production de données sur le changement climatique et les dialogues, processus et mécanismes internationaux sur le changement climatique.



But

Faire comprendre aux apprenants la science de base du changement climatique et son application en foresterie et dans les secteurs connexes.



Objectifs

A la fin de ce module, les apprenants seront capables de :

- Décrire les éléments du changement global, les composantes des systèmes climatiques et les concepts du changement climatique ;
- Expliquer les causes et se familiariser avec les données sur le changement climatique ;
- Produire des données pertinentes et surveiller les changements climatiques ;
- Etablir des liens entre les concepts de vulnérabilité et de réponse aux changements climatiques ;
- Expliquer l'impact du changement climatique dans le secteur forestier et les secteurs connexes.

Chapitre 1 : Introduction au changement climatique

Aperçu du chapitre

Le changement climatique et ses conséquences figurent parmi les questions essentielles de notre époque. Il est de plus en plus considéré non seulement comme un problème de durabilité environnementale ou intergénérationnelle, mais aussi comme une préoccupation de développement. Il est aujourd'hui plus que jamais certain, sur la base de nombreuses sources de données, que l'homme modifie le climat de la Terre. L'atmosphère et les océans se sont réchauffés, ce qui s'est accompagné d'une élévation du niveau de la mer, d'une forte diminution de la glace de la mer arctique et d'autres changements liés au climat. Les preuves sont claires. Cependant, en raison de la nature de la science, tous les détails ne sont pas toujours totalement réglés ou complètement certains. De même, toutes les questions pertinentes n'ont pas encore reçu de réponse. Des preuves scientifiques continuent d'être recueillies dans le monde entier, et les hypothèses et les conclusions sur le changement climatique sont continuellement analysées et testées. Parmi les domaines de débat actif et de recherche en cours, on peut citer le lien entre la teneur en chaleur des océans et le taux de réchauffement, les xcestimations de l'ampleur du réchauffement à attendre dans l'avenir et les liens entre le changement climatique et les phénomènes météorologiques extrêmes. Ce chapitre présente donc le concept de changement climatique et les terminologies utilisées. Il explore également les bases de la science du climat, les systèmes météorologiques, les cycles hydrologiques, les éléments du changement global, la définition et les éléments du climat, en plus des opportunités et des défis associés au changement climatique.



Objectif

Donner aux apprenants des connaissances et des compétences leur permettant de faire face aux effets du changement climatique et du changement global.



Résultats d'apprentissage

- A la fin de ce chapitre, l'apprenant sera capable de :
- définir le changement global et le changement climatique
- expliquer les éléments du changement global et les répercussions sur le changement climatique

1.1 Comprendre les terminologies relatives au changement climatique global

1.1.1 Introduction

Cette session de formation présente les aspects fondamentaux de la science du changement climatique. Elle définit les concepts de changement global et de changement climatique. Elle aide à expliquer les différentes terminologies relatives au changement global et climatique.



Objectifs

- À la fin de cette session, l'apprenant sera en mesure de
- définir le changement global et le changement climatique ; et,
- expliquer les diverses terminologies utilisées dans le domaine du changement climatique et global.



Activité 1 (Remue-méninges) (20 minutes)

Qu'entendons-nous par le concept changement climatique ?

1.1.2 Définitions du changement climatique et des terminologies connexes

Climat

Le climat est généralement défini comme le « temps moyen », ou plus rigoureusement, comme la description statistique du temps en termes de moyenne et de variabilité des quantités pertinentes sur des périodes de plusieurs décennies (généralement trois décennies selon la définition de l'OMM). Ces quantités sont le plus souvent des variables de surface telles que la température, les précipitations et le vent, mais, dans un sens plus large, le « climat » est la description de l'état du système climatique.

Le changement climatique

Le changement climatique désigne tout changement important dans les mesures du climat (par exemple, la température, les précipitations ou le vent) qui dure pendant une période prolongée (des décennies ou plus). Le changement climatique peut résulter :

- des facteurs naturels, tels que les changements d'intensité du soleil ou les changements lents de l'orbite de la Terre autour du soleil ;
- des processus naturels au sein du système climatique (par exemple, les changements dans la circulation océanique) ; et
- des activités humaines qui modifient la composition de l'atmosphère (par exemple, la combustion de combustibles fossiles) et la surface des terres (par exemple, la déforestation, le reboisement, l'urbanisation, la désertification, etc.).

La variabilité du climat

La variabilité du climat fait référence aux variations de l'état moyen et d'autres statistiques (par exemple, les écarts types, l'occurrence des extrêmes, etc.) du climat à toutes les échelles temporelles et spatiales au-delà de celles des événements météorologiques individuels. La variabilité peut être due à des processus internes naturels au sein du système climatique (variabilité interne), ou à des variations non naturelles ou à un forçage externe anthropique (variabilité externe).

Déforestation

La déforestation est le processus naturel ou anthropique qui convertit des terres forestières en terres non forestières, c'est-à-dire que les pratiques ou processus qui entraînent la conversion de terres forestières à des fins non forestières sont qualifiés de déforestation. Cette situation est souvent citée comme l'une des principales causes de l'augmentation de l'effet de serre, et ce, pour deux raisons :

- La combustion ou la décomposition du bois libère du CO_2 ; et
- Les arbres qui éliminaient autrefois le CO_2 de l'atmosphère lors du processus de photosynthèse ne sont plus présents.

Désertification

Il s'agit de la dégradation des terres dans les zones arides, semi-arides et sub-humides sèches résultant de divers facteurs, notamment les variations climatiques et les activités humaines. La Convention des Nations Unies sur la lutte Contre la Désertification définit la dégradation des terres comme une réduction ou une perte, dans les zones arides, semi-arides et sub-humides sèches, de la productivité et de la complexité biologiques ou économiques des terres cultivées pluviales, des terres cultivées irriguées, des pâturages, des forêts et des terres boisées résultant de l'utilisation des terres ou d'un processus ou d'une combinaison de processus, y compris ceux qui découlent des activités humaines et des modes d'habitation, exemple, l'érosion du sol causée par le vent et/ou l'eau, la détérioration des propriétés physiques, chimiques et biologiques ou économiques du sol et la perte à long terme de la végétation naturelle.

Émissions

Il s'agit du rejet d'une substance (généralement un gaz lorsqu'on parle de changement climatique) dans l'atmosphère.



Question(s) textuelle(s) (10 minutes)

- 1) Identifier et définir les terminologies couramment utilisées dans le domaine du changement climatique.
- 2) Faire la différence entre le changement climatique et le réchauffement de la planète.

Réchauffement de la planète

Le réchauffement de la planète est l'augmentation moyenne de la température de l'atmosphère près de la surface de la Terre et dans la troposphère, qui peut contribuer à modifier les régimes climatiques mondiaux. Le réchauffement de la planète peut avoir diverses causes, tant naturelles qu'humaines. Dans l'usage courant, le « réchauffement de la planète » fait souvent référence au réchauffement qui peut se produire en raison de l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre provenant des activités humaines.

Effet de serre

Les gaz à effet de serre absorbent efficacement le rayonnement infrarouge, émis par la surface de la Terre, par l'atmosphère elle-même du fait des gaz et par les nuages. Le rayonnement atmosphérique est émis de tous les côtés, y compris vers le bas, à la surface de la Terre. Ainsi, les gaz à effet de serre emprisonnent la chaleur dans le système de la troposphère de surface. C'est ce qu'on appelle l'effet de serre.

Gaz à effet de serre (GES)

Les gaz à effet de serre sont les constituants gazeux de l'atmosphère, tant naturels qu'anthropiques, qui absorbent et émettent des rayonnements à des longueurs d'onde spécifiques dans le spectre du rayonnement infrarouge émis par la surface de la Terre, l'atmosphère et les nuages. Les gaz à effet de serre comprennent, entre autres, la vapeur d'eau, le dioxyde de carbone (CO₂), le méthane (CH₄) et l'oxyde nitreux (N₂O), les chlorofluorocarbures (CFC), les hydrochlorofluorocarbures (HCFC), l'ozone (O₃), les hydrofluorocarbures (HFC), les perfluorocarbures (PFC) et l'hexafluorure de soufre (SF₆).



Activité 2 : (Discussion de groupe) (20 minutes)

- 1) Pourquoi des modifications du climat de quelques degrés seraient-elles une source d'inquiétude ?
- 2) Comment le changement climatique va-t-il évoluer à l'avenir ?

Potentiel de réduction des gaz à effet de serre

Les réductions possibles des émissions de gaz à effet de serre (quantifiées en termes de réductions absolues ou en pourcentages des émissions de référence) qui peuvent être obtenues par l'utilisation de technologies et de mesures sont appelées potentiel de réduction des gaz à effet de serre.

Cycle hydrologique

Il s'agit du cycle dans lequel l'eau s'évapore des océans et de la surface terrestre, est transportée au-dessus de la Terre dans la circulation atmosphérique sous forme de vapeur d'eau qui se condense pour former des nuages, tombe à nouveau sous forme de précipitations, notamment sous la forme de pluie ou de neige, est interceptée par les arbres et la végétation, fournit un ruissellement à la surface terrestre, s'infiltré dans les sols, recharge les eaux souterraines, se déverse dans les cours d'eau et, finalement, s'écoule dans les océans, d'où elle finira par s'évaporer à nouveau. Les différents systèmes impliqués dans le cycle sont généralement appelés systèmes hydrologiques.

Couche d'ozone

La stratosphère contient une couche dans laquelle la concentration d'ozone est la plus élevée, la couche d'ozone. La couche s'étend sur environ 12 à 40 km. La concentration d'ozone atteint un maximum entre 20 et 25 km environ. Cette couche s'appauvrit en raison des émissions humaines de composés de chlore et de brome. Chaque année, au printemps de l'hémisphère sud, la couche d'ozone s'appauvrit fortement au-dessus de l'Antarctique ; cela est également dû au chlore et au brome produits par l'homme.

Substance appauvrissant la couche d'ozone (SAO)

C'est une famille de composés artificiels qui comprend, sans s'y limiter, les chlorofluorocarbures (CFC), les bromofluorocarbures (halons), le méthylchloroforme, le tétrachlorure de carbone, le bromure de méthyle et les hydrochlorofluorocarbures (HCFC). Il a été démontré que ces composés appauvrissent l'ozone stratosphérique et sont donc généralement appelés SAO.

Séquestration

C'est le processus d'augmentation de la teneur en carbone d'un réservoir de carbone autre que l'atmosphère, c'est-à-dire le stockage du carbone dans des réservoirs terrestres ou marins. La séquestration biologique comprend l'élimination directe de CO₂ de l'atmosphère par le changement d'affectation des terres, l'afforestation, le reboisement, le stockage du carbone dans les décharges et les pratiques qui améliorent le carbone du sol en agriculture.

Éviers

Il s'agit de tout processus, activité ou mécanisme qui élimine de l'atmosphère un gaz à effet de serre ou un aérosol, ou un précurseur d'un gaz à effet de serre ou d'un aérosol.

Météo

Condition atmosphérique à un moment ou à un endroit donné. Elle est mesurée en termes de vent, de température, d'humidité, de pression atmosphérique, de nébulosité et de précipitations. Dans la plupart des endroits, la météo peut changer d'heure en heure, de jour en jour et de saison en saison. Le climat au sens étroit est généralement défini comme le « temps moyen », ou plus rigoureusement, comme la description statistique en termes de moyenne et de variabilité des quantités pertinentes sur une période de temps allant de quelques mois à des milliers ou des millions d'années. La période classique est de 30 ans, telle que définie par l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM). Ces quantités sont le plus souvent des variables de surface telles que la température, les précipitations et le vent.

Le climat au sens large est l'état, incluant une description statistique, du système climatique. Une façon simple de se rappeler la différence est que le climat est ce à quoi on s'attend (par exemple, des hivers froids) et que le « temps » est ce que l'on obtient (par exemple., un blizzard).

Adaptation

Initiatives et mesures visant à réduire la vulnérabilité des systèmes naturels et humains face aux effets du changement climatique. Les différents types d'adaptation sont, par exemple, anticipatoires et réactives, privées et publiques, et autonomes et planifiées. Des exemples sont le rehaussement de digues fluviales ou côtières, la substitution de plantes plus résistantes aux chocs thermiques pour les plantes sensibles, etc.



Source : <http://nimbuseco.com/2013/01/deforestation-and-pollution-facts/>

Étudiez attentivement la figure ci-dessus et réalisez les activités suivantes :

- Décrivez l'activité réalisée dans la photographie ; et
- Expliquez la relation entre le changement climatique et l'activité illustrée dans la photographie.



Résumé

Au cours de cette séance, nous avons discuté des termes et des terminologies associés au changement climatique. Dans la prochaine session, nous parlerons des fondements de la science du climat et le cycle biogéochimique.

1.2 Les fondements de la science du climat et des cycles biogéochimiques

1.2.1 Introduction

Cette session de formation présente les fondements des cycles biogéochimiques de la science du climat. Nous y aborderons plus en détail les bases de la science du climat et des cycles biogéochimiques.



Objectifs

À la fin de cette session, l'apprenant sera en mesure de

- décrire les bases de la science du climat ;
- expliquer le climat des composantes terrestres du système climatique ; et,
- expliquer la composition et la structure de la couche de l'atmosphère.



Activité 1 : Remue-ménages (20 minutes)

Pourquoi le changement climatique se produit-il ?

1.2.2 Définition de la climatologie

La climatologie est l'étude scientifique du climat. Le climat d'un lieu peut être défini comme les conditions météorologiques moyennes obtenues par la synthèse des éléments météorologiques qui y règnent depuis une période de 30 à 35 ans. La météo, par contre, est définie par la condition atmosphérique d'un lieu ou d'un endroit donné à un moment donné.

Les éléments météorologiques à un endroit et à un moment précis sont l'ensoleillement, la température, la pression, les précipitations, l'humidité, l'évaporation, les conditions de vent, etc. Ainsi, les climatologues cherchent à comprendre le fonctionnement du système climatique mondial, ses variations dans le temps et dans l'espace, et toute utilisation qui peut être faite des ressources fournies par le climat.

La météo et le climat s'expliquent par le même élément en combinaison, mais la météo et le climat ne sont pas les mêmes. Le climat se rapporte à une région sur une longue période tandis que la météo se rapporte à un lieu et à un moment précis. En d'autres termes, la météo est une condition instantanée de l'atmosphère et elle change tout le temps, mais le climat d'une région est assez constant sur une période de temps.

1.2.3 Le climat de la terre

La Terre a différents climats : tropical ou chaud, tempéré et froid.

Climats tropicaux ou chauds

- Climat équatorial : températures élevées (plus de 23°C) et précipitations abondantes.
- Climat tropical humide : températures élevées (plus de 20°C) et précipitations abondantes. Il y a une saison sèche en hiver et une saison humide en été.
- Climat tropical sec : températures douces en hiver et chaudes en été (plus de 18°C) Les précipitations sont rares.
- Climat chaud et désertique : températures élevées (plus de 20°C). Les précipitations sont très rares.

Climats tempérés

- Climat méditerranéen : températures douces en hiver et chaudes en été. Les précipitations sont variables. L'été est très sec.
- Climat sub-tropical humide : températures similaires au climat méditerranéen. Précipitation abondante, surtout en été.
- Climat maritime : températures douces en hiver et fraîches en été. De fortes précipitations tout au long de l'année.
- Climat continental : les températures sont très froides en hiver et chaudes en été. Il pleut surtout en été.

Climats froids

- **Climat polaire** : température très basse (pas plus de 0°C). Les précipitations sont très rares.
- **Climat alpin** : les températures baissent avec l'altitude. Les hivers sont froids et les étés frais. Les précipitations augmentent avec l'altitude.



Questions textuelles (30 minutes)

- 1) Définissez les concepts de climat et climatologie.
- 2) Faites la différence entre la météo et le climat.

1.1.4 Cycles biogéochimiques

En écologie, un cycle biogéochimique est un circuit ou une voie par laquelle un élément chimique ou une molécule se déplace dans les compartiments biotiques et abiotiques d'un écosystème. En effet, l'élément est recyclé, bien que dans certains de ces cycles, il puisse y avoir des lieux où l'élément est accumulé pendant une longue période. Tous les éléments chimiques présents dans les organismes font partie de cycles biogéochimiques. Les cycles biogéochimiques impliquent les flux d'éléments chimiques entre les différentes parties de la Terre : du vivant au non-vivant, de l'atmosphère à la terre et à la mer, et des sols aux plantes.

Ils sont appelés «cycles» parce que la matière est toujours conservée et parce que les éléments se déplacent vers et depuis les grands bassins par le biais de divers flux bidirectionnels, bien que certains éléments soient stockés dans des lieux ou sous des formes qui sont différemment accessibles aux êtres vivants. Les activités humaines ont mobilisé les éléments de la Terre et accéléré leurs cycles - par exemple, elles ont plus que doublé la quantité d'azote réactif qui a été ajoutée à la biosphère depuis l'époque préindustrielle.

L'azote réactif est tout composé azoté biologiquement, chimiquement ou radioactivement actif, comme l'oxyde nitreux et l'ammoniac, mais pas l'azote gazeux (N₂). Les activités humaines entraînent des modifications des cycles biogéochimiques à l'échelle mondiale, qui ont des répercussions et des implications actuelles et futures. Les émissions mondiales de CO₂ sont le principal facteur du changement climatique d'origine humaine. Mais les cycles accélérés par l'homme d'autres éléments, tels que l'azote, le phosphore et le soufre, influencent également le climat. Ils peuvent influencer directement sur le climat ou agir comme des facteurs indirects qui modifient le cycle du carbone, amplifiant ou réduisant les effets du changement climatique. Le changement climatique a et continuera d'avoir des répercussions sur les cycles biogéochimiques, ce qui modifiera les répercussions futures sur le climat et affectera notre capacité à faire face aux modifications couplées du climat, de la biogéochimie et d'autres facteurs.

Les cycles biogéochimiques impliquent toujours des états d'équilibre : Un équilibre dans le cycle de l'élément entre les compartiments. Toutefois, l'équilibre global peut impliquer des compartiments répartis à l'échelle globale.

Les cycles biogéochimiques qui présentent un intérêt particulier en écologie sont les suivants : les cycles de l'azote, de l'oxygène, du carbone, du phosphore, du soufre, de l'eau et de l'hydrogène.



Questions textuelles (30 minutes)

Rédigez de brèves notes sur les points suivants :

- 1) Le cycle de l'hydrogène ;
- 2) Le cycle du carbone ;
- 3) Le cycle de l'azote ; et,
- 4) Le cycle du phosphore.

1.2.5 L'atmosphère

Le terme atmosphère fait référence à l'enveloppe gazeuse qui entoure la terre. On pense qu'elle s'est développée il y a quelques millions d'années et qu'elle conserve encore sa forme et sa composition actuelles grâce à des processus chimiques et photochimiques combinés à des taux d'échappement différentiels du champ gravitationnel de la Terre.

Composée d'un mélange de divers gaz, de vapeur d'eau et d'aérosols, l'atmosphère est retenue contre la terre par la force gravitationnelle de la terre et elle est plus dense au niveau de la mer et s'amincit rapidement vers le haut. En général, l'atmosphère est très oxydée et contient très peu d'hydrogène. Les constituants les plus importants de l'air dans l'atmosphère terrestre sont l'azote et l'oxygène. L'atmosphère contribue à protéger toutes les formes de vie contre les rayonnements nocifs du soleil et son contenu gazeux assure la subsistance des plantes et des animaux.

Composition de l'atmosphère

Bien que certains gaz, tels la vapeur d'eau et l'ozone, soient très variables, l'atmosphère est bien mélangée et sa composition est constante dans la couche inférieure appelée homosphère. Aux niveaux supérieurs, l'Hétérosphère, il y a peu de mélange et la séparation diffusive a tendance à avoir lieu jusqu'à environ 100 km. En général, la composition de l'atmosphère change avec la hauteur au-dessus du niveau de la mer. La vapeur d'eau est limitée entre 10-12 km alors qu'à des niveaux plus élevés, l'oxygène et les constituants mineurs, comme CO_2 , sont dissociés par le rayonnement ultraviolet solaire. Les constituants non gazeux sont concentrés dans la couche inférieure de l'atmosphère. Les composants non gazeux sont des aérosols tels que les particules de poussière, la fumée, la matière organique, le sel marin et les sous-produits du feu et de l'industrie, comme le carbone, le dioxyde de soufre, le monoxyde de carbone et le plomb. Les aérosols sont si légers que même de petits mouvements d'air peuvent les soutenir. La poussière, le sel, le carbone, le soufre, le plomb et les composés d'aluminium sont les plus abondants dans les aérosols.

Tableau 1. La composition de l'Atmosphère

Constituants	Formule chimique	Volume (%) d'air sec
Azote	N ₂	78.08
Oxygène	O ₂	20.95
Argon	Ar	0.93
Dioxyde de carbone	CO ₂	0.036
Vapeur d'eau	H ₂ O	0-4
Ozone	O ₃	0.000004
Néon	Ne	0.0018
Hélium	Il	0.0005
Hydrogène	H ₂	0.00005
Méthane	CH ₄	0.00017
Oxyde nitreux	N ₂ O	0.00003

Source : Pidwirny (2006)

Activité 2 : (Discussion de groupe) (20 minutes)

Que nous disent les changements de la structure verticale de la température atmosphérique - de la surface jusqu'à la stratosphère - sur les causes du récent changement climatique ?

La structure stratifiée de l'Atmosphère

En général, l'atmosphère peut être divisée en un total de quatre couches. Ce sont la troposphère, la stratosphère, la mésosphère et la thermosphère, qui peuvent être subdivisées en ionosphère et exosphère. Trois d'entre elles sont des couches relativement chaudes (les couches près de la surface entre 50 et 60 km, et une au-dessus à 120 km) et les deux autres qui séparent les couches plus chaudes sont relativement froides (entre 10 et 30 km, et environ 80 km). La figure 1 montre la disposition de ces couches dans l'atmosphère.

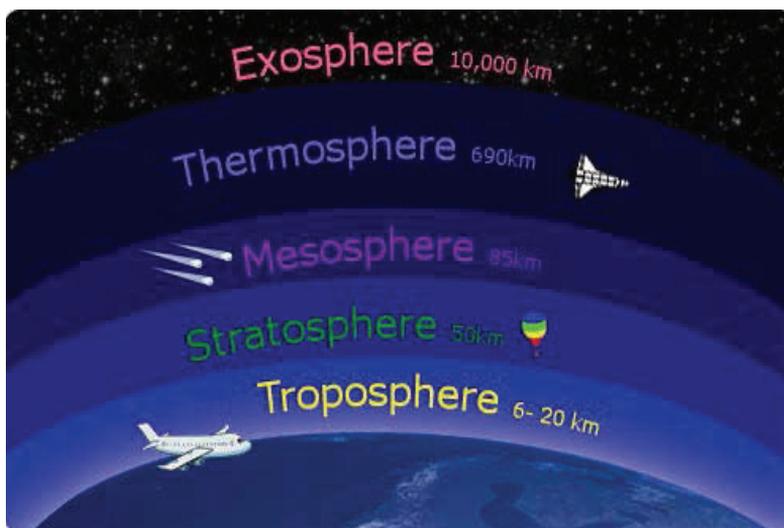


Figure 1. Les couches de l'atmosphère

Source : <http://reedsclassblog.blogspot.com/2014/10/layers-of-atmosphere.html>

La troposphère est à 20 km d'altitude. C'est là que se produisent la pluie, la neige et d'autres phénomènes météorologiques.

La stratosphère est à une altitude de 10 à 50 km. Elle contient la couche d'ozone, qui empêche les rayons ultraviolets nocifs du Soleil d'atteindre la surface de la Terre.

La mésosphère se trouve à une altitude de 50 à 80 km.

La thermosphère est entre 80-500 km d'altitude. Dans cette couche, les températures peuvent atteindre 1000 °C.



Questions de l'exercice (30 minutes)

- 1) Dans quelle mesure les scientifiques sont-ils convaincus que la terre se réchauffera davantage au cours du XXI^e siècle ?
- 2) Quels sont les éléments météorologiques ?
- 3) Quels sont les constituants atmosphériques les plus préoccupants et pourquoi ?



Résumé

Au cours de cette séance, nous avons discuté du climat de la terre et de l'atmosphère, de sa composition et de sa structure en couches. Au cours de la prochaine session, nous parlerons des systèmes météorologiques.

1.3 Systèmes météorologiques

1.3.1 Introduction

Cette session de formation présente les différents systèmes météorologiques. Nous y aborderons plus en détails les systèmes météorologiques.



Objectif

A la fin de cette session, l'apprenant devrait être capable d'expliquer les différents systèmes météorologiques.



Activité 1 : Remue-méninges (20 minutes)

Comment le changement climatique va-t-il évoluer à l'avenir ?

1.3.2 Zone de convergence intertropicale (ZCIT)

La zone de convergence intertropicale, que les marins appellent le Pot au Noir, est la zone encerclant la terre près de l'équateur où les alizés du Nord-Est et du Sud-Est se rencontrent. Elle apparaît comme une bande de nuages, généralement des orages. Dans l'hémisphère Nord, les alizés se déplacent vers le Sud-Ouest en provenance du Nord-Est, alors que dans l'hémisphère sud, ils se déplacent vers le Nord-Ouest en provenance du Sud-Est. Lorsque la ZCIT est positionnée au Nord ou au Sud de l'équateur, ces directions changent en fonction de l'effet de Coriolis provoqué par la rotation de la terre. Par exemple, lorsque la ZCIT est située au nord de l'équateur, l'alizé du Sud-Est se transforme en un vent du Sud-Ouest lorsqu'il traverse l'équateur. La ZCIT est formée par un mouvement vertical, en grande partie sous forme d'activité convective d'orages provoqués par le réchauffement solaire, qui attire effectivement l'air, ce qu'on appelle les alizés. L'emplacement de la ZCIT varie dans le temps.

La variation de l'emplacement de la ZCIT affecte considérablement les précipitations dans de nombreuses nations équatoriales, ce qui se traduit par des saisons humides et sèches sous les tropiques plutôt que par des saisons froides et chaudes dans les hautes terres. Des changements à plus long terme dans la ZCIT peuvent entraîner de graves sécheresses ou des inondations dans les zones voisines.



Questions textuelles (30 minutes)

- 1) Quel est le climat à l'équateur, et pourquoi ?
- 2) Décrivez les caractéristiques de ce que :
 - a) L'air froid produit.
 - b) L'air chaud produit.

1.3.3 Température de surface de la mer (TSM)

La température de surface de la mer (TSM) est la température de l'eau proche de la surface de l'océan. Des zones localisées de neige abondante peuvent se former en bandes sous le vent des masses d'eau chaude au sein d'une masse d'air par ailleurs froide.

On sait que les températures chaudes à la surface des mers sont une cause de la cyclogenèse tropicale au-dessus des océans de la Terre. Il y a moins de variation de la TSM les jours de brise en comparaison aux jours calmes. De plus, les courants océaniques tels que l'oscillation multidécennale de l'Atlantique (OMA), peuvent affecter les TSM sur des échelles de temps multidécennales, un impact majeur résultant

de la circulation thermo-haline globale, qui affecte la TSM moyenne de façon significative dans la plupart des océans du monde. Les TSM côtières peuvent provoquer des vents de terre générant des remontées d'eau, qui peuvent refroidir ou réchauffer les masses terrestres avoisinantes. La température de surface de la mer affecte le comportement de l'atmosphère terrestre au-dessus. Si la température de surface de la mer est importante pour la cyclogenèse tropicale, elle est également importante pour déterminer la formation du brouillard marin et des brises de mer. La chaleur des eaux chaudes sous-jacentes peut modifier considérablement une masse d'air sur des distances aussi courtes que 35 km à 40 km.

1.3.4 Les moussons

Les moussons sont des brises de mer à grande échelle qui se produisent lorsque la température sur terre est sensiblement plus chaude ou plus froide que la température de l'océan. Ces déséquilibres se produisent parce que les océans et la terre absorbent la chaleur de différentes façons. Les moussons sont utilisées pour décrire les changements saisonniers de la circulation atmosphérique et des précipitations associés au réchauffement asymétrique de la terre et de la mer. Habituellement, le terme mousson est utilisé pour désigner la phase pluvieuse d'un régime saisonnier changeant, bien que techniquement il y ait aussi une phase sèche. Les principaux systèmes de mousson du monde sont les moussons d'Afrique de l'Ouest et d'Asie-Australie. L'impact de la mousson sur la météo locale est différent d'un endroit à l'autre. Dans certaines localités, il y a juste une probabilité d'avoir un peu plus ou un peu moins de pluie. Dans d'autres lieux, les quasi-déserts sont transformés en prairies d'un vert vif où les plantes et les cultures peuvent s'épanouir.

La mousson indienne transforme une grande partie de l'Inde, d'une sorte de semi-désert en terres vertes. Dans des endroits comme celui-ci, il est crucial que les agriculteurs aient le bon timing pour mettre les semences sur les champs, car il est essentiel d'utiliser toute la pluie disponible pour les cultures.

1.3.5 Jet d'Est tropical

Le jet d'Est tropical est le terme météorologique désignant un vent d'Est en altitude qui commence à la fin Juin et se poursuit jusqu'au début Septembre. Le plus fort développement du jet se situe à environ 15 km au-dessus de la surface de la Terre avec des vents atteignant 40 m/s au-dessus de l'océan Indien. Le jet d'Est est une région de la basse troposphère au-dessus de l'Afrique de l'Ouest où la vitesse moyenne saisonnière des vents est maximale et provient de l'Est. Le jet se dirige vers le Nord à partir de sa position méridionale en Janvier, atteignant sa latitude la plus au Nord en Août et ses vents les plus forts en Septembre, tout en revenant vers l'équateur. Dans le jet d'Est, des ondes tropicales se forment. On considère que le courant-jet africain de basse altitude et provenant de l'Est joue un rôle crucial dans la mousson du Sud-Ouest de l'Afrique et contribue à la formation des vagues tropicales qui traversent les océans tropicaux de l'Atlantique et du Pacifique Est pendant la saison chaude.



Activité 2 : (Discussion de groupe) (20 minutes)

Évaluer la relation entre la météo et les catastrophes naturelles.

1.3.6 Cyclone tropical

Un cyclone tropical est un système de tempête caractérisé par un grand centre de basse pression et de nombreux orages qui produisent des vents forts et des pluies abondantes. Les cyclones tropicaux se nourrissent de la chaleur dégagée par la montée de l'air humide, ce qui entraîne la condensation de la vapeur d'eau contenue dans l'air humide. Ils sont alimentés par un mécanisme thermique différent

de celui des autres tempêtes cycloniques, par exemple les tempêtes européennes et les dépressions polaires, ce qui les classe dans la catégorie des systèmes de tempêtes à « noyau chaud ». Les cyclones tropicaux prennent naissance dans le pot au noir près de l'Equateur, à environ 10° de distance. Le terme « tropical » désigne à la fois l'origine géographique de ces systèmes, qui se forment presque exclusivement dans les régions tropicales, et leur formation dans les masses d'air tropical maritime. Le terme « cyclone » fait référence à la nature cyclonique de ces tempêtes, avec une rotation dans le sens contraire des aiguilles d'une montre dans l'hémisphère nord et dans le sens des aiguilles d'une montre dans l'hémisphère sud. Selon son emplacement et son intensité, un cyclone tropical peut être désigné par des noms tels que « ouragan », « typhon », « tempête tropicale », « tempête cyclonique », « dépression tropicale » ou simplement « cyclone ».



Questions de l'exercice (30 minutes)

Pour chaque question ci-dessous, sélectionnez la bonne réponse.

- 1) La force du vent est dépendante de :
 - A. Le mouvement vertical de l'air ;
 - B. Les différences de pression d'air ;
 - C. Le mouvement horizontal de l'air ; ou,
 - D. La quantité d'attraction gravitationnelle.

- 2) Les lignes sur une carte de surface qui montrent des zones de température égale sont appelées :
 - A. des isobars ;
 - B. des thermobars ;
 - C. des températures ; ou,
 - D. des isothermes

- 3) L'instrument utilisé pour mesurer la pression atmosphérique est appelé:
 - A. baromètre ;
 - B. thermomètre ;
 - C. anémomètre ; ou,
 - D. girouette.

- 4) Les vents globaux qui influencent le plus la météo aux États-Unis sont les:
 - A. alizés ;
 - B. vents d'Est polaires ;
 - C. vents d'Ouest ; ou,
 - D. calme plat.

- 5) Les brises de mer se produisent pendant le ? et produisent des vents qui se déplacent ?
 - A. de nuit / sur l'eau ;
 - B. nuit / sur la terre ;
 - C. jour / sur l'eau ; ou,
 - D. jour / sur la terre.

- 6) On appelle les courants d'air ascendants et descendants qui résultent du réchauffement irrégulier de l'air :
 - A. les courants de conduction ;
 - B. les courants de convection ;
 - C. les courants de rayonnement ; ou,
 - D. les vents.

- 7) Le changement des vents globaux (à droite dans l'hémisphère nord) résultant de la rotation de la Terre est appelé le :
- A. Principe de Bernouli ;
 - B. Jetstream ;
 - C. El Nino ; ou,
 - D. Effet de Coriolis.
- 8) Les vents sont nommés en fonction de :
- A. la direction vers laquelle ils soufflent ;
 - B. la direction d'où ils soufflent ;
 - C. leur vitesse ; ou,
 - D. leur origine.
- 9) Quel est le mouvement de l'air autour du centre d'un système à HAUTE pression ?
- A. vers le bas, vers l'extérieur et dans le sens des aiguilles d'une montre ;
 - B. vers le bas, vers l'intérieur et dans le sens inverse des aiguilles d'une montre ;
 - C. vers le haut, vers l'extérieur et dans le sens des aiguilles d'une montre ; ou,
 - D. vers le haut, vers l'intérieur et dans le sens inverse des aiguilles d'une montre.



Résumé

Dans cette session, nous avons parlé des types de systèmes météorologiques : comment ils se manifestent et leurs effets sur l'environnement. Dans la prochaine session, nous parlerons du cycle hydrologique.

1.4 Le cycle hydrologique

Cette session de formation présente le cycle hydrologique du système terrestre. Nous y aborderons les étapes du cycle hydrologique et examinerons ensuite les différences qui peuvent être rencontrées au sein du cycle de l'eau sur différents types d'îles.



Objectif

A la fin de cette session, l'apprenant devrait être capable d'expliquer les différentes étapes du cycle hydrologique.



Activité 1 : Remue-méninges (20 minutes)

Comment le climat affectera-t-il le cycle hydrologique à l'avenir ?

L'eau est la chose la plus précieuse sur notre planète. Elle permet à la vie d'exister. Et l'eau elle-même peut sembler vivante : elle est toujours en mouvement. Année après année, l'eau tombe, s'écoule dans les rivières et se déverse dans l'océan. L'océan n'est jamais plus grand. Pourquoi ? C'est parce que l'eau dans la nature est continuellement recyclée. On appelle cela le cycle hydrologique ou simplement, le cycle de l'eau.

Le cycle hydrologique est la circulation continue de l'eau dans l'hydrosphère de la Terre, et est dirigé par le rayonnement solaire. L'hydrosphère comprend l'atmosphère, le sol, les eaux de surface et les eaux souterraines. Au fur et à mesure que l'eau se déplace dans le cycle, elle change d'état entre les phases liquide, solide et gazeuse. L'eau se déplace dans différents réservoirs, notamment les océans, l'atmosphère, les eaux souterraines, les rivières et les glaciers, par les processus physiques d'évaporation (y compris la transpiration des plantes), de sublimation, de précipitation, d'infiltration, de ruissellement et d'écoulement souterrain. La quantité totale, ou masse, d'eau dans le cycle de l'eau reste essentiellement constante, tout comme la quantité d'eau dans chaque réservoir du cycle de l'eau. Cela signifie que le débit d'eau ajouté à un réservoir doit être égal, en moyenne et dans le temps, au débit d'eau sortant du même réservoir. Le plus grand réservoir est l'océan, qui représente 97% de l'eau de la Terre. La deuxième plus grande quantité (2 %) est stockée sous forme solide dans les calottes glaciaires et les glaciers. L'eau contenue dans tous les organismes vivants représente le plus petit réservoir. Les volumes d'eau dans les réservoirs d'eau douce, en particulier ceux qui sont disponibles pour l'usage humain, sont des ressources en eau importantes.



Questions textuelles (30 minutes)

- 1) Qu'est-ce qui transforme l'eau sur la terre en vapeur dans le cycle hydrologique ?
- 2) Dans le cycle de l'eau, comment appelle-t-on le fait que l'eau remonte à travers une plante et se transforme en vapeur ?
- 3) Comment appelle-t-on l'eau qui s'infiltré dans le sol.
- 4) En étudiant le cycle de l'eau, où se trouve l'eau la plus pure sur terre ?

Le temps de séjour d'une molécule d'eau dans un réservoir particulier varie grandement, de l'ordre de quelques secondes à des heures et des jours (comme dans l'évaporation des précipitations) à des échelles de temps beaucoup plus longues de plusieurs milliers d'années. L'eau souterraine peut passer plus de 10 000 ans sous terre avant de partir, et l'eau de l'océan peut être de l'ordre de mille ans. Le cycle hydrologique commence par l'évaporation de l'eau de la surface de l'océan. Lorsque l'air humide est soulevé, il se refroidit et la vapeur d'eau se condense pour former des nuages. L'humidité est transportée

autour du globe jusqu'à ce qu'elle retourne à la surface sous forme de précipitations. Une fois que l'eau atteint le sol, l'un des deux processus suivants peut se produire :

- une partie de l'eau peut s'évaporer à nouveau dans l'atmosphère ; ou
- l'eau peut pénétrer la surface et devenir de l'eau souterraine.

L'eau souterraine s'écoule dans les océans, les rivières et les ruisseaux, ou est relâchée dans l'atmosphère par transpiration. Le reste d'eau qui demeure à la surface de la terre, ruisselle pour se déverser dans les lacs, les rivières et les ruisseaux et est ramené vers les océans, où le cycle recommence.



Activité 2 : (Discussion de groupe) (20 minutes)

Discutez des changements qu'une goutte d'eau subit lors de son passage dans le cycle hydrologique.

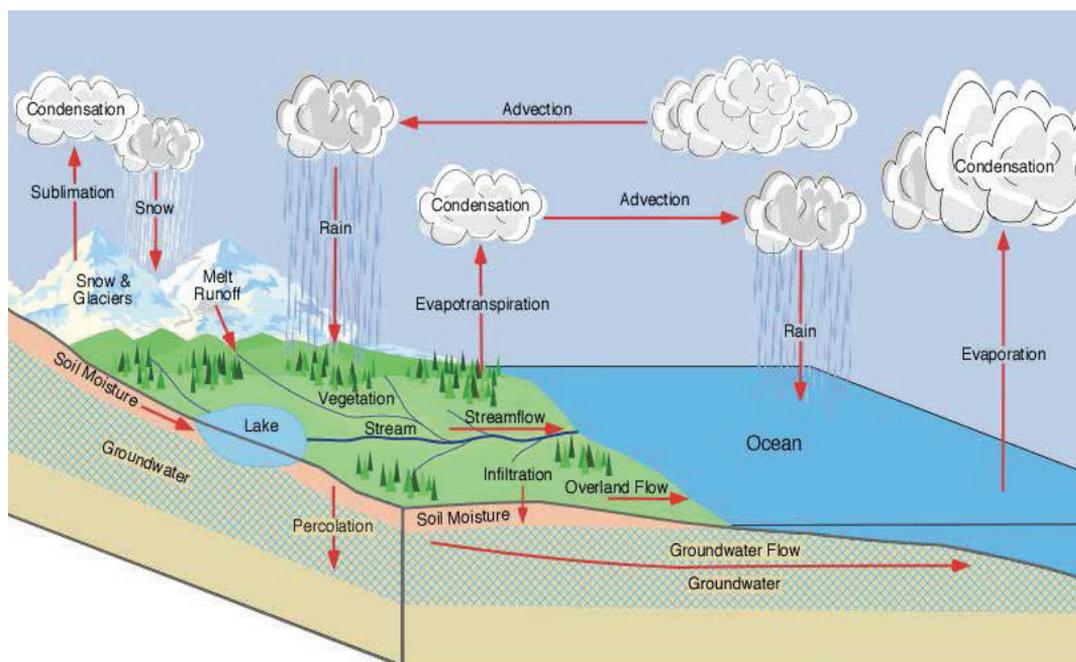


Figure 2. Le cycle hydrologique.

Source : Pidwirny (2006)

L'évaporation de l'eau chaude de surface augmente la quantité d'humidité dans l'air plus froid et plus sec qui circule immédiatement au-dessus de la surface d'un lac. Avec l'évaporation continue, la vapeur d'eau contenue dans l'air froid se condense pour former des nuages de cristaux de glace, qui sont transportés vers la côte. Au moment où ces nuages atteignent le rivage, ils sont remplis de flocons de neige trop gros pour rester en suspension dans l'air et, par conséquent, ils tombent le long du rivage sous forme de précipitations. L'intensité des chutes de neige d'effet de lac peut être augmentée par un soulèvement supplémentaire dû aux caractéristiques topographiques (collines) le long du littoral. Une fois que la neige commence à fondre, l'eau est soit absorbée par le sol et devient de l'eau souterraine, ou alors retourne au lac sous forme de ruissellement.



Questions de l'exercice (30 minutes)

- 1) D'où provient l'énergie qui alimente le cycle de l'eau ?
- 2) Où s'évapore la plus grande partie de l'eau ?
- 3) Quelles sont les quatre étapes du cycle de l'eau ?
- 4) Quel est le nom donné à la pluie, à la neige et au verglas ?



Résumé

Dans ce chapitre, nous avons traité du cycle hydrologique du système terrestre. Les participants ont été éduqués sur l'eau, notamment sur la façon dont elle se déplace à travers le cycle de l'eau. Dans le prochain chapitre, nous parlerons des éléments du changement global.

1.5 Éléments du changement global

1.5.1 Introduction

Cette session de formation présente les éléments du changement global et définit les concepts et les éléments du changement global.



Objectif

À la fin de cette session, l'apprenant devrait être capable d'analyser les différents éléments du changement global.



Activité 1 : Remue-méninges (20 minutes)

Fournissez une analyse critique du concept de changement climatique.

1.5.2 Industrialisation

L'industrialisation est la période de changement social et économique qui transforme un groupe humain en le faisant passer d'une société agraire à une société industrielle, ce qui implique la réorganisation complète d'une économie à des fins de fabrication.

- Elle peut conduire à l'épuisement des ressources naturelles.
- Elle entraîne la pollution de l'air, de l'eau et du sol.
- Le réchauffement de la planète, les changements climatiques sont les conséquences majeures de l'industrialisation.
- Elle provoque des pluies acides.
- Elle conduit à la dégradation de la qualité des terres.
- Elle conduit à la production de déchets dangereux dont l'élimination en toute sécurité devient un gros problème.
- Les industries sont souvent responsables de maladies et d'effets néfastes, comme la silicose et la pneumoconiose, la tuberculose, les maladies de la peau et la surdité.
- Les contaminants métalliques comme le Cd, Zn, Hg, etc., détruisent les bactéries et les micro-organismes bénéfiques dans le sol.
- Les déchets industriels, y compris les toxines, peuvent entrer dans la chaîne alimentaire et provoquer un certain nombre d'effets indésirables chez les êtres vivants et les animaux.
- Les effluents industriels endommagent le mécanisme naturel d'épuration biologique du traitement des eaux usées, causant plusieurs maladies qui affectent le sol et l'eau.
- Les polluants industriels radioactifs provoquent des maladies indésirables lorsque des aliments contenant des radio-nucléides sont pris par l'homme.



Activité 2 : (Discussion de groupe) (20 minutes)

Quel rôle joue l'activité humaine dans la tendance actuelle au réchauffement climatique ?

1.5.3 Progrès technologique

Les applications de la technologie ont souvent des impacts environnementaux inévitables. De tels impacts sont souvent perçus comme inévitables pour plusieurs raisons. Premièrement, le but de nombreuses technologies est d'exploiter, de contrôler ou « d'améliorer » la nature pour le bénéfice de l'humanité. En même temps, la myriade de processus dans la nature a été optimisé et est continuellement ajusté par l'évolution, et la perturbation de ces processus naturels par la technologie est susceptible d'entraîner des conséquences environnementales, souvent négatives. Deuxièmement, le principe de la conservation de la masse et la première loi de la thermodynamique (c.-à-d. la conservation de l'énergie) stipulent que chaque fois que des ressources matérielles ou de l'énergie sont déplacées ou manipulées par la technologie, les conséquences environnementales sont inévitables. Troisièmement, selon la deuxième loi de la thermodynamique, l'ordre ne peut être augmenté à l'intérieur d'un système (comme l'économie humaine) qu'en augmentant le désordre ou l'entropie à l'extérieur du système (c.-à-d. l'environnement).

Ainsi, les technologies ne peuvent créer de « l'ordre » dans l'économie humaine (c'est-à-dire l'ordre tel qu'il se manifeste dans les bâtiments, les usines, les réseaux de transport, les systèmes de communication, l'emploi et les revenus, etc.) qu'au prix d'un « désordre » croissant dans l'environnement. Selon de nombreuses études, l'augmentation de l'entropie est souvent corrélée à des impacts négatifs sur l'environnement.



Résumé

Au cours de cette séance, nous avons analysé les éléments du changement global. Au cours de la prochaine session, nous parlerons des éléments du changement climatique.



Questions de l'exercice (30 minutes)



Source : La Société royale

Étudiez attentivement la figure ci-dessus et réalisez les activités suivantes :

- 1) décrire l'activité réalisée dans la photographie ; et,
- 2) expliquer la relation entre le progrès technologique et l'activité montrée dans la photographie.

1.6 Définition et éléments du climat

1.6.1 Introduction

Cette session de formation présente les éléments du climat.



Objectif

A la fin de cette session, l'apprenant devrait être capable de décrire les différents éléments du climat.



Activité 1 : Remue-méninges (20 minutes)

Faites la différence entre le changement climatique et le réchauffement de la planète

1.6.2 Température

La température est la quantité de chaleur dans l'air, l'objet ou l'organisme. Nous le mesurons avec un thermomètre. Elle varie sur la planète en fonction de l'altitude, de la latitude, de la proximité de la mer et des courants océaniques :

- Altitude : pour chaque 1 000 m d'altitude, la température baisse de 6°C
- Latitude : les températures diminuent de l'équateur vers les pôles.
- Proximité de la mer : la mer se réchauffe et se refroidit plus lentement que la terre.
- Courants océaniques : les courants océaniques chauds produisent des températures plus élevées dans les régions côtières proches. Les courants océaniques froids ont l'effet inverse.

Notre planète est divisée en différentes zones climatiques :

- La zone tropicale située entre les deux tropiques où l'insolation est maximale ;
- Les zones tempérées, une dans chaque hémisphère, situées entre les tropiques et les cercles polaires ;
- Les zones froides, une dans chaque hémisphère, situées au-delà des cercles polaires.



Activité 2 : (Discussion de groupe) (20 minutes)

De quelle(s) manière(s) la température influence-t-elle fortement le climat d'une région ?

1.6.3 Précipitations

Les précipitations sont de l'eau provenant de l'atmosphère qui tombe sur la surface de la Terre sous forme de pluie, de neige, de grésil (un mélange d'eau et de neige) ou de grêle. L'atmosphère contient de la vapeur d'eau. La quantité de vapeur d'eau dans l'air est appelée humidité. Lorsque l'air humide s'élève, il se refroidit et produit de la condensation, formant de petites gouttelettes d'eau qui forment des nuages. Lorsque les gouttelettes deviennent plus grosses et plus lourdes, elles tombent sur la surface de la terre.

1.6.4 Pression

L'air a du poids. La pression atmosphérique est la pression que le poids de l'atmosphère exerce sur la surface de la Terre. La pression est mesurée avec un baromètre en millibars (mbar). Elle est représentée sur les cartes à l'aide de lignes appelées isobares. La pression normale au niveau de la mer est de 1 013 mbar. Les zones de haute pression ou anticyclones sont des zones où la pression est supérieure à 1013 mbar. Les anticyclones produisent des conditions météorologiques stables. L'air est également sec, il n'y a donc pas de précipitations. Les zones de basse pression ou les dépressions sont des zones où la pression est inférieure à 1013 mbar. Les dépressions produisent des conditions météorologiques instables, avec beaucoup de nuages et de précipitations.

Questions textuelles (30 minutes)

- 1) Comment appelle-t-on la température, les précipitations et le vent dans une localité précise, en un jour précis ?
- 2) Identifiez les termes suivants : tropical, sec, latitude moyenne, haute latitude et hautes terres.
- 3) Comment appelle-t-on une petite zone dont le climat est différent de celui des environs ?
Quel est le contraire d'un climat polaire ?

1.6.5 Vent

Le vent est l'air qui se déplace des zones de haute pression vers les zones de basse pression pour équilibrer les différences de pression atmosphérique sur la planète.



Questions de l'exercice (30 minutes)

- 1) Décrivez la façon dont le vent est mesuré ainsi que le développement et l'importance des vents locaux.
- 2) Décrivez les mouvements de l'air et les caractéristiques associées aux deux types de centres de pression.
- 3) Discutez des conditions atmosphériques et des conséquences d'El Niño/La Nina et de la répartition mondiale des précipitations.



Résumé

Au cours de cette session, nous avons étudié les différents éléments qui affectent le climat d'une région. Au cours de la prochaine session, nous parlerons des défis et des opportunités liées au changement climatique.

1.7 Opportunités et défis associés au changement climatique

1.7.1 Introduction

Cette séance de formation présente les opportunités et les défis associés au changement climatique.



Objectifs

A la fin de cette session, l'apprenant devrait être capable de :

- décrire les diverses opportunités associées au changement climatique ; et
- expliquer les défis associés au changement climatique.



Activité 1 : Remue-méninges (20 minutes)

Que pouvons-nous faire pour lutter contre le changement climatique ?

1.7.2 Opportunités associées au changement climatique

Le changement climatique est une menace mondiale qui aura des répercussions sur l'ensemble du globe, en particulier sur le continent africain. En outre, le faible développement économique du continent, son extrême pauvreté et sa dépendance à l'égard des secteurs primaires, font qu'il a une capacité limitée de s'adapter et de se protéger contre ces impacts. Si le changement climatique a fait apparaître de nouveaux défis pour les pays africains, il a également offert de nouvelles opportunités d'investissements publics et privés qui, si elles sont saisies, peuvent créer de nouvelles opportunités de développement et stimuler la croissance économique.

Des efforts politiques substantiels seront nécessaires afin de promouvoir des investissements accrus et améliorés dans le domaine du changement climatique, d'autant plus que l'augmentation des investissements pour atténuer le changement climatique et renforcer l'effort d'adaptation en cours peut également offrir aux pays africains une opportunité de soutenir les efforts nationaux visant à atteindre les Objectifs du Millénaire pour le Développement (OMD) et les stratégies de réduction de la pauvreté. Les ressources nécessaires pour aider l'Afrique dans ses efforts d'adaptation et d'atténuation, y compris la gestion des risques de catastrophes et le développement à faible émission de carbone, sont limitées et dispersées entre de nombreuses priorités nationales et programmes concurrents, tels que la réduction de la pauvreté et le règlement des conflits.

Ce chapitre présentera le rôle des politiques et des cadres institutionnels nationaux, régionaux et internationaux pour permettre aux pays africains d'accéder au financement de la lutte contre le changement climatique et le rôle des institutions afin de fournir des cadres de soutien aux gouvernements lorsqu'ils prennent des décisions sur les priorités en matière de changement climatique et puissent intégrer pleinement les questions de changement climatique dans les politiques nationales.

1.7.3 Politiques nationales, régionales et internationales liées au changement climatique

Voici quelques cadres d'action pertinents pour permettre l'atténuation et l'adaptation au changement climatique :

- Les politiques nationales ;
- La planification et les politiques intégrées ;
- Les incitations financières (écotaxes, subventions écologiques) ;
- La politique de recherche et développement ;
- Les normes et règlements qui intègrent les considérations relatives au changement climatique ;
- La planification intégrée de l'utilisation des terres ; et,
- Les liens entre les secteurs politiques et le « développement durable ».

L'un des indicateurs de l'engagement des pays africains dans les cadres mondiaux d'atténuation et d'adaptation au changement climatique est la soumission de la Communication Nationale Initiale (CNI) et du Programme d'Action National d'Adaptation (PANA) à la CCNUCC. Sans un cadre de politique sur les changements climatiques, ou du moins des éléments de ce cadre, les pays hôtes ne peuvent approuver les projets MDP et sont limités dans leur accès au financement de l'adaptation, ce qui pose un risque d'investissement supplémentaire pour les développeurs de projets potentiels ou entrave le financement des projets ou programmes d'adaptation. Plus précisément, des activités axées sur le reboisement et l'amélioration de la gestion des forêts, l'amélioration de la gestion des terres arables, l'installation de panneaux solaires voltaïques et de foyers améliorés, et l'amélioration de la gestion des pâturages ont toutes été proposées. Toutefois, le manque de clarté observé dans certains de ces documents clés soulève des préoccupations quant au degré d'identification et d'intégration des priorités d'atténuation et d'adaptation dans les politiques nationales. Bien que la région n'ait guère reçu de financement pour les activités d'atténuation ou d'adaptation sur le terrain, le nombre même d'initiatives, en particulier en ce qui concerne la REDD, est un signe encourageant que cette région jouera un rôle plus important sur les marchés du carbone à l'avenir.



Questions textuelles (30 minutes)

- 1) Dans quelle mesure la recherche financière a-t-elle évalué les risques climatiques ?
- 2) Quels types d'initiatives les investisseurs poursuivent-ils sur la question du risque lié aux changements climatiques ?
- 3) Comment les entreprises ont-elles été touchées par le changement climatique au cours de la dernière décennie ?
- 4) Quels sont les plus grands obstacles à la transformation vers une économie à faible émission de carbone ?

1.7.4 Avantages de l'engagement défis

Parmi les avantages importants que les pays africains peuvent tirer de leur participation aux initiatives mondiales de mobilisation et de facilitation de l'adaptation aux effets du changement climatique, on peut citer l'accès aux opportunités de financement offertes par la CCNUCC. En vertu de la CCNUCC, les pays industrialisés reconnaissent la responsabilité d'aider les pays en développement dans leurs efforts d'adaptation, principalement par le financement des mesures d'adaptation. Ces fonds représentent les efforts les plus concertés déployés à ce jour par la communauté internationale pour financer des activités et des projets visant à améliorer les capacités d'adaptation des communautés dans les pays en développement. Parmi les sources de fonds mondiaux pour l'atténuation et l'adaptation au changement climatique, on peut citer

- Le Fonds Mondial pour l'environnement ;
- Le Fonds de priorité stratégique pour l'adaptation - financement de projets d'adaptation concrets dans les domaines de la diversité biologique, des changements climatiques, des eaux internationales et de la dégradation des terres ;
- Le Fonds pour les pays les moins avancés - axé sur l'appui à la mise en œuvre des PANA des PMA et à leurs besoins les plus urgents en matière d'adaptation ;
- Le Fonds spécial pour les changements climatiques - axé sur des projets dans les pays non visés à l'annexe 1 pour appuyer l'adaptation, le transfert de technologies, l'énergie, les transports, l'industrie, l'agriculture, la foresterie et la gestion des déchets, et des activités visant à aider les pays en développement dont l'économie est fortement tributaire des revenus tirés de la production, de la transformation et de l'exportation ou de la consommation de combustibles fossiles et de produits connexes à forte intensité énergétique à réorienter leur économie ;
- Le Fonds d'adaptation - établi en vertu du Protocole de Kyoto pour des projets et programmes concrets d'adaptation dans les pays en développement qui sont particulièrement vulnérables aux effets néfastes du changement climatique ; et
- Le Mécanisme de développement propre (MDP) - encourage l'investissement dans les technologies de réduction des GES dans les secteurs de la foresterie et de l'agriculture, de la production et de l'utilisation d'énergie, de la gestion des déchets et des transports en offrant une incitation à la réduction des émissions sous forme de crédits négociables. Parallèlement aux marchés de Kyoto - fondamentalement des marchés de conformité façonnés par la réglementation gouvernementale - les marchés volontaires du carbone ont stimulé un nombre croissant de développeurs de projets mettant en œuvre des projets, dont beaucoup dans les pays en développement, pour créer des crédits compensatoires pour les marchés volontaires.

Malgré les initiatives mises en place pour équilibrer les conditions climatiques futures, certains indicateurs montrent que la détermination de l'avenir du régime climatique est un processus complexe influencé par la nécessité de concilier les divers intérêts et les circonstances nationales des pays développés et en développement, de permettre un développement économique continu dans tous les pays et de promouvoir un développement énergétique important dans les pays en développement.



Activité 2 : (Discussion de groupe) (20 minutes)

Quel est le rôle de l'État pour aider les communautés rurales à répondre au changement climatique ?

1.7.5 Les défis liés au changement climatique

Le réchauffement de la planète fait référence à l'augmentation des températures mondiales résultant d'une accumulation de GES dans l'atmosphère. Au cours des 150 dernières années, la température moyenne de l'atmosphère et des océans de la Terre a augmenté, et le rythme de ce changement dans notre climat semble s'accélérer. Par exemple, les 10 années les plus chaudes enregistrées ont toutes eu lieu depuis 1990. Après des décennies de recherche et des centaines d'études, une majorité écrasante de scientifiques en sont venus à croire que les activités humaines, en particulier la combustion de combustibles fossiles (charbon, pétrole et gaz), sont une cause majeure de cette tendance. Les conséquences dont les scientifiques et les dirigeants s'inquiètent de plus en plus sont les inondations côtières, les conditions météorologiques extrêmes, les sécheresses et le ralentissement économique.

Inondation côtière

Le réchauffement de la planète entraîne déjà une augmentation du niveau des mers à mesure que les glaciers fondent et que le réchauffement des océans s'étend. On craint de plus en plus que les grandes nappes glaciaires du Groenland et de l'Antarctique occidental ne fondent plus rapidement à l'avenir, ce qui accélérerait la montée du niveau des mers et menacerait de nombreuses communautés côtières. Les Néerlandais, dont une grande partie des terres sont déjà sous le niveau de la mer, sont tellement préoccupés qu'ils ont commencé à expérimenter des maisons flottantes.

Conditions météorologiques extrêmes

De nombreux scientifiques pensent que l'augmentation des vagues de chaleur, des épisodes de pluies extrêmes et de l'intensité des ouragans peut être liée aux changements climatiques causés par le réchauffement de la planète, et que nous pouvons nous attendre à des conditions météorologiques plus difficiles si on laisse la tendance au réchauffement se poursuivre.

Sécheresses

La hausse des températures pourrait accroître le nombre de sécheresses, ce qui aura des répercussions sur les cultures vivrières et la disponibilité de l'eau dans le monde entier. De nombreux scientifiques nous avertissent que le changement climatique global pourrait déjà entraîner des problèmes agricoles.

Le ralentissement économique

Des études économiques récentes mettent également en garde contre les conséquences économiques du changement climatique. On prévient qu'ils pourraient être aussi mauvais, ou pire, que la Grande Dépression des années 1930.



Questions de l'exercice (30 minutes)



Source : <http://fabiusmaximus.files.wordpress.com/2014/03/drought.jpg/>

Étudiez attentivement la figure ci-dessus et réalisez les activités suivantes :

- 1) Décrivez l'activité réalisée dans la photographie.
- 2) Expliquez la relation entre le changement climatique et l'activité montrée dans la photographie.



Résumé

Au cours de cette session, nous avons étudié le changement climatique, les causes et les effets sur les forêts en Afrique. La session a également expliqué les tendances du changement climatique dans le temps. Au cours de la prochaine session, nous examinerons les différentes causes du changement climatique et les risques associés aux émissions de gaz à effet de serre.

1.8 Physique et chimie de l'atmosphère

1.8.1 Composition du gaz atmosphérique



Objectif

Donner à l'apprenant des connaissances et des compétences sur les éléments constitutifs de l'atmosphère et leurs propriétés.

Introduction générale

L'atmosphère terrestre est un mélange de gaz présents à différentes concentrations et de diverses particules¹. Ce mélange est retenu autour de la Terre grâce à son champ gravitationnel. La nature des gaz qui composent l'atmosphère et leur importance relative lui confèrent son caractère unique dans le système solaire, son rôle prépondérant dans l'apparition et le maintien de la vie sur Terre.

L'atmosphère est une couche protectrice pour la Terre, en particulier contre l'incidence du dangereux rayonnement solaire ultraviolet. Par sa composition, il atténue les variations climatiques au niveau global par le déplacement des masses d'air et participe à l'équilibre thermique de la Terre par l'effet de serre. L'atmosphère terrestre apporte les éléments gazeux nécessaires à la vie. Enfin, il participe aux échanges de matière et d'énergie entre les différents milieux terrestres (lithosphère, biosphère, océans, ruissellement de surface).

Composition chimique de l'atmosphère

Les principaux composants chimiques de l'atmosphère sont l'azote (78 %), l'oxygène (21 %), les gaz rares (Argon, Néon, Hélium), la vapeur d'eau et le CO₂. Le tableau suivant indique la composition chimique de l'atmosphère.

Tableau 2. Composition chimique de l'atmosphère

Gaz atmosphérique	Volumes (%)	Masse molaire (O = 16.000)
Azote (N ₂)	78.09	28.016
Oxygène (O ₂)	20.95	32.000
Argon (A)	0.93	39.944
Dioxyde de carbone (CO ₂)	0.035	44.010
Néon (Ne)	1.8 10 ⁻³	20.183
Hélium (He)	5.24 10 ⁻⁴	4.003
Krypton (Kr)	1.0 10 ⁻⁴	83.07
Hydrogène (H ₂)	5.0 10 ⁻⁵	2.016
Xénon (Xe)	8.0 10 ⁻⁶	131.3
Ozone (Rn)	1.0 10 ⁻⁶	48.000
Radon (Rn)	6.0 10 ⁻¹⁸	222.00

Source : <http://eduscol.education.fr/obter/appliped/circula/theme/atmos22.htm>

1 http://www.mrcc.uqam.ca/effet_serre/serre/composition.html

Les constituants de l'air atmosphérique peuvent être classés en deux catégories :

- les constituants tels que l'azote, les gaz rares, dont la concentration est constante, au moins dans les couches inférieures de l'atmosphère ; et
- les constituants dont la teneur varie dans l'atmosphère, tels que le CO₂ et surtout la vapeur d'eau

Tous les gaz, dont les proportions restent constantes, forment l'air sec considéré comme un gaz parfait. La composition de l'air sec et sa masse molaire ont été, pour les besoins de la météorologie, adoptées au niveau international aux valeurs indiquées dans le tableau ci-dessus. L'air atmosphérique est considéré comme un mélange de deux gaz, l'air sec et la vapeur d'eau, d'un point de vue thermodynamique. Les gaz à effet de serre sont la vapeur d'eau, le CO₂, le méthane, l'oxyde d'azote et l'ozone. Les gaz essentiels à la vie sont la vapeur d'eau, la couche d'ozone (O₃), qui filtre les dangereux rayons ultraviolets. Le CO₂, qui en quantité limitée retient l'énergie solaire et régule les températures.

Activités pédagogiques (exercices et études de cas)

En se fondant sur les informations de base présentées dans le cours et dans d'autres documents, préparez et présentez une fiche technique sur la composition chimique de l'atmosphère.

1.9 Principales couches de l'atmosphère



Objectif

A la fin de la session, l'apprenant sera en mesure de
Décrire les principales couches de l'atmosphère et leurs caractéristiques.

Introduction générale

L'atmosphère participe au mécanisme de rétention de la chaleur émise par la Terre, au phénomène de l'effet de serre et au processus de distribution planétaire de la chaleur et de l'humidité. La troposphère est le lieu où se produisent les phénomènes météorologiques et les mouvements atmosphériques horizontaux et verticaux (convection thermique, vents). La stratosphère abrite une grande partie de la couche d'ozone qui protège la vie sur Terre contre le rayonnement UV. La mésosphère est la zone de transition entre la Terre et l'espace. La thermosphère est la zone où se produit l'ionisation des molécules gazeuses et la formation de la majorité des particules à très haute altitude (hélium et hydrogène prédominants).

Principales couches de l'atmosphère

Les gaz présents dans l'atmosphère sont répartis de manière non uniforme dans les quatre principales couches de l'atmosphère (troposphère, stratosphère, mésosphère et thermosphère) (figure 1). Ces couches sont caractérisées par plusieurs propriétés physiques, dont la pression, la température, la densité et la présence de divers gaz.

Les principales couches de l'atmosphère sont décrites ci-dessous :

- Troposphère : la température diminue avec l'altitude (de la surface du globe à 8-15 km d'altitude); épaisseur comprise entre 13 et 16 km à l'équateur et entre 7 et 8 km aux pôles ; contient 80 à 90% de la masse totale de l'air et la quasi-totalité de la vapeur d'eau ; phénomènes météorologiques et mouvements atmosphériques horizontaux et verticaux (Convection thermique, vents) ;
- Stratosphère : la température augmente avec l'altitude jusqu'à 0°C (8-15 à 50 km d'altitude) ; elle abrite une grande partie de la couche d'ozone ;
- Mésosphère : la température diminue avec l'altitude (de 50 à 80 km d'altitude) jusqu'à -80°C; Zone de transition entre la Terre et l'espace ;
- Thermosphère ou ionosphère : la température augmente avec l'altitude (de 80 à 800 km) et peut atteindre plus de 1000°C. Ionisation de molécules gazeuses et formation de la majorité des particules à très haute altitude ; Hélium et hydrogène ; et,
- Exosphère : de 350-800 km d'altitude à 50 000 km d'altitude.

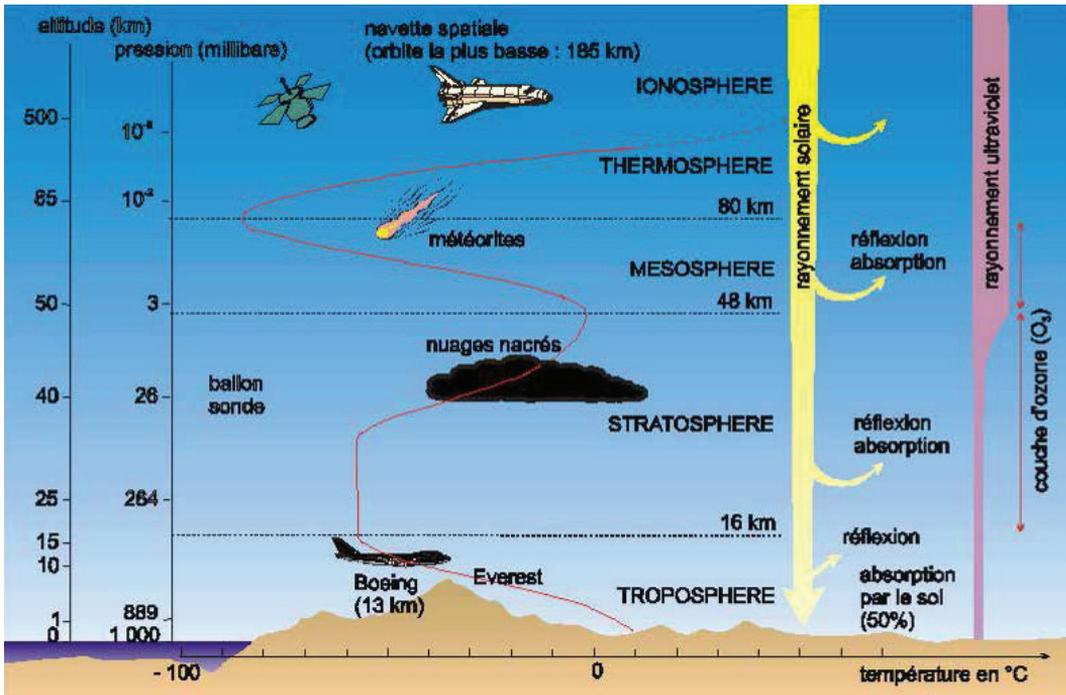


Figure 3. Variation de l'altitude, de la température et de la pression en fonction des couches atmosphériques.

Source : http://www.mrcq.uqam.ca/effet_serre/serre/composition.html#couchesatmosphériques



Activités pédagogiques (exercices et études de cas)

En utilisant les informations de base présentées dans le cours et dans d'autres documents, préparer et présenter une fiche technique sur le rôle des différentes couches de l'atmosphère.

1.10 Pollution atmosphérique



Objectifs

A la fin de la session, l'apprenant sera en mesure de :

- Décrire les sources et les concentrations de polluants atmosphériques ;
- Démontrer le cycle des polluants ; et.
- Expliquer les impacts des polluants atmosphériques sur les écosystèmes.

Introduction générale

Le déclin des forêts attribué à la pollution de l'air est une préoccupation majeure. On sait depuis longtemps que la combustion de gaz ainsi que les émissions de certaines installations industrielles peuvent endommager les forêts². La pollution atmosphérique s'est avérée être un processus complexe, résultat de l'interaction de nombreux facteurs physiques, chimiques, naturels et anthropiques. Le renforcement des capacités pour soutenir ce processus et réduire la charge de la pollution atmosphérique devrait réduire leur impact sur les écosystèmes forestiers.

Sources de pollution atmosphérique

La pollution atmosphérique peut résulter soit d'un changement quantitatif, en augmentant la concentration dans l'air de certains de ses constituants normaux (par exemple, le CO₂, le peroxyde d'azote, l'ozone), soit d'un changement qualitatif dû à l'introduction de composés externes (par exemple, les radionucléides, les substances organiques synthétiques), ou d'une combinaison de ces deux phénomènes (Ramade, 1995).

Certains polluants présents dans l'atmosphère peuvent résulter de la réaction entre de nombreuses substances pour donner de nouveaux composés hautement toxiques. Ainsi, l'oxydation du SO₂ dans l'air en SO₃ réagit avec la vapeur d'eau pour donner de l'acide sulfurique. La réaction des oxydes d'azote avec les hydrocarbures non brûlés, libérés dans l'atmosphère par la combustion de combustibles fossiles, produit des nitrates de peroxyacyle (PAN) beaucoup plus nocifs que les polluants d'origine dont ils proviennent.

Concentration des polluants atmosphériques

Les émissions de polluants correspondant aux quantités de polluants directement rejetées dans l'atmosphère par les activités humaines (usines ou habitations, tuyaux d'échappement, agriculture, etc.) ou par des sources naturelles (volcans ou composés émis par la végétation et les sols) exprimées en kilogrammes ou en tonnes par an ou par heure, par exemple, ne doivent pas être confondues avec les concentrations de polluants qui caractérisent la qualité de l'air respiré et qui sont le plus souvent exprimées en microgrammes par mètre cube (µg/m³)³.

2 http://www.europarl.europa.eu/workingpapers/agri/s5-11-1_fr.htm

3 <http://www.airparif.asso.fr/pollution/emissions-ou-concentrations>

Tableau 3. Source et nature des polluants atmosphériques.

Nature du polluant		Source d'émission
	Dioxyde de carbone	Volcanisme Respiration des êtres vivants Combustibles fossiles
Gaz	Monoxyde de carbone	Volcanisme Moteurs à combustion
	Hydrocarbures	Plantes Bactéries Moteurs à combustion
	Composés organiques	Industries chimiques Incinération des déchets Combustions diverses
	Anhydride sulfureux et autres dérivés soufrés	Volcanisme Embruns de mer Bactéries Combustibles fossiles
	Dérivés nitrés	Combustion de bactéries
	Radionucléides	Centrales atomiques Explosions nucléaires
Particules	Métaux lourds Composés inorganiques	Volcanisme - météorites Érosion par le vent Diverses industries Moteurs à combustion
	Composés organiques naturels ou synthétiques	Feu de forêt Industries chimiques Combustions diverses Incinération d'ordures Agriculture (pesticides)
	Radionucléide	Explosions nucléaires

Source : Ramade (1995).

La qualité de l'air dépend des émissions même s'il n'y a pas de lien simple et direct entre les deux. Elle résulte d'un équilibre complexe entre la quantité de polluants rejetés dans l'air et une série de phénomènes auxquels ces polluants sont soumis une fois dans l'atmosphère sous l'influence de la météorologie : transport, dispersion par le vent et la pluie, dépôt chimique ou réactions des polluants entre eux ou sous l'action de la lumière du soleil.

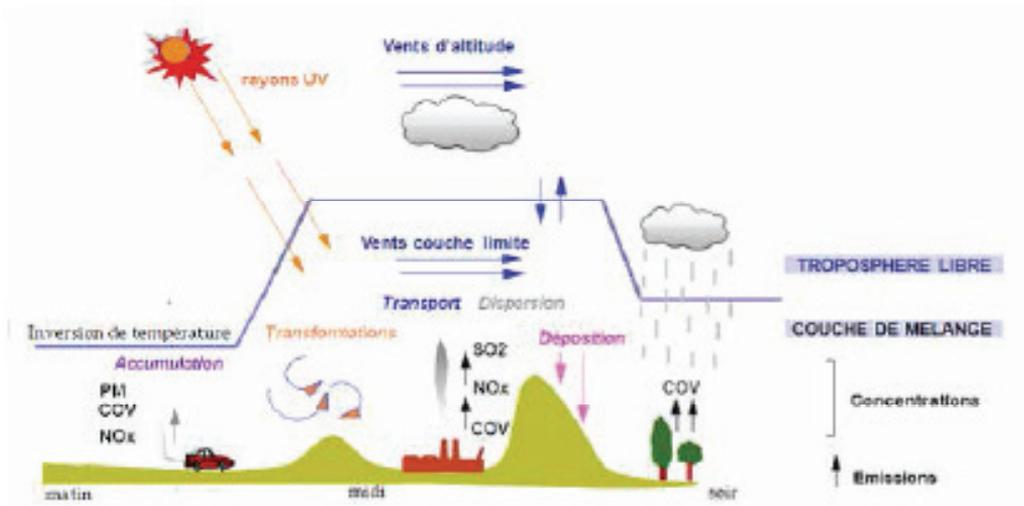


Figure 4. Dispersion des polluants dans l'atmosphère.

Source : <http://www.airparif.asso.fr/pollution/emissions-ou-concentrations>

Encadré 1. Aperçu de la circulation des polluants dans l'atmosphère

Distribution des polluants par les mouvements atmosphériques, passage dans l'air de solides sous forme de particules fines et de polluants liquides par évaporation, dispersion des substances polluantes en altitude et en latitude par les courants et les vents ascendants, processus de contamination de l'atmosphère par des mécanismes liés aux différents paramètres qui contrôlent les phénomènes.

Cycle des polluants

Tous les polluants émis dans l'environnement subissent des changements plus ou moins rapides en fonction de leur nature, des conditions météorologiques ou d'autres facteurs. Comme le montre la figure ci-dessous, les «polluants primaires» émis dans l'air ambiant seront dispersés par les courants atmosphériques et subiront des transformations chimiques sous l'action du soleil, mais aussi de l'humidité et des particules en suspension, pour former des «polluants secondaires». En fonction des conditions météorologiques, certaines réactions chimiques et certains phénomènes physico-chimiques, tels que la dispersion, l'accumulation ou l'absorption, peuvent se produire dans l'atmosphère.

L'émission et l'immission sont deux concepts distincts⁴. Les émissions sont composées de polluants rejetés dans l'environnement par des installations, des véhicules ou des produits. Elles sont mesurées à la source de leur rejet lorsque les polluants ne sont pas encore dilués dans l'atmosphère. Les immissions représentent les polluants en suspension dans l'atmosphère où ils affectent l'homme, les animaux, les plantes, le sol.

4 <http://ge.ch/air/qualite-de-lair/polluants-de-lair/cycle-de-pollution>

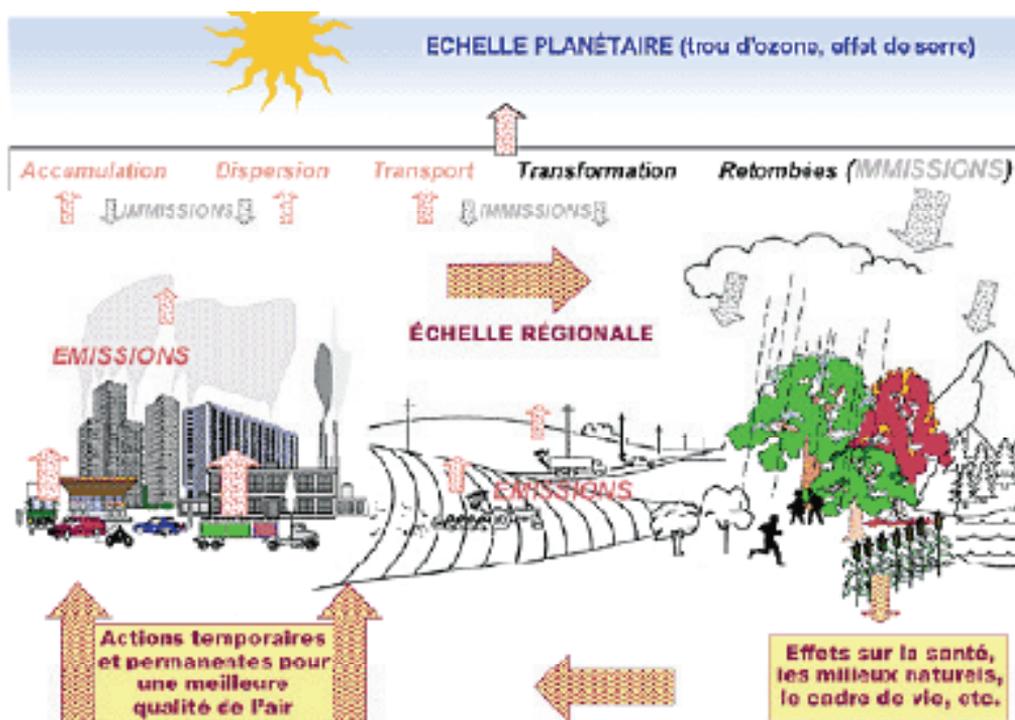


Figure 5. Cycle des polluants dans l'atmosphère

Source : <http://ge.ch/air/qualite-de-lair/polluants-de-lair/cycle-de-pollution>

Impact de la pollution atmosphérique

La pollution de l'air a des effets sur la santé et l'environnement. Les effets de la pollution atmosphérique sur l'environnement peuvent être ressentis à différentes échelles géographiques, et ils peuvent atteindre des écosystèmes aquatiques ou terrestres sensibles sous forme de dépôts secs ou humides. Les apports de soufre et d'azote sont responsables de l'acidification et de la surfertilisation des écosystèmes sensibles (par exemple les forêts, les prairies, les rivières et les lacs). L'ozone a des effets chroniques aigus sur la végétation.

Des concentrations élevées de certains polluants peuvent entraîner la nécrose des plantes. La pollution atmosphérique peut également entraîner une réduction de la croissance des plantes, même sans dommages visibles (par exemple, l'ozone peut entraîner une baisse de la production de céréales) ou une diminution de la résistance des plantes à certains agents infectieux⁵.

5 <http://www.airparif.asso.fr/pollution/effets-de-la-pollution-generalites>

Encadré 2. Exemple des effets de polluants de l'air

Effets de la pollution atmosphérique sur les espèces végétales et les phytocénoses

Sensibilité des plantes, y compris des plantes cultivées, à la pollution atmosphérique : lichens et conifères comme indicateurs biologiques de la pollution ; effets néfastes (toxicité) du dioxyde de soufre sur les plantes.

Effets de la pollution de l'air sur les animaux et les humains

Pénétration et accumulation de fluor dans les plantes par leurs stomates ; empoisonnement des bovins et des ovins par la contamination des chaînes trophiques par le fluor ; épuisement de l'entomofaune par le fluor et ses dérivés minéraux agissant comme un insecticide puissant ; ingestion de plomb par les animaux domestiques ; effet de la consommation d'animaux contaminés sur la santé humaine.

Accumulation de polluants dans la biomasse

Incorporation de substances contaminant les milieux naturels par les êtres vivants par le biais de multiples processus métaboliques ; pénétration de polluants dans les réseaux alimentaires des écosystèmes ; intégration dans le cycle de la matière, dans les biocénoses ; actions néfastes sur d'innombrables espèces végétales.

Encadré 3. Effets de la pollution atmosphérique sur les cycles biogéochimiques

- Influence perturbatrice de la pollution de l'air sur les principaux cycles biogéochimiques.
- Influence inquiétante de la pollution atmosphérique sur les principaux cycles biogéochimiques.
- Comparaison des quantités de polluants majeurs rejetés dans l'air par différentes sources technologiques avec celles générées par les processus naturels ; modifications du taux de circulation des dérivés gazeux du carbone, du soufre et de l'azote dans la biosphère.
- Perturbation croissante du cycle biogéochimique du carbone par l'injection d'une grande masse de CO₂ dans l'atmosphère résultant de la combustion de diverses formes de carbone fossile.
- Perturbation du cycle biogéochimique du soufre par l'introduction de soufre sous forme de dioxyde de soufre résultant de l'utilisation de combustibles fossiles.
- Perturbation du cycle de l'azote par le rejet d'oxyde d'azote provenant de la circulation et des industries.



Activités pédagogiques (exercices et études de cas)

- Sur la base des informations présentées dans le cours et dans d'autres documents, effectuez un résumé analytique par groupes de 4-5 sur les sources d'émission et le cycle des polluants atmosphériques.
- Préparez et présentez une étude de cas analysant les effets des polluants atmosphériques sur un écosystème forestier.

1.11 Physique atmosphérique et rayonnement solaire



Objectifs

A la fin de la session, l'apprenant devrait être capable de :

Décrire les principes physiques permettant de comprendre les interactions du rayonnement avec la matière, ainsi que l'équilibre radiatif de la terre.

Introduction générale

Le bilan radiatif d'une zone donnée est la différence par unité de temps entre le gain d'énergie radiative fournie par l'absorption de tout ou une partie du rayonnement incident et la perte de cette même énergie causée par l'émission de rayonnement (Aboudi, 2015). L'interaction des rayonnements avec la matière a un effet de ralentissement sur les particules et des effets physiques et radiobiologiques sur l'environnement.

La Terre peut être considérée comme un système écologique ouvert, dont la seule source d'énergie externe est le Soleil. L'étude et la compréhension du bilan énergétique de la Terre permettent de comprendre les processus physiques qui déterminent les conditions environnementales dans lesquelles vivent les organismes et les interactions physiques de ces organismes et de leur environnement (Delpierre, 2015). Les forêts ont un effet positif sur notre climat. Les forêts tirent le CO_2 de l'atmosphère pour leur croissance et réduisent ainsi le réchauffement climatique.

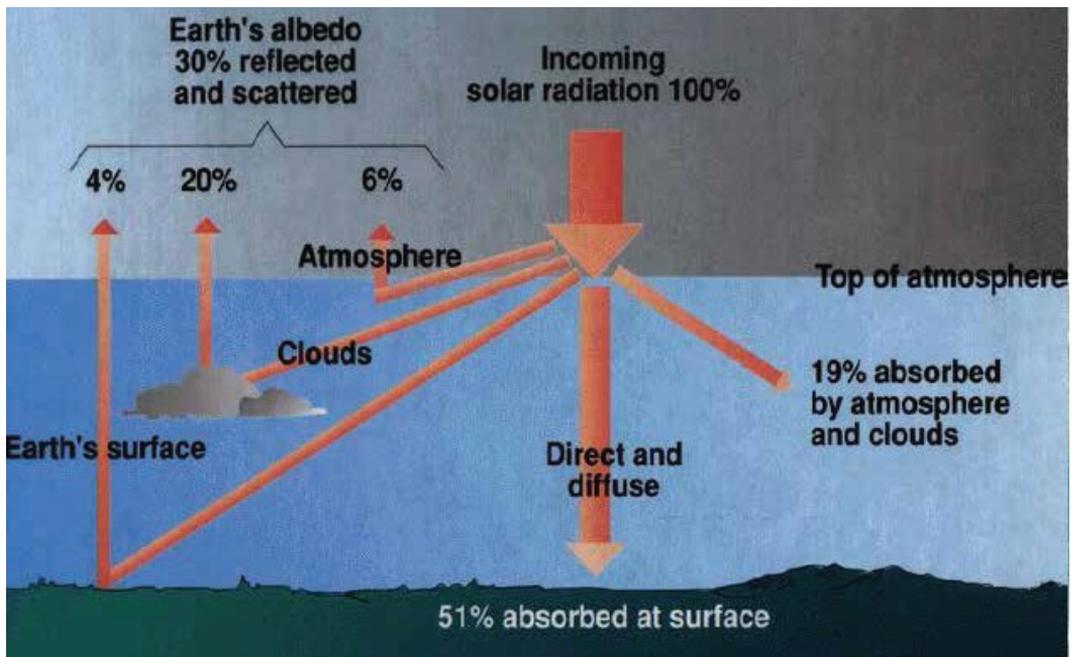


Figure 6. Composants de la radiation.

Source : Delpierre (2015)

Interactions du rayonnement avec la matière

Les particules et les gaz présents dans l'atmosphère peuvent dévier ou bloquer le rayonnement incident. Ces effets sont causés par les mécanismes de diffusion et d'absorption.

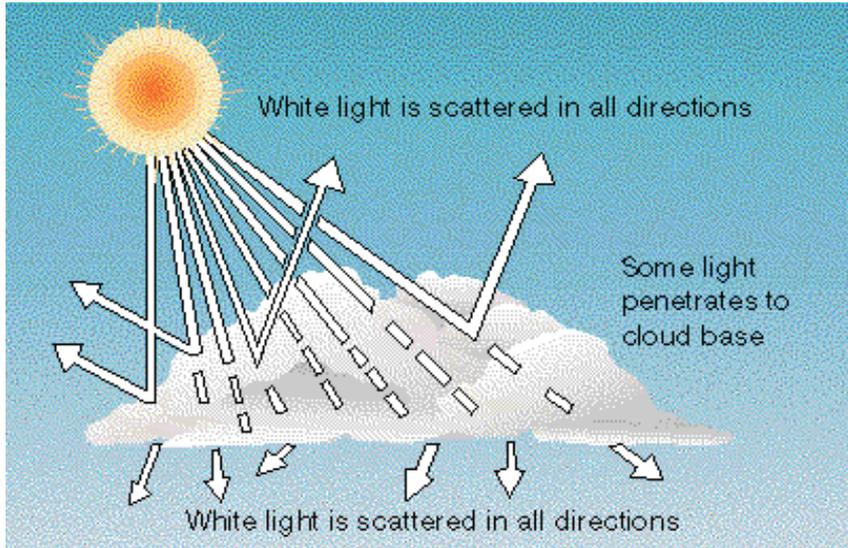


Figure 7. Diffusion Lorenz-mie pour les grosses particules (gouttelettes).

Source: Wadsworth Publ. Comp. cité nar Legras (2012).

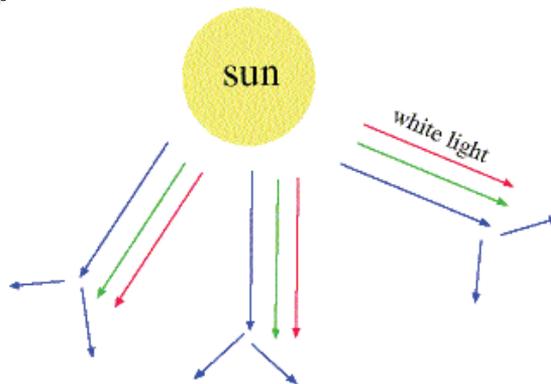


Figure 8. Diffusion de Rayleigh pour les petites particules (molécules de gaz).

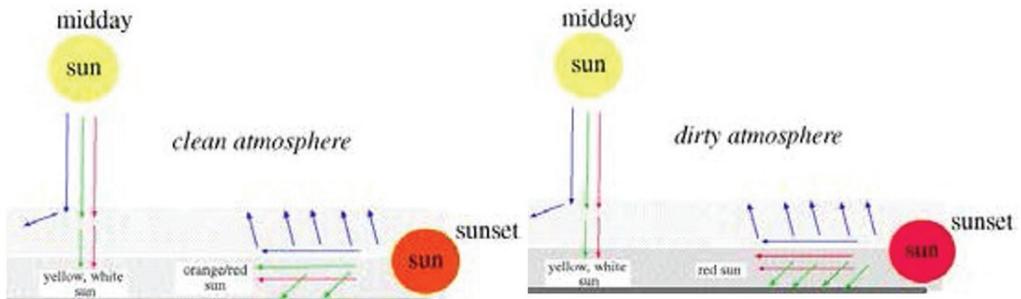


Figure 9. Effets de la diffusion de la lumière solaire.

Source : Legras (2012)

Équilibre radiatif de la Terre

L'équilibre radiatif de la Terre est la différence entre le rayonnement des ondes courtes entrantes et le rayonnement des ondes longues sortantes de la Terre. Chaque seconde, la terre reçoit 100 unités d'énergie du soleil sous forme de lumière et de chaleur. C'est un rayonnement de courte longueur d'onde. Sur ces 100 unités, 25 sont immédiatement réfléchies dans l'espace par l'effet d'albédo de l'atmosphère. Il s'agit de 104 unités d'énergie sous forme de rayonnement de grande longueur d'onde (ou rayonnement infrarouge) soufle, complétées par 29 unités consécutives à l'évaporation de l'eau et à la transmission calorifique directe entre la surface de la Terre et l'atmosphère.

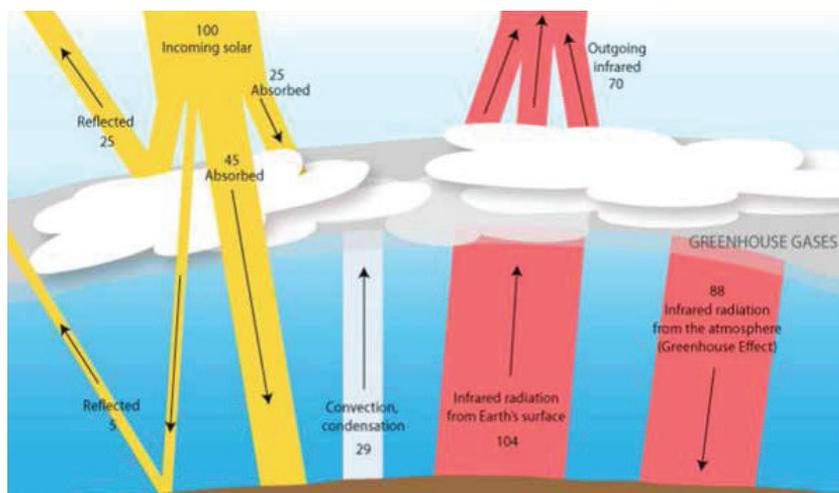


Figure 10. Équilibre radiatif de la terre.

Source : <http://www.climatechallenge.be/fr/des-infos-en-mots-et-en-images/le-changement-climatique/effet-de-serre/L'effet-de-serre-naturel/le-bilan-radiatif-de-la-terre.aspx>

Dans l'atmosphère, il y a aussi un équilibre : la surface de la Terre reçoit 45+88 unités d'énergie et en retourne 29+104. Cet équilibre illustre une fois de plus l'effet de serre naturel. En effet, la surface de la Terre émet plus de rayonnement (104) qu'elle n'en reçoit (45). En d'autres termes, la surface de la Terre perd plus de rayonnement de grande longueur d'onde qu'elle n'en absorbe de courte. Ce manque est toutefois compensé par l'atmosphère, qui renvoie une partie du rayonnement terrestre (88). La température à la surface de la Terre est donc déterminée par 45 unités d'énergie solaire, complétées par 88 unités de chaleur réfléchie par l'atmosphère.

Si une seule composante du système change, l'équilibre radiatif sera perturbé. En conséquence, la température moyenne à la surface de la Terre changera et, après un certain temps, un nouvel équilibre radiatif sera établi. Le changement de température entraîne un changement de climat sur la Terre.



Activités pédagogiques (exercices et études de cas)

- En se fondant sur des informations de base présentées dans le cours et dans d'autres documents, faites un résumé analytique par groupes de 4-5 sur les interactions du rayonnement avec la matière et l'équilibre radiatif.
- Quels sont les principes physiques et les lois de l'équilibre radiatif ?
- Quels sont les effets de l'équilibre radiatif sur l'écologie végétale ?

1.12 Physico-chimie de l'eau

1.12.1 Réservoirs d'eau et propriétés



Objectif

A la fin de la session, l'apprenant sera capable de
Décrire les constituants de l'eau, ainsi que ses propriétés physico-chimiques et biologiques.

Introduction générale

Les eaux de surface et souterraines, par leurs constituants et leurs propriétés, interagissent avec les plantes et sont la source de nutriments et de micronutriments qui sont essentiels aux organes photosynthétiques. L'eau est un corps continu, sans rigidité, qui s'écoule facilement, remplit tous les interstices, puis se répand à la surface. Il possède un fort pouvoir mouillant qui lui confère d'importantes propriétés capillaires, permettant de comprendre son comportement dans les sols. De plus, sa viscosité qui varie fortement en fonction de sa composition chimique ou de sa température est à l'origine de caractéristiques de miscibilité remarquables⁶.

Physico-chimie de l'eau

Les constituants minéraux de l'eau sont le résultat des échanges eau-air, eau-sédiments et du métabolisme des constituants de la biomasse aquatique (Radoux, 1999). Ils comprennent les gaz dissous et les électrolytes minéraux.

Les gaz dissous (O₂, CO₂, N₂). L'activité biologique et les transferts eau-air déterminent les concentrations de gaz dissous. La solubilité de ces gaz est fonction de la température, de la pression et du coefficient de solubilité dans l'air. La concentration d'oxygène dissous dans les eaux de surface résulte de l'équilibre entre les apports et les pertes. Les apports se font par la photosynthèse des plantes supérieures et du phytoplancton (jusqu'à 5-6 m de profondeur) et par le transfert eau-atmosphère. Les pertes se produisent par la respiration des bactéries aérobies (décomposition et minéralisation de la matière organique de la glace) du phytoplancton, des plantes, du zooplancton, des macro-invertébrés, des batraciens, des poissons, et par les échanges avec l'atmosphère. Cela implique des variations diurnes et nocturnes des concentrations en O₂ dissous et inversement en CO₂.

La respiration nocturne des organismes photosynthétiques provoque des variations de la concentration en CO₂ qui modifient fortement le pH de l'eau. Pendant la journée, la concentration en CO₂ diminue, le pH augmente et inversement pendant la nuit. Le CO₂ joue un rôle important dans le système calcocarboné, qui est crucial pour l'équilibre physico-chimique des eaux.

L'azote atmosphérique dissous dans l'eau est fixé par certaines bactéries et certaines algues (cyanophycées ou algues bleues) et est libéré lors du processus anaérobie de dénitrification. Seules quelques bactéries du type *Azotobacter chroococcum* et *A. agilis*, des bactéries phototrophiques et des cyanobactéries peuvent fixer l'azote. Cette fixation affecte la teneur en azote à l'interface eau-sédiment.

6 L'eau: propriétés physiques et chimiques: http://www.ecosociosystemes.fr/eau_proprietes_physicochimiques.html

Le tableau suivant indique les concentrations de gaz dissous en équilibre avec l'atmosphère.

Tableau 4. Concentration des gaz dissous

Éléments	Température (°C)	Concentration (mg/l)	0	10	15	20	25	30
CuO ₂		0.1 – 0.413.9		10.8	9.7	8.1	8.1	7.4
CrN ₂		0.25 – 0.923.5		18.6	16.8	15.4	14.3	13.4
PbCO ₂		0.5 - 11.06		0.70	0.59	20.53	-	-
Zn		10						

Source : Edeline (1980)

Electrolytes minéraux. La composition minérale des eaux de surface est fonction de la nature chimique des terres qu'elles ont traversées. Il y a des éléments de base et des éléments caractéristiques. Il y a six éléments fondamentaux (H₂CO₃, HCO₂⁻, Ca²⁺, OH⁻, H⁺) qui représentent le système calcocarboné, résultant de la dissolution du CO₂ dans l'eau et du CaCO₃ se solubilisant sous l'effet de l'acidité du carbone (équilibre acide-base dans l'eau). Les éléments caractéristiques sont d'autres ions minéraux (Fe²⁺, Mn²⁺, Mg²⁺, Al³⁺, NO₃⁻, SO₄²⁻, PO₄³⁻) résultant notamment de l'action dissolvante de l'acide carbonique. Ils donnent à l'eau sa particularité (eau douce si la concentration totale est inférieure à 2-3 g/l, eau saumâtre si la concentration totale est supérieure à 2-3 g/l).

Les constituants organiques de l'eau sont un mélange complexe de produits végétaux et animaux en décomposition, de produits synthétiques, de micro-organismes et de leurs métabolites. On distingue les substances non-humides et humides. Les substances non-humides (acides aminés, protéines, sucres, lipides) se dégradent rapidement alors que les substances humides sont des constituants organiques essentiels élaborés par les micro-organismes. Ces derniers résistent à la décomposition bactérienne et forment des complexes amorphes de couleur colloïdale, brune, acide et de poids moléculaire élevé (Radoux, 1999).

Principaux cycles physico-chimiques. Le carbone est présent dans l'eau sous forme inorganique (CO₃²⁻, CO₂, HCO₃⁻) et les sources de carbone organique sont diverses et indépendantes du type d'écosystème considéré. La matière organique allochtone (d'origine terrestre ou végétale) est la principale source de carbone dans les eaux courantes. Les eaux stagnantes contiennent une quantité importante de carbone indigène. L'assimilation du CO₂ et sa transformation en matière organique est assurée d'une part par l'activité photosynthétique des plantes, du phytoplancton et des bactéries phototrophes (Cyanobacterium) et d'autre part par diverses bactéries chimolithoautotrophes impliquées dans les processus de nitrification et de méthanogénèse (Radoux, 1999).

Le cycle de l'azote suit dans une large mesure celui du carbone auquel il est associé dans toutes les substances protéiques. Dans les écosystèmes aquatiques, le cycle de l'azote est assuré par de nombreux microorganismes. Selon leurs métabolites caractéristiques, ces microorganismes se trouvent dans les eaux libres ou dans la rhizosphère. L'équilibre entre les divers composés azotés, en plus de la transformation interne dans l'eau, dépendra de la quantité d'intrants et de pertes. Les intrants dépendent des intrants exogènes (ruissellement et eaux usées) et endogènes (fixation biologique). Les pertes dépendent des exportations par courant, pêche, élimination des plantes, dénitrification et volatilisation de l'ammonium.

L'azote moléculaire peut être réduit en NH₃ ou NH₄⁺ avant d'être incorporé sous forme de protéine. Cette fixation est une propriété réservée aux bactéries et aux cyanobactéries (algues bleues). L'azote, présent sous forme organique, peut être converti en ammonium (ammonification). Cette dernière est la forme la plus réduite de l'azote minéral. Il est oxydable en nitrites et en nitrates par le processus de nitrification. Sous ces trois formes minérales, mais surtout sous les formes ammonium et nitrate, l'azote peut être assimilé par les microorganismes (bactéries et champignons) et les plantes.

Le devenir du phosphore présent dans les sédiments riches en matière organique est intimement lié à celui du fer. Sous forme aérobie, le phosphore est absorbé par les particules sédimentaires ou précipitées sous forme de phosphates ferriques (FePO_4). La solubilisation du phosphore peut résulter de l'action du H_2S microbien sur les phosphates ferriques insolubles avec la production de sulfure de fer et la libération de phosphate.



Les matières organiques et la masse biologique morte (acides aminés) sont plus souvent réutilisées dans la biosynthèse par des bactéries saprophytes (bio-réducteurs anaérobies) sans minéralisation préalable. En conditions anaérobies, la dégradation des composés soufrés par les bactéries putréfiantes se fait avec libération de soufre sous forme de H_2S , CH_3SH , $(\text{CH}_3)_2\text{S}$. L' H_2S sera soit libéré dans l'atmosphère, soit oxydé par des bactéries sulfo-oxydantes en milieu aérobie ou par des bactéries photosynthétiques en milieu anaérobie.

Le Fe^{3+} est insoluble dans l'eau. Seule la forme Fe^{2+} est soluble dans des conditions réductrices, et principalement sous forme de $\text{Fe}(\text{HCO}_3)_2$. Le Fe^{2+} reste en solution dans les conditions suivantes : saturation en oxygène inférieure à 50%, présence de matière organique dégradable, $\text{pH} < 7,5$, concentration élevée en CO_2 . Ces conditions sont réunies dans les eaux souterraines et dans l'hypolimnion d'un lac. Si le $\text{Fe}(\text{HCO}_3)_2$ est mis en contact avec l'oxygène, le fer précipite sous forme de $\text{Fe}(\text{OH})_3$ et de $\text{FeO}(\text{OH})$. De nombreuses bactéries sont impliquées dans ces processus d'oxydoréduction.

Encadré 4. Balance acide-base

Les bilans acide-base sont influencés par tous les éléments dissous dans l'eau. Les principaux éléments minéraux jouent une fonction importante dans cet équilibre très perturbé en cas de pollution (Radoux, 1999).

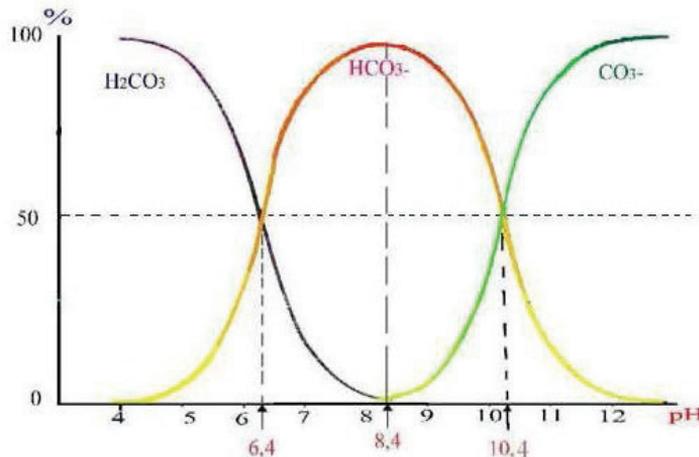


Figure 11. Tendence de la variation du carbone minéral dans l'eau suivant les valeurs du pH.

Source : <http://forums.futura-sciences.com/chimie/587433-pka-acide-fort.html>

Matières en suspension et sédiments. Il existe une grande diversité qualitative et quantitative de matières en suspension et de sédiments. Les argiles sont un composant dominant auquel sont ajoutés des carbonates insolubles, des hydroxydes métalliques, du quartz et des particules organiques. D'importantes interfaces eau-solide résultent de la présence de ces éléments. Les matières en suspension

peuvent être la source d'un apport important de matières et provoquer l'encombrement des fonds, altérant les transferts d'eau entre les eaux de surface et les eaux non souterraines. Les matières en suspension développent des effets d'adsorption importants qui concentrent certains produits dissous à l'état de traces à leur surface. Ils fixent également les micro-organismes, les bactéries et les virus. Les sédiments (accumulation de matières en suspension) représentent un système où la phase solide est dominante tout en conservant les caractéristiques d'un système dispersé. Ils cumulent les polluants et constituent un bon indicateur de la pollution actuelle et antérieure. Les sédiments sont riches en micro-organismes impliqués dans les transformations physico-chimiques et biologiques de l'anaérobiose (Radoux, 1999).

Biologie des eaux naturelles

Flore bactérienne. Les bactéries aquatiques sont extrêmement diverses et variées. Avec les protozoaires et les champignons, elles forment le groupe des décomposeurs. Les bactéries assument presque toute la dégradation de la matière organique par les voies aérobies et anaérobies dans les eaux de surface. Elles sont principalement hétérotrophes pour le carbone et moins phototrophes ou chimio-autotrophes. Les bactéries pratiquent la digestion interne en diffusant dans le milieu diverses enzymes qui hydrolysent les molécules organiques qu'elles absorbent sur toute leur surface. La composition de la flore bactérienne de l'eau dépend des charges organiques et inorganiques, du pH, de la turbidité et de la température. Les eaux souterraines et les eaux de source sont pauvres en bactéries en raison de l'effet filtrant du sol. Les bactéries des eaux de surface sont liées aux bactéries du sol (Radoux, 1999).

Rôles principaux du phytoplancton dans les écosystèmes aquatiques. Le phytoplancton (les planctons sont des micro-organismes dans l'eau, de 20 micromètres à quelques mm, divisés en zoo-planctons et phytoplanctons) assure l'oxygénation moyenne (maximale à midi solaire). Les échanges gazeux dus à la photosynthèse sont supérieurs à ceux de la respiration. Il assimile certains composés azotés et phosphorés et contribue à la variation du pH par des mécanismes de photosynthèse et de respiration. C'est une source de nutriments pour des consommateurs de premier ordre. Sa prolifération indique un milieu eutrophe et peut asphyxier ou empoisonner un milieu aquatique (Radoux, 1999).

Rôle de la végétation aquatique. La végétation joue un rôle physico-chimique, biologique et mécanique dans les écosystèmes aquatiques (Radoux, 1999).

Rôle physico-chimique. L'activité photosynthétique diurne fournit de l'oxygène et consomme du CO_2 . La concentration maximale d'oxygène dissous est atteinte à la fin de la journée et la concentration minimale la nuit. L'écran constitué par la nappe foliaire des plantes aquatiques limite la pénétration du rayonnement solaire dans l'eau et atténue les écarts thermiques jour/nuit. De plus, le développement du phytoplancton est limité. A base d'azote (NO_3^- , NH_4^+) et de phosphore (PO_4^{3-}), la nutrition des plantes se fait par l'absorption des nutriments présents dans l'eau et les sédiments. Il y a un rejet dans l'eau de substances organiques tout au long d'un processus continu (excrétion de matière organique dissoute par les feuilles) et d'un processus lié à la décomposition de la matière organique de tissus végétaux. L'évapotranspiration d'une surface recouverte de plantes est généralement plus importante que l'évaporation d'une surface d'eau libre.

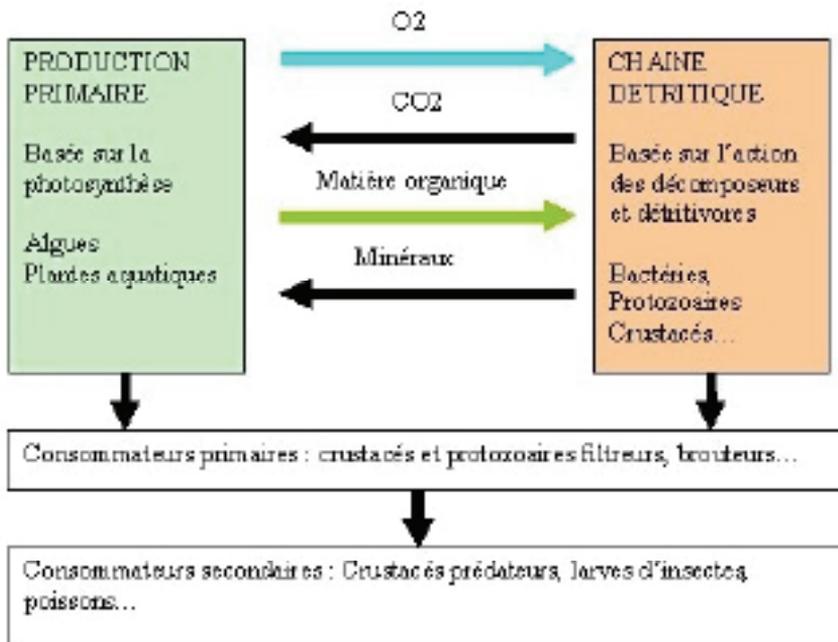


Figure 12. Cycle de la matière et pyramide alimentaire.

Source : haliosphere.over-blog.com

Rôle biologique. La production annuelle nette de plantes immergées dans les lacs fertiles varie de 4 à 7 t/ha et de 1 à 2,5 t/ha dans les lacs pauvres. Cette production dépend des concentrations de sédiments et de nutriments dans les eaux. Les héliophytes sont les plantes les plus productives au monde et sont les transformateurs naturels d'énergie lumineuse les plus efficaces. La productivité de l'eau courante est plus faible, les nutriments étant piégés et décomposés au fond du cours d'eau. Les plantes aquatiques sont une frayère idéale pour les poissons et les invertébrés. Les plantes sont consommées directement par les organismes phytophages et indirectement par les consommateurs de deuxième et troisième ordre. Certains poissons (les carpes par exemple) sont herbivores (figure 12 ci-dessus).

Rôle mécanique. Le volume occupé par les plantes aquatiques entraîne une diminution de la vitesse d'écoulement de l'eau (de l'ordre de 0,3 à 0,1 m/s) et une augmentation des hauteurs d'eau (de l'ordre de 0,2 à 0,4 m). Les plantes aident également à stabiliser les berges et à consolider les éléments (figures 13 et 14).

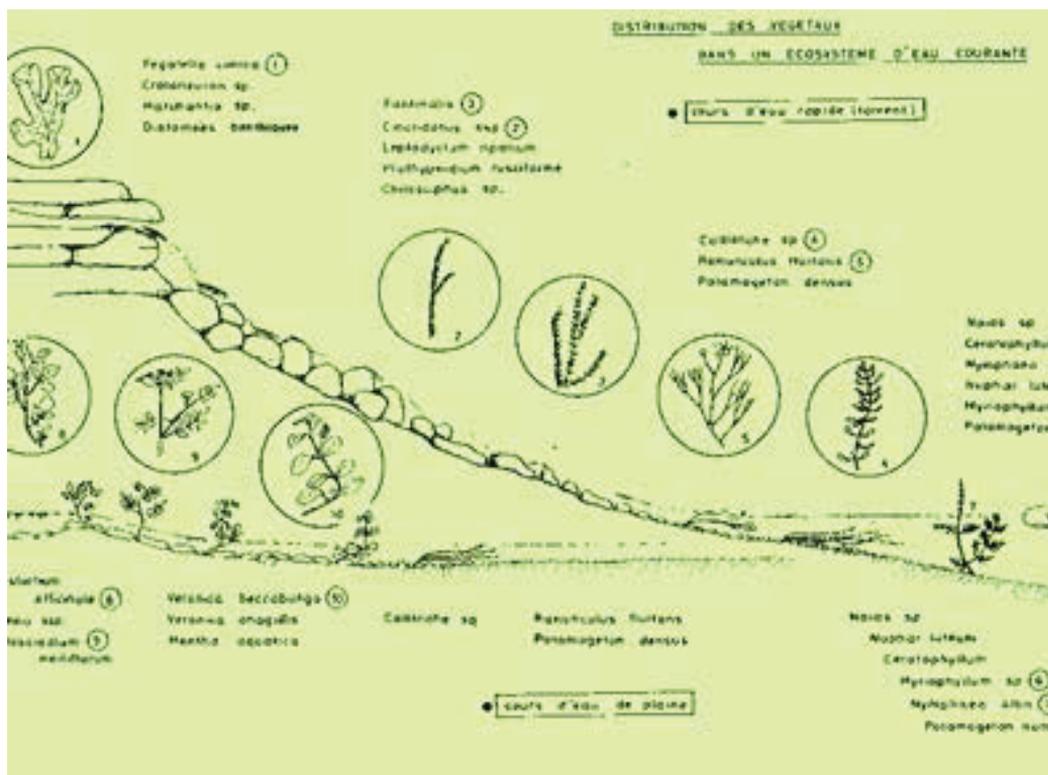


Figure 13. Les plantes dans un écosystème d'eau courante.

Source : Radoux (1999)



Activités pédagogiques (exercices et études de cas)

En se fondant sur les informations de base présentées dans le cours et dans la littérature, préparer en groupe de 4-5, une fiche technique sur les propriétés des eaux intérieures et une fiche technique sur les eaux océaniques.

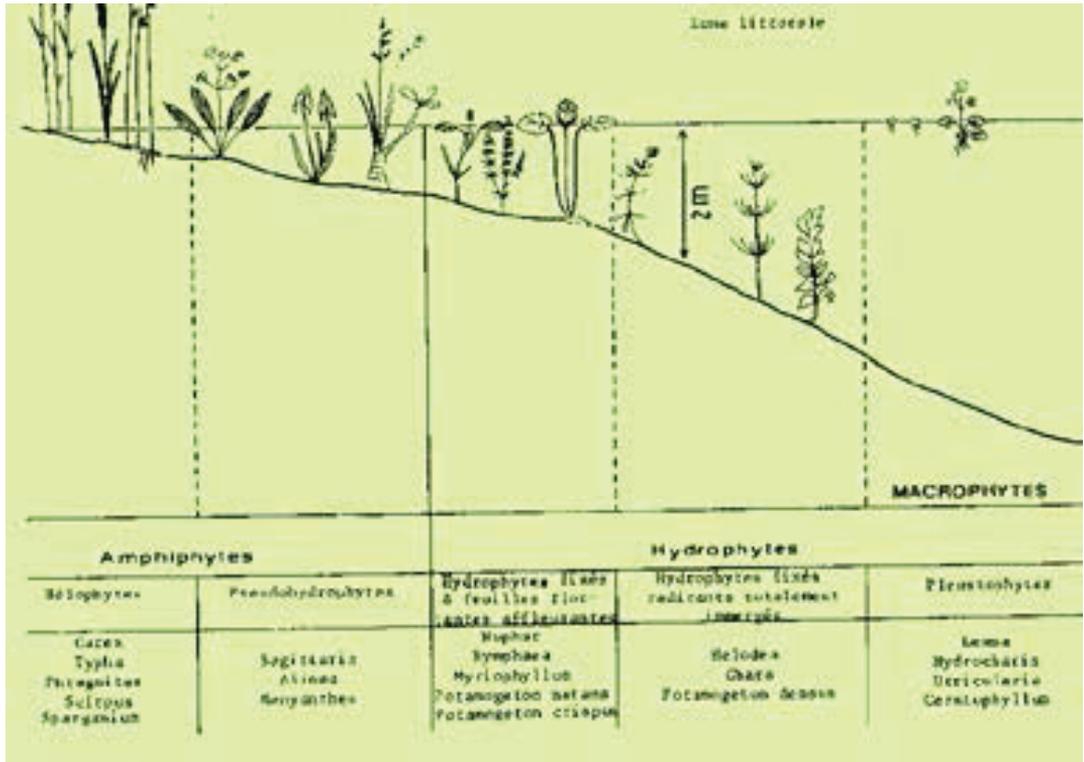


Figure 14. Distribution des plantes dans un système d'eau stagnante. Source : Radoux (1999)

1.13 Pollution/qualité de l'eau



Objectif

A la fin de la session, l'apprenant sera capable de
Décrire les types de pollution et les paramètres de caractérisation de la qualité de l'eau.

Introduction générale

Les paramètres physiques, chimiques et biologiques caractérisent les eaux de surface en fournissant des informations sur leur état qualitatif. La détermination du degré de pollution des cours d'eau nous permet d'évaluer leur capacité d'auto-épuration. La pollution de l'eau agit de façon similaire sur les facteurs biotiques et abiotiques tant dans les eaux courantes que dans les lacs et les marais, mais les effets de la pollution diffèrent dans les deux types d'écosystèmes limniques. La pollution accélère le processus d'eutrophisation des eaux courantes et des eaux stagnantes (Ramade 1995 ; Radoux, 1999).

La principale conséquence des rejets de polluants dans un écosystème aquatique est le développement du processus d'auto-purification de l'eau. Il se caractérise par une multiplication des micro-organismes purificateurs, bactéries aérobies dans un premier temps et dans un second temps par une augmentation de la consommation d'oxygène dissous (diminution rapide de la teneur en oxygène dissous). Les populations d'algues, de protozoaires et de poissons seront modifiées dans leur composition, leur nombre et leur densité.

Un système aquatique naturel est en équilibre et son évolution globale est régie par un ensemble de processus (équilibre redox, équilibre acide basique, complexation). La biomasse aquatique joue un rôle important et est considérée comme le principal facteur de stabilité de l'écosystème. Si la biomasse affecte réciproquement l'état d'équilibre d'un système aquatique, tout changement provenant d'un apport externe aura un impact direct sur la biomasse (Radoux, 1999). Ainsi, l'analyse de la biomasse permet d'évaluer la qualité et l'évolution d'un système aquatique.

Pollution chimique de l'eau

La pollution chimique minérale est d'autant plus grave que ses effets sont insidieux. Les composés eutrophiques et les métaux sont les deux types de polluants minéraux (Stanitski et al., 2003 ; Ramade, 1995 et Radoux, 1999).

Les composés eutrophiques sont les dérivés minéraux de l'azote et du phosphore (nitrate, nitrite, ammonium, phosphates et autres sels utilisés dans l'agriculture et l'industrie). Le transfert d'azote d'un milieu terrestre à un milieu aquatique joue un rôle fondamental dans le cycle de l'azote à l'échelle planétaire et régionale. Les océans sont déficients en azote (faible fixation et perte par dénitrification). Un vaste continuum d'écosystèmes interdépendants allant des aquifères aux réseaux hydrographiques, en passant par les lacs, les estuaires et les zones marines côtières, constitue l'interface entre les continents et les océans. Le flux des échanges d'azote concentré des continents vers les océans est le résultat de nombreux processus chimiques et biologiques qui déterminent le niveau d'apport d'engrais dans le milieu océanique.

L'utilisation du sol, le type d'agriculture (intensive, extensive, monoculture, polyculture ou mixte) et les rendements d'épuration tertiaire des réseaux d'épuration des eaux déterminent la qualité des eaux souterraines et le flux d'azote transporté par le réseau hydrographique. Les sources de pollution de la nappe phréatique par les nitrates sont ponctuelles : rejets domestiques par des puits perdus, des rejets industriels, la percolation à travers les décharges et les eaux de ruissellement et lessivage des sols agricoles. La pollution des eaux souterraines par les nitrates et les pesticides présente trois caractéristiques principales

(processus lent, processus stable, phénomène local). Le processus est lent du fait que le taux d'infiltration est plus ou moins faible selon le type de profil de sol que le polluant doit traverser. Ce processus stable s'explique par le fait que l'aquifère reste pollué en raison de la lenteur de l'écoulement des eaux souterraines. Le phénomène est localisé en raison de la lente migration de la pollution.

Encadré 5. Protection des aquifères et des bassins versants

Les méthodes de protection des eaux souterraines contre la contamination devraient être élaborées sur la base des concepts fondamentaux de l'évaluation des risques de pollution et de la vulnérabilité des aquifères.

Les milieux aquatiques naturels sont globalement très pauvres en phosphore dans la mesure où cet élément joue un rôle essentiel en tant que facteur limitant. Les apports artificiels de phosphore sont d'origine diffuse (érosion des sols, lessivage des terres agricoles) et ponctuelle (rejet des eaux usées domestiques, agricoles et industrielles, détergents utilisés dans l'industrie). Le processus d'eutrophisation est expliqué dans l'encadré suivant.

Encadré 6. Eutrophisation des cours d'eau

Des concentrations excessives de nitrates et de phosphates induisent le phénomène d'eutrophisation (étouffement de la vie aquatique). Ces substances sont normalement générées par la minéralisation de la matière organique. Cependant, présents en quantité excessive en raison de rejets intempestifs, ils favorisent la prolifération d'algues et de micro-organismes photosynthétiques qui réduisent la pénétration de la lumière dans les couches d'eau profonde. Si ces algues et micro-organismes photosynthétiques produisent de l'oxygène pendant le jour, ils en consomment la nuit et ces variations de la concentration d'oxygène peuvent être fatales pour les poissons. De plus, la décomposition des algues mortes induit également une consommation d'oxygène. Lorsque l'eau n'est pas fortement oxygénée, les conditions anaérobies peuvent également entraîner une accumulation de composés ammoniacaux et de nitrites qui peuvent empoisonner la flore et la faune.

Source : Institut Bruxellois pour la Gestion de l'Environnement/Observatoire des Données de l'Environnement, 2005 http://document.environnement.brussels/opac_css/doc_num.php?explnum_id=5378

Des métaux lourds. La pollution de l'eau par les métaux lourds est créée par l'industrie chimique, la métallurgie, les centrales thermiques, l'agriculture et les produits ménagers (batteries, etc.). Les doses libérées dans l'environnement s'accumulent dans les chaînes trophiques pour atteindre des seuils de toxicité létale. A titre d'exemple, les métaux lourds sont concentrés jusqu'à mille fois par les mollusques et limitent ainsi leur utilisation à des fins alimentaires. Les métaux lourds contenus dans les effluents urbains et industriels agissent de manière inhibitrice ou nuisible sur les micro-organismes qui purifient l'eau.

Encadré 7. Exemple de concentrations en mg/litre considérées comme inhibiteurs de nitrification

Éléments	Concentration (mg/l)
Cu	0.1 – 0.4
Cr	0.25 – 0.9
Pb	0.5 - 1
Zn	10

Source : Edeline (1980)

Les métaux lourds agissent principalement de manière nocive à l'état dissous. Leur solubilité est également dépendante du pH. L'avenir des métaux lourds dans l'eau est conditionné par la formation complexe. Tous les métaux sont hydratés dans une solution d'eau. Les hydroxydes métalliques sont nombreux. Pour chaque métal, un diagramme $\log(C) = f(pH)$ peut être établi.

La pollution chimique organique peut être caractérisée par la charge de l'eau en deux catégories de molécules de carbone : i) les composés organiques synthétiques provenant des industries chimiques et autres ; ii) les composés organiques dérivés des métabolismes humains, animaux et végétaux (matières fécales, urine, résidus organiques de cultures, lipides, protéines, polysaccharides, etc.).

Les composés organiques synthétiques proviennent des activités humaines qui entraînent des rejets de produits chimiques dans le milieu aquatique, terrestre ou marin. Il y a environ 4 millions de composés chimiques dont 50 à 60 mille sont utilisés à des fins techniques. On distingue principalement les pesticides, les produits à usage domestique et industriel utilisés en circuit ouvert, les produits à usage industriel utilisés en circuit fermé. Ces contaminants organiques sont, selon les cas, rémanents ou plus ou moins facilement biodégradables. Ils ont un impact sur les écosystèmes aquatiques et la santé humaine. Il est nécessaire de surveiller leurs concentrations et leurs effets, ainsi que d'établir des critères de qualité et des normes limites.

Les pesticides utilisés en milieu agricole peuvent atteindre les eaux de surface par les pluies et par le drainage artificiel ou naturel. Leur transfert dépend d'un ensemble de phénomènes biogéochimiques qui influencent leur persistance et leur mobilité : la dégradation, la percolation par volatilisation et l'adsorption dans les sols. La persistance des produits agricoles dépend principalement de leur aptitude à la dégradation biologique et chimique. Les durées de persistance exprimées en temps nécessaire pour une dégradation de 70 à 100% sont très variables selon la catégorie chimique du pesticide et même d'un produit à l'autre. Les eaux urbaines et les eaux usées contiennent de grandes quantités de détergents. Les détergents synthétiques sont des mélanges complexes qui contiennent une matière active ayant des propriétés tensioactives, une charge polyphosphate.

Les composés organiques sont dérivés des métabolismes humains, animaux et végétaux, par exemple les matières fécales organiques, divers déchets organiques de cuisine et de culture, etc. Ces matériaux sont facilement biodégradables. Cependant, le volume du polluant et ses concentrations locales peuvent augmenter rapidement.

Encadré 8. Effet de la pollution chimique de l'eau

- Eutrophisation du milieu aquatique.
- Contamination des nappes phréatiques par les nitrates.
- Toxicité létale et sublétale des polluants organiques (à court terme).
- Toxicité chronique des polluants organiques (à long terme).
- Risques mutagènes, tératogènes et cancérigènes associés aux composés organiques.
- Réoxygénation de l'eau limitée par les détergents.
- Obstruction de l'action purificatrice des bactéries par certains détergents.
- Empoisonnement des animaux d'eau douce.
- Interférence avec le rôle d'auto-purification du milieu récepteur par des composés organiques dérivés des métabolismes humains, animaux et végétaux.

Pollution physique de l'eau

La pollution mécanique résulte de la présence dans l'eau de particules et de déchets solides. Il s'agit essentiellement de minéraux insolubles, de limon et d'argile. Cette pollution provient des industries extractives (mines, carrières), des usines de défilage du bois, des tanneries, des industries agroalimentaires, mais aussi des activités domestiques et des eaux de ruissellement, qu'elles soient naturelles, agricoles ou autres (Radoux, 1999). L'unité de mesure de la pollution mécanique est la teneur en matières en suspension (MES) exprimée en mg de matières sèches insolubles par litre.

Encadré 9. Effet de la pollution physique

- Obstruction des cours d'eau.
- Récupération des plans d'eau par les plantes.
- Destruction des frayères.
- Obstruction des branchies des poissons.
- Inhibition de la vie aquatique.

Encadré 10. Effet de la pollution thermique

- Amélioration de l'épuisement de l'oxygène dissous.
- Nécessité d'une circulation branchiale plus intense pour les animaux d'eau douce afin de compenser la réduction de la concentration d'oxygène dissous.
- Risque de concentration de substances toxiques par les animaux d'eau douce.
- Développement de la dégradation de la matière organique dans l'anaérobiose.
- Prolifération des bactéries.
- Développement de diatomées en dessous de 20°C ; remplacement par des algues vertes à partir de 25°C ; succession par des algues bleues.
- Mélanges difficiles d'eau froide et d'eau chaude et stratification du cours d'eau.
- Changements dans le régime de l'eau entraînant des changements dans les communautés de poissons.
- Développement d'agents pathogènes pour l'homme (par exemple Naegleria-amoeba).
- Diminution de la diversité de la faune et de la flore aquatiques, exacerbation de la pollution organique, eutrophisation des lacs et des rivières.

La pollution thermique n'est généralement pas visible. Quoique bien connues, ses conséquences ne sont pas facilement corrélées avec le phénomène qui lui a donné naissance. La pollution thermique résulte de la présence d'un nombre croissant de centrales nucléaires et d'industries qui utilisent généralement l'eau d'un cours d'eau comme réfrigérant (Radoux, 1999 ; Ramade, 1995). Cette pollution se traduit essentiellement par la réduction de l'eau.

La pollution radioactive a des conséquences graves à court, moyen et long terme et est due à des accidents dans les centrales électriques ou au transport de produits radioactifs (Radoux, 1999).

Pollution biologique des eaux

La pollution biologique résulte du rejet dans les eaux continentales et littorales d'une grande variété de substances organiques fermentescibles. Celles-ci peuvent être d'origines diverses : effluents urbains ou industriels contenant des déchets ménagers, des matières fécales, des sucreries, de la papeterie, etc. La pollution biologique de l'eau entraîne une forte contamination bactériologique (Ramade, 1995). Elle comprend la pollution virale, bactérienne et zooparasitaire. L'origine est spécifiquement humaine et animale. Les matières fécales contaminent les eaux usées urbaines, agricoles et industrielles (agroalimentaires) domestiques par des apports massifs. Elle représente un risque sanitaire grave pour les humains et les animaux et nécessite la mise en œuvre de procédés de purification (Radoux, 1999).

Pollution par les bactéries. La concentration bactérienne totale des eaux usées domestiques est de l'ordre de 10^8 - 10^{10} germes/100 ml. Les bactéries responsables des maladies infectieuses d'origine hydrique les plus fréquentes sont les bactéries gram-négatives, aérobies et anaérobies facultatives. Dans plusieurs villes africaines, l'absence quasi-totale de réseaux de collecte des eaux usées et de stations d'épuration accentue l'importance de la contamination de l'eau.

Pollution par les virus. Les déchets organiques, en particulier les excréments, contiennent des virus (entérovirus, adénovirus, rotavirus) qui sont également des sources de pollution des eaux de surface et souterraines.

Pollution par les zooparasites. La parasitologie d'eau douce concerne, d'une part, la faune parasitaire présente naturellement et, d'autre part, les autres introduites par les activités anthropiques. La présence d'un parasite dans l'eau indique généralement une contamination fécale. En général, il n'existe pas de normes ou de législation concernant la présence et le contrôle de ces parasites zoologiques dans l'environnement aquatique.

Encadré 11: Effets de la pollution biologique de l'eau

- Récurrence de l'affection (colibacillose, ou hépatite virale).
- Epidémie de choléra.
- Agents pathogènes graves (typhoïde, dysenterie).
- Multiplication des germes pathogènes.

Qualité de l'eau

La qualité de l'eau et la nature des polluants à un moment donné peuvent être déterminées en mesurant les paramètres physico-chimiques et bactériologiques. Cependant, la qualité de l'eau fluctue avec le temps, les saisons, les débits, les charges polluantes et leurs origines. Par conséquent, la seule mesure de ces paramètres donne une évaluation incomplète de l'état qualitatif de l'eau. Pour évaluer l'état réel de la pollution, l'analyse des constituants de la biomasse est essentielle car elle intègre l'histoire qualitative des eaux de surface et les variations saisonnières.

Mesure des paramètres physiques et de la pollution primaire

Quatre paramètres doivent être mesurés.

La température de l'eau joue un rôle important, par exemple en ce qui concerne la solubilité des sels et des gaz, y compris l'oxygène nécessaire à l'équilibre de la vie aquatique. De plus, la température augmente la vitesse des réactions chimiques et biochimiques par un facteur de 2 à 3 pour une augmentation de la température de 10°C. L'activité métabolique des organismes aquatiques est donc également accélérée lorsque la température de l'eau augmente. La valeur de ce paramètre est influencée par la température ambiante mais aussi par les éventuels rejets d'eaux usées chaudes. Les changements soudains de température de plus de 3°C s'avèrent souvent néfastes pour la vie aquatique.

La conductivité électrique (CE) est une expression numérique de la capacité d'une solution à conduire le courant électrique. La plupart des sels minéraux en solution sont de bons conducteurs. D'autre part, les composés organiques sont de mauvais conducteurs. La conductivité électrique standard est généralement exprimée en millisiemens par mètre (mS/m) à 20°C. La conductivité de l'eau naturelle est comprise entre 50 et 1500 µS/cm. L'estimation de la quantité totale de matière dissoute peut être obtenue en multipliant la valeur de la conductivité par un facteur empirique dépendant de la nature des sels dissous et de la température de l'eau. La connaissance de la teneur en sels dissous est importante dans la mesure où chaque organisme aquatique a ses propres exigences en ce qui concerne ce paramètre. Les espèces aquatiques ne survivent généralement pas aux variations importantes des sels dissous, qui peuvent être observées, par exemple, dans le cas des rejets d'eaux usées.

La mesure de la conductivité permet de déterminer la quantité totale de sels dissous dans les eaux. La quantité de sel dissous présent dans l'eau naturelle est fonction de la lente dissolution de certaines roches dans le bassin versant. La conductivité exprime la facilité avec laquelle une eau conduit un courant électrique.

Le pH est la mesure de l'acidité de l'eau. L'échelle de pH s'étend en pratique de 0 (très acide) à 14 (très alcalin) ; la valeur médiane 7 correspond à une solution neutre à 25°C. Un pH faible (eau acide) augmente le risque de présence de métaux sous une forme ionique plus toxique. Un pH élevé augmente les concentrations d'ammoniac, toxique pour les poissons.

Les matières en suspension sont exprimées en mg/l de matière sèche insoluble. Leur détermination est essentielle pour évaluer la répartition entre la pollution dissoute et la pollution sédimentable (TSS > 10 µm) (Radoux, 1999). Les matières en suspension comprennent toutes les matières minérales ou organiques qui ne se solubilisent pas dans l'eau. Elles comprennent les argiles, les sables, les limons, les petites matières organiques et minérales, le plancton et d'autres microorganismes présents dans l'eau. La quantité de matières en suspension varie notamment en fonction des saisons et du régime d'écoulement. Ces matériaux affectent la transparence de l'eau et réduisent la pénétration de la lumière et, par conséquent, la photosynthèse. Ils peuvent également interférer avec la respiration des poissons. De plus, les solides en suspension peuvent accumuler de grandes quantités de matières toxiques (métaux, pesticides, huiles minérales, hydrocarbures aromatiques polycycliques, etc.).

Mesure des paramètres chimiques organiques et de la pollution secondaire

Demande chimique en oxygène (DCO) et demande biochimique en oxygène (DBO5). Les eaux usées sont carbonisées par une grande variété de substances organiques qui polluent les eaux de surface. Dans le contexte de la pollution organique, la demande chimique en oxygène (DCO) et la demande biochimique en oxygène (DBO5) sont les paramètres d'évaluation (Radoux, 1999).

La mesure de ces deux paramètres est basée sur la différence entre la teneur initiale en oxygène dissous et la teneur finale en oxygène dissous après oxydation de la matière organique présente dans un échantillon d'eau. La demande biochimique en oxygène (DBO) est la quantité d'oxygène utilisée par les bactéries pour décomposer partiellement ou oxyder les produits biochimiques dans l'eau qui constituent

leur source de carbone (graisses, glucides, tensioactifs, etc.). Cette élimination de l'oxygène se fait au détriment des autres organismes vivants du milieu aquatique.

En ce qui concerne les eaux domestiques, environ 70 % des composés organiques sont généralement dégradés après 5 jours et la dégradation est pratiquement complète après 20 jours. L'indicateur utilisé est généralement la DBO5 qui correspond à la quantité d'oxygène (exprimée en mg/l) nécessaire aux micro-organismes en décomposition pour dégrader et minéraliser en 5 jours la matière organique présente dans un litre d'eau polluée. Plus la DBO5 est élevée, plus la quantité de matière organique présente dans l'échantillon est élevée.

La demande chimique en oxygène (DCO) est la quantité d'oxygène requise pour la dégradation chimique des composés organiques dans l'eau à l'aide d'un puissant oxydant. Il permet de mesurer la teneur en matière organique totale (sauf certains composés qui ne sont pas dégradés), y compris ceux qui ne sont pas dégradables par les bactéries. C'est donc un paramètre important pour caractériser la pollution globale d'une eau par des composés organiques. La différence entre la DCO et la DBO est due à des substances qui ne peuvent pas être décomposées biologiquement.

Le rapport entre la DBO et la DCO est une mesure indicative de la « dégradabilité » biochimique des composés présents dans l'eau. Le rapport DCO/BOD varie d'environ 2,5 (eaux usées récemment déversées) à 10-20 après décomposition totale (Lisec, 2004). Dans ce dernier cas, l'eau est bien minéralisée. Cependant, en présence de composés toxiques, l'activité biologique est ralentie et, par conséquent, la quantité d'oxygène consommée après 5 jours est moindre. Cela se traduit également par une DCO/BODratio. La DBO et la DCO sont mesurées en mg de O par litre. Le rapport entre la DBO et la DCO est une mesure indicative de la « dégradabilité » biochimique des composants présents dans l'eau. Le rapport DCO/DBO varie d'environ 2,5 (eaux usées récemment déversées) à 10-20 après décomposition totale (Lisec, 2004). Dans ce dernier cas, l'eau est bien minéralisée. Cependant, en présence de composés toxiques, l'activité biologique est ralentie et, par conséquent, la quantité d'oxygène consommée après 5 jours est moindre. Cela se traduit également par un rapport DCO/DBO élevé. La DBO et la DCO sont mesurées en mg d'O₂ par litre.

Les concentrations d'oxygène dissous (OD) sont, avec le pH, l'un des paramètres de qualité de l'eau les plus importants pour la vie aquatique. L'oxygène dissous dans les eaux de surface provient principalement de l'atmosphère et de l'activité photosynthétique des algues et des plantes aquatiques. La concentration varie quotidiennement et selon les saisons car elle dépend de nombreux facteurs tels que la pression partielle d'oxygène atmosphérique, la température de l'eau, la salinité, la pénétration de la lumière, l'agitation de l'eau et la disponibilité des nutriments. Cette concentration d'oxygène dissous est également fonction du taux d'appauvrissement en oxygène dans le milieu dû à l'activité des organismes aquatiques et aux processus d'oxydation et de décomposition de la matière organique présente dans l'eau. Dans l'ensemble, plus la concentration d'oxygène dissous (OD) est proche de la saturation, plus la capacité d'une rivière à absorber la pollution est grande :

- Une valeur inférieure à 1 mg d'O₂ par litre indique un état quasi anaérobie ; cet état se produit lorsque les processus d'oxydation des déchets minéraux, des matières organiques et des nutriments consomment plus d'oxygène que ce qui est disponible ; une faible teneur en oxygène dissous entraîne une augmentation de la solubilité des éléments toxiques qui sont libérés par les sédiments ;
- Une valeur de 1 à 2 mg d'O₂ par litre indique une rivière très polluée mais réversible ;
- Une valeur de 4 à 6 mg d'O₂ par litre caractérise une eau de bonne qualité ; et
- Des niveaux supérieurs à la teneur naturelle en saturation en oxygène indiquent une eutrophisation du milieu qui se traduit par une intense activité photosynthétique ; les espèces de poissons sensibles peuvent être perturbées par une teneur en oxygène inférieure à 4 mg/l ; la concentration

d'oxygène dissous peut également être exprimée en % de saturation en oxygène ; à une température d'environ 15°C, l'objectif de qualité de 50% de saturation en oxygène correspond à une concentration de 5 mg d'O₂ /litre.

Mesure des paramètres de la chimie minérale et de la pollution tertiaire

Les principaux paramètres de la chimie minérale sont la teneur en azote et en phosphore. Ces deux éléments sont des nutriments importants pour les plantes. Les composés qui les contiennent, tels que les phosphates et les nitrates, sont donc essentiels pour les plantes.

Les concentrations de nitrites (NO₂⁻), de nitrates (NO₃⁻), d'ammoniac (NH₃) et d'ammonium (NH₄⁺), de phosphates (PO₃⁻), d'azote (N) et de phosphore (P) sont donc des paramètres importants pour le contrôle de la qualité des eaux de surface. L'Azote "Kjeldahl" représente l'azote organique (par exemple les acides aminés, l'urée) et l'azote ammoniacal. Quant à l'azote "total", il correspond à la somme de l'azote organique, l'azote ammoniacal, les nitrites et les nitrates.



Activités éducatives (exercices et études de cas)

En se fondant sur les informations de base présentées dans le cours et d'autres documents, préparez en groupe de 4-5 personnes un résumé analytique sur les types de pollution des eaux de surface.

1.14 Traitement de l'eau



Objectif

A la fin de la session, l'apprenant sera capable de
Expliquer les différentes techniques de traitement intensif et biologique des eaux usées

Introduction générale

Les procédés de traitement intensif des eaux usées sont conçus pour répondre aux problèmes de pollution grave d'origine industrielle et domestique. Les rejets industriels sont souvent très polluants et toxiques. Les déchets ménagers urbains sont normalement moins toxiques chimiquement, mais ils sont contaminants par leur volume et les risques pathogènes qu'ils présentent. Le nombre de techniques et de dispositifs pouvant être mis en œuvre dans une station conventionnelle est considérable. Leur choix dépend des caractéristiques de l'eau à traiter, du degré de purification souhaité et des ressources financières disponibles.

Les stations d'épuration rustiques (sans équipement électromécanique et sans support d'énergie artificielle) sont très diverses et de conception variée. Il s'agit de techniques dites extensives car elles impliquent de vastes étendues de terre, intégrant des processus de purification dans des écosystèmes naturels plus ou moins développés ou des copies artificielles d'écosystèmes. La connaissance des méthodes de traitement intensif et biologique des eaux usées par les techniciens forestiers est nécessaire pour entreprendre des actions pour réduire les effets de la pollution de l'eau sur les ressources forestières.

Traitement intensif des eaux usées

Les prétraitements comprennent le tamisage, le plâtrage, les bassins d'égalisation, la décantation et la flottation.

Le tamisage est utilisé pour l'élimination des grosses matières en suspension avant tout autre procédé de traitement. Dans le traitement des eaux usées domestiques, des dégrilleurs à barres sont généralement installés à la tête de la station pour retenir les matériaux grossiers. Les dégrilleurs à barres simples sont généralement constitués de grilles métalliques, avec un espacement des barres de 4 à 7 cm, qui peuvent être nettoyées mécaniquement ou manuellement (Radoux, 1999).

Le plâtrage : le sable et les matériaux lourds dont la sédimentation est liée aux particules granulées doivent être rapidement éliminés dans la ligne de traitement afin d'éviter l'abrasion des corps, des pompes et des équipements mécaniques. Un dimensionnement correct devrait éviter le dépôt simultané de matières organiques qui compliquerait la coulée ultérieure du sable. Le choix d'un type de fosse à sable dépendra de la concentration de sable dans l'eau, de la taille de la station et de son coût (Radoux, 1999).

Les bassins d'égalisation ont pour but de réduire les variations des caractéristiques des eaux usées afin de les placer dans les conditions optimales pour les traitements ultérieurs. Le type et la capacité du bassin sont liés au volume d'eau rejeté et au degré de fluctuation des caractéristiques des eaux usées.

La décantation. Les décanteurs peuvent être rectangulaires ou circulaires. Dans la plupart des cas, les décanteurs rectangulaires sont équipés d'un racleur de fond se déplaçant à contre-courant à une vitesse de 0,3m/min.

La flottation est une technique de clarification et d'épaississement, comme la sédimentation gravitationnelle, sauf que les matériaux à retenir sont recueillis en surface, d'où ils sont grattés. La flottation d'air dissous est généralement utilisée pour le traitement des eaux usées, l'élimination des solides en suspension, des

huiles et des graisses, des fibres et d'autres matériaux de faible densité, ou pour l'épaississement des boues activées ou des boues chimiques floculées.

Les traitements secondaires comprennent les lits bactériens, les boues activées, les disques organiques et la fermentation anaérobie.

Lit bactérien, constitué d'une couche de matériau appelée doublure recouverte d'un biofilm sur lequel les eaux usées coulent. Pendant la percolation de l'eau à travers le lit, la matière organique est enlevée par le biofilm : le substrat et l'oxygène se diffusent dans le biofilm où le métabolisme se produit. Les métabolites et le CO₂ se diffusent dans la direction du liquide. Pendant la pénétration dans le biofilm, l'oxygène est consommé en raison de la respiration microbienne, ce qui définit une zone d'activité aérobie ; au-delà de cela cette activité bactérienne est anaérobie.

Boues activées. Un réservoir de boues activées est un réacteur à biomasse continue dans lequel la biomasse est brassée et aérée avec les eaux usées. La biomasse est ensuite séparée dans un décanteur secondaire, alors qu'une partie des boues épaissies est recyclée vers l'aérateur. Le procédé de traitement par boues activées peut fournir un effluent dont le DBO soluble varie de 10 à 30 mg / l ; la CDO résiduelle peut atteindre 500 mg / l, en fonction de la teneur en matière organique inerte des eaux usées. Il est d'abord nécessaire d'éliminer l'eau d'un certain nombre de polluants, tels que les huiles et les graisses.

Disques organiques. Le réacteur est constitué d'un disque en plastique de grand diamètre placé sur un axe horizontal. Le tambour semi-immersé (environ 40%) tourne autour de cet axe. Un biofilm dont l'épaisseur varie de 1 à 4 mm se développe sur les disques. La rotation des disques assure à la fois l'oxygénation et le contact avec les eaux usées. L'excès de biomasse se détache de la même manière que dans les lits bactériens et est séparé dans un décanteur secondaire. L'efficacité des processus dépend essentiellement des éléments suivants :

- la vitesse de rotation des disques ;
- la durée du séjour ;
- le nombre d'étages ; et
- la température

La fermentation anaérobie des composés organiques est un processus très complexe. Il résulte d'un grand nombre de réactions. Dans un digesteur classique à charge lourde, toutes les réactions se produisent simultanément - dans le même réacteur. Lorsque le digesteur est en équilibre dynamique, il n'y a pas d'accumulation de métabolites intermédiaires. Bien qu'un grand nombre de facteurs (composition et concentration du milieu, pH, température, mélange) influent sur la vitesse de réaction, on suppose que la vitesse globale est contrôlée par la vitesse de conversion des acides gras en méthane et en CO₂. Si cet équilibre n'est pas respecté, la digestion est retenue ou arrêtée ; cela conduit à une accumulation d'acides gras volatils. La fermentation anaérobie est utilisée pour le traitement des eaux usées industrielles très chargées. Deux types de mise en œuvre sont utilisés : la méthode de contact anaérobie et le lit bactérien anaérobie.

Le traitement tertiaire comprend l'élimination de l'ammoniac, l'élimination du phosphore, la coagulation et la précipitation, la filtration, l'adsorption sur le charbon actif et l'échange d'ions (Radoux, 1999).

Élimination de l'ammoniac. Dans l'eau contenant de l'azote ammoniacal, les ions d'ammonium et l'ammoniac sont en équilibre :



À pH 7, seuls les ions ammonium (NH⁺) existent en solution, tandis qu'à pH 12, la solution ne contient que de l'ammoniac dissous (NH). Le stripage à l'air de l'ammoniac consiste à amener le pH des eaux usées à 10,5 - 11,5 et à créer un contact entre l'eau et l'air pour évacuer le gaz ammoniac de la solution

(stripping). Des tours de refroidissement conventionnelles sont généralement utilisées pour effectuer cette opération. La soude caustique et la chaux peuvent être utilisées pour ajuster le pH des eaux usées.

Élimination du phosphore. Le phosphore dans ses différentes combinaisons chimiques provoque de graves problèmes dans les rivières et les eaux dormantes qui les reçoivent, en stimulant la croissance des algues (eutrophisation). L'élimination du phosphore peut être réalisée avec succès par des processus physico-chimiques et biologiques.

Coagulation et précipitation. Les matières colloïdales, tant organiques qu'inorganiques, peuvent être éliminées par coagulation qui consiste à ajouter des agents chimiques à une dispersion de colloïdes afin de les déstabiliser pour les collecter sous forme de flocons. La coagulation implique donc, d'une part, la réduction des charges électriques de surface et, d'autre part, la formation d'hydroxydes complexes sous forme de flocons. Les précipitations consistent à former un composé insoluble du polluant dont l'élimination est souhaitée. La coagulation est appliquée, par exemple, pour l'élimination de la turbidité ou la coloration des eaux usées et des précipitations, pour l'élimination des phosphates.

La filtration est utilisée pour éliminer les matières en suspension et sert de prétraitement dans le cas d'une eau mal chargée ou de traitement de finition en aval d'un processus physico-chimique et biologique. Dans les deux derniers cas, il s'agit de purification tertiaire.

Les solides en suspension sont éliminés à la surface du filtre par tamisage et à l'intérieur du filtre par tamisage et adsorption. Les matières en suspension rencontrées dans les eaux usées sont essentiellement variables en termes de dimensions et de charges. Certains d'entre eux échapperont donc au traitement de filtration.

Adsorption sur charbon actif. Les procédés d'adsorption sont utilisés pour l'élimination des matières organiques réfractaires (DCO) dans les traitements tertiaires ou pour l'élimination des matières organiques biodégradables ou non biodégradables dans les chaînes de traitement physico-chimiques.

L'échange d'ions repose sur l'échange d'ions qui peut avoir lieu entre les ions en solution et ceux liés à certaines fonctions chimiques de l'échangeur. Cette technique est utilisée pour éliminer ou remplacer certains ions contenus dans l'eau tels que les ions calcium et magnésium (dureté de l'eau) ou certains ions métalliques (Cr^{6+} , Zn^{2+} , etc.).

La désinfection est le processus par lequel les germes pathogènes sont détruits sous l'action d'agents chimiques ou par d'autres moyens. Il peut être accompli par l'action directe du rayonnement ultraviolet ou de la température. Il est également possible d'utiliser des agents chimiques qui, lorsqu'ils réagissent sur la cellule, induisent des composés toxiques ou des modifications structurelles perturbatrices entraînant la mort de germes pathogènes.

Traitement des boues. La plupart des procédés de traitement normalement utilisés pour contrôler la pollution de l'eau produisent des boues issues d'un procédé de séparation solide-liquide (décantation, flottation) ou résultant d'une réaction chimique (coagulation ou biologique). Ces matériaux subiront un processus de traitement comprenant un épaissement, une déshydratation et une évacuation finale. Les boues organiques peuvent également subir des traitements pour réduire la fraction organique ou les matières volatiles avant l'élimination finale.

Traitement biologique des eaux usées

Les lagunes. Les procédés d'épuration biologique de type extensif comme les lagunes (ou les étangs de stabilisation) sont de plus en plus utilisés dans les situations où les systèmes classiques de traitement des eaux usées et l'assainissement individuel atteignent leurs limites de fonctionnement (Radoux, 1999). Les différentes familles d'une lagune sont : les algues ou microphytes, les bactéries, la microfaune et les poissons (Radoux, 1999).

- Les germes pathogènes contenus dans les effluents domestiques proviennent principalement de la flore microbienne intestinale. Les organismes pathogènes les plus connus sont : la salmonelle responsable de la fièvre typhoïde et de la fièvre paratyphoïde, la shigella responsable de la dysenterie et le vibron responsable du choléra. Le lagunage naturel peut conduire à une réduction très importante des germes pour les raisons suivantes :
- les germes dispersés dans un grand environnement où ils sont laissés longtemps ne trouvent pas de substrat adapté en quantité suffisante et évoluent sous des températures auxquelles ils ne sont pas adaptés ;
- ils sont soumis à une compétition vitale avec des organismes mieux adaptés et des prédateurs de l'érythrocyte ; les phénomènes d'antibiose mis en évidence dans les milieux naturels jouent également un rôle important dans les lagunes ;
- les germes fixés sur les sédiments de matières en suspension au fond de la lagune sont ainsi retirés du milieu liquide ;
- l'action directe des plantes produisant des substances inhibitrices ou bactéricides a été démontrée sur certains macrophytes ; et,
- le rôle germicide du rayonnement ultraviolet est bien connu ; il affecte essentiellement la couche superficielle des lagunes qui est constamment renouvelée par les courants de convection.

Prairies avec des hydrophytes flottants ou libres. Les étangs sont peu profonds et rapidement colonisés par les plantes et l'environnement est stable et homogène. La couverture végétale empêche toute croissance excessive d'algues et maintient les températures stables. Les matières en suspension se déplacent verticalement et sont sédimentées, les racines limitant le mouvement horizontal. L'oxygène est fourni au milieu par les plantes (feuilles, tiges et racines aquatiques). La végétation est colonisée par une communauté complexe de micro-organismes (zooplancton et microfaune). L'amélioration significative de la qualité de l'eau concerne principalement les matières en suspension et la charge organique. Le temps de rétention est court, l'assimilation est rapide. Le système est compatible avec le traitement des effluents d'une lagune naturelle ; le coût financier est intéressant.

Activités éducatives (exercices et études de cas)

Sur la base des informations de base présentées dans le cours et d'autres informations tirées de la littérature, préparer en groupe de 4-5 un résumé analytique des méthodes de traitement des eaux usées les plus intéressantes en foresterie.

1.15 Physico-chimie des sols

1.15.1 Pollution du sol et remède



Objectifs

A la fin de la session, l'apprenant sera en mesure de

1. Analyser les sources de pollution des sols, les mécanismes de diffusion des polluants,
2. Décrire les différentes méthodes de décontamination mécanique et biologique des sols.

Introduction générale

Les activités industrielles et l'agriculture moderne sont des sources de pollution des sols. D'autres sont des pratiques inadéquates de gestion des déchets (décharges incontrôlées, remblais de déchets miniers ou industriels) ou la pollution accidentelle (déversement de produits dangereux, fuite de réservoirs).

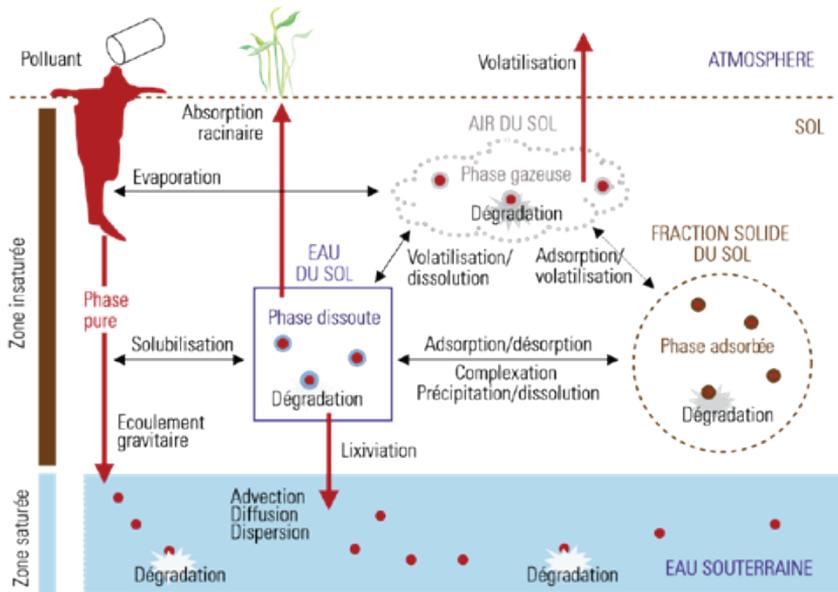
La gestion des sols pollués est nécessaire car ils sont nocifs pour l'environnement (sol, eaux de surface, nappes phréatiques, végétation, air), présentent un risque pour la santé ou dégradent le cadre de vie.

La connaissance des principales techniques de traitement d'un site pollué par des techniciens forestiers est nécessaire pour conseiller des actions d'intervention en cas de pollution des sols en zone forestière.

Sources de pollution des sols

Pollution des sols par l'agriculture moderne. Les sols peuvent être pollués par des substances minérales et des composés organiques synthétiques. Le soufre toxique et les composés ammoniacaux résultant de la fermentation anaérobie des déchets solides d'origine agricole contaminent de plus en plus le sol. Les engrais chimiques et les pesticides peuvent polluer irréversiblement les sols cultivés. Il y a souvent une dispersion systématique de quantités accrues de pesticides dans l'espace agricole rural.

Pollution par les contaminants industriels. La pollution des sols peut provenir du transfert de contaminants dans le sol suite à l'utilisation de combustibles fossiles, des industries minières, métallurgiques et chimiques. Il existe également des sources de pollution ponctuelle par les déchets industriels (déchets chimiques dangereux).



Source : SITEREM cité par Schadeck, 2007

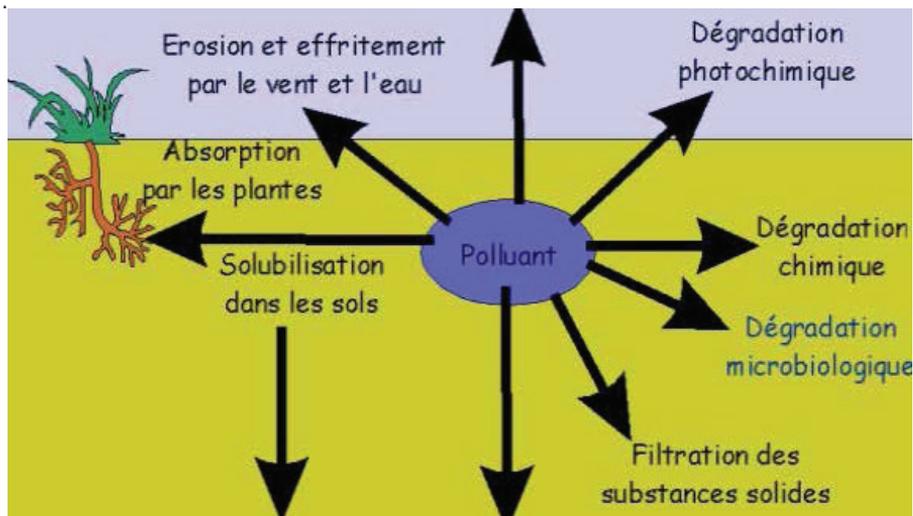


Figure 15 a + b. Devenir des polluants dans le sol.

Source : http://www.ecosociosystemes.fr/pollution_diffuse_sols.html

Mécanismes de diffusion des polluants

La figure 15 (a + b) ci-dessus montre les processus qui influencent le comportement et la migration des contaminants dans les sols. Ce sont essentiellement (Schadeck, 2007):

- les réactions d'échange (volatilisation, adsorption-désorption, complexation, dissolution-précipitation) entre les phases solides (constituants minéraux et organiques du sol), liquide (eau interstitielle) et gazeuse (porosité non remplie d'eau);
- les réactions de dégradation : photolyse, hydrolyse chimique, biodégradation; et

- les phénomènes de transfert de polluants et de leurs produits de dégradation: à l'atmosphère par volatilisation, aux eaux de surface par ruissellement, aux eaux souterraines par lixiviation ou écoulement gravitaire (polluants immiscibles à l'eau liquide), aux plantes par absorption racinaire.

Pour un polluant donné, le résultat de ces processus dépend :

- des propriétés intrinsèques (solubilité, volatilité, hydrophobicité, stabilité, densité, viscosité);
- des caractéristiques du sol (teneur en minéraux argileux, teneur en matière organique, pH, porosité, activité biologique, etc.);
- de l'hydrogéologie (profondeur de la nappe phréatique, conductivité hydraulique, sens des écoulements); et
- des conditions locales (précipitations, topographie, couverture végétale).

Les résultats des processus de diffusion déterminent le devenir des polluants dans le sol : persistance, biodisponibilité, accumulation préférentielle dans certains horizons du sol, immobilisation de la biomasse, vitesse de migration dans le profil, capacité à atteindre les eaux souterraines (Schadeck, 2007).

Encadré 12. Effets de la pollution des sols

Altération du cycle de l'azote par l'utilisation d'engrais; augmentation du flux d'azote due à l'activité humaine et non dénitrification de toutes les quantités de nitrates introduites; rupture de l'équilibre entre nitrification et dénitrification dans la biosphère; accumulation de nitrate en excès dans l'hydrosphère à la suite de la lixiviation et du ruissellement de surface des sols fertilisés; augmentation du taux naturel de phosphate circulant entre la lithosphère, le sol et l'hydrosphère; immobilisation de la majorité du phosphore utilisé comme engrais chimique dans les sols en raison de leur richesse en calcium, en aluminium et en fer qui se lient au phosphore; induction des phénomènes d'eutrophisation dans les eaux intérieures par une partie du surplus de phosphore drainé dans ces eaux; toxicité étendue pour les espèces animales et végétales; persistance de polluants dans les différents compartiments de l'environnement; contamination des parties aériennes des plantes et des sols par des résidus de traitements aux pesticides; changements biocénotiques dus à l'élimination d'une espèce dominante dans une communauté; pollution désastreuse des aquifères souterrains par infiltration; risque pour la santé humaine.

Différentes méthodes de décontamination mécanique et biologique

Méthodes mécaniques de dépollution in situ

L'évacuation des pollutions par ventilation de la zone insaturée est une technique éprouvée, largement commercialisée et appliquée depuis de nombreuses années, notamment pour la réhabilitation de sites pétroliers ou pétrochimiques. Il permet d'extraire les polluants volatils en dépressurisant la zone insaturée. Les composés volatils déversés dans le sol s'évaporeront jusqu'à saturation des pores. La dépressurisation de chaque point d'extraction induit une circulation d'air et provoque un renouvellement de l'air pollué dans les pores du sol. Ce renouvellement d'air a pour conséquence de modifier les équilibres chimiques entre les différentes phases présentes (air, eau, sol). Ainsi, lors de son passage dans la zone contaminée, l'air se « charge » de contaminants. Le déplacement à l'équilibre des phases permet de dépolluer les phases solides et gazeuses de la zone insaturée. Les vapeurs sont récupérées via les points d'extraction puis traitées en surface (Khan et al., 2004).

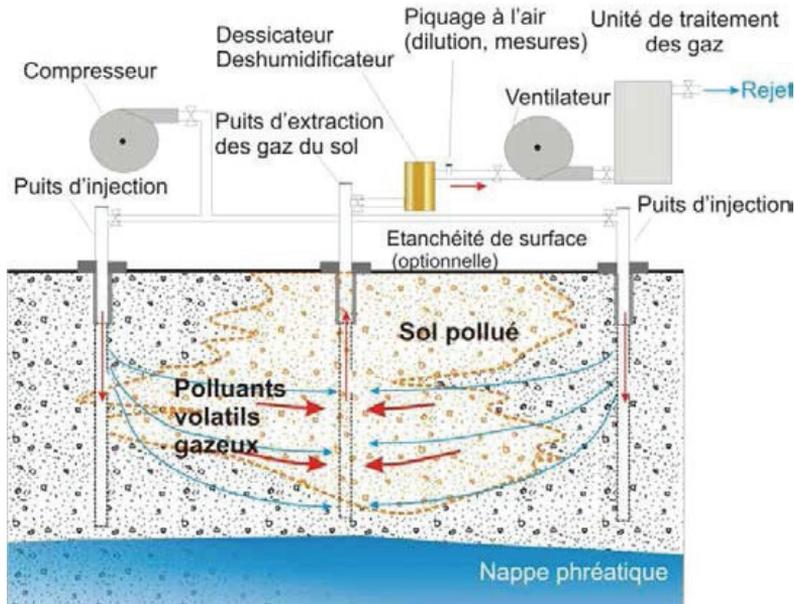


Figure 16. Schéma de la ventilation.

Source : BRGM, 2010.

L'évacuation des pollutions par extraction biphasée consiste à exercer une dépression importante dans la zone insaturée, au niveau de la frange capillaire et au niveau de la partie supérieure de la zone saturée, afin d'extraire les gaz du sol, le surnageant (dans le cas des produits flottants) et la phase dissoute. Les liquides et les gaz extraits sont séparés et traités (BRGM, 2010).

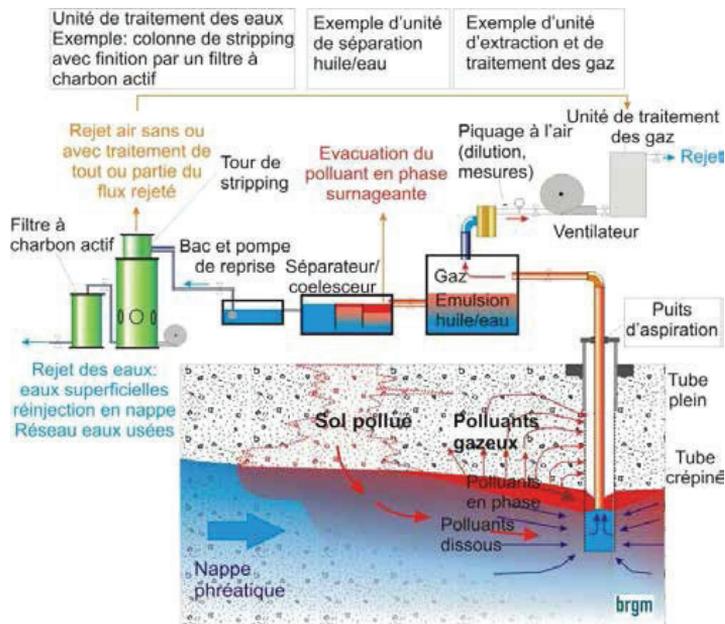


Figure 17. Schéma du principe d'extraction à deux phases.

Source : BRGM, 2010

L'évacuation de la pollution par bullage consiste à injecter de l'air dans les eaux souterraines pour favoriser la volatilisation des polluants qui seront extraits de la zone non saturée et traités sur place (Khan et al., 2004). Cet air, traversant la zone saturée et remontant vers la surface, crée des canaux d'air qui entrent en contact avec les polluants dissous ou adsorbés, ce qui permet leur volatilisation. L'air se charge alors de polluants et est évacué via des puits d'extraction positionnés en alternance avec les puits d'injection vers le système de traitement des gaz.

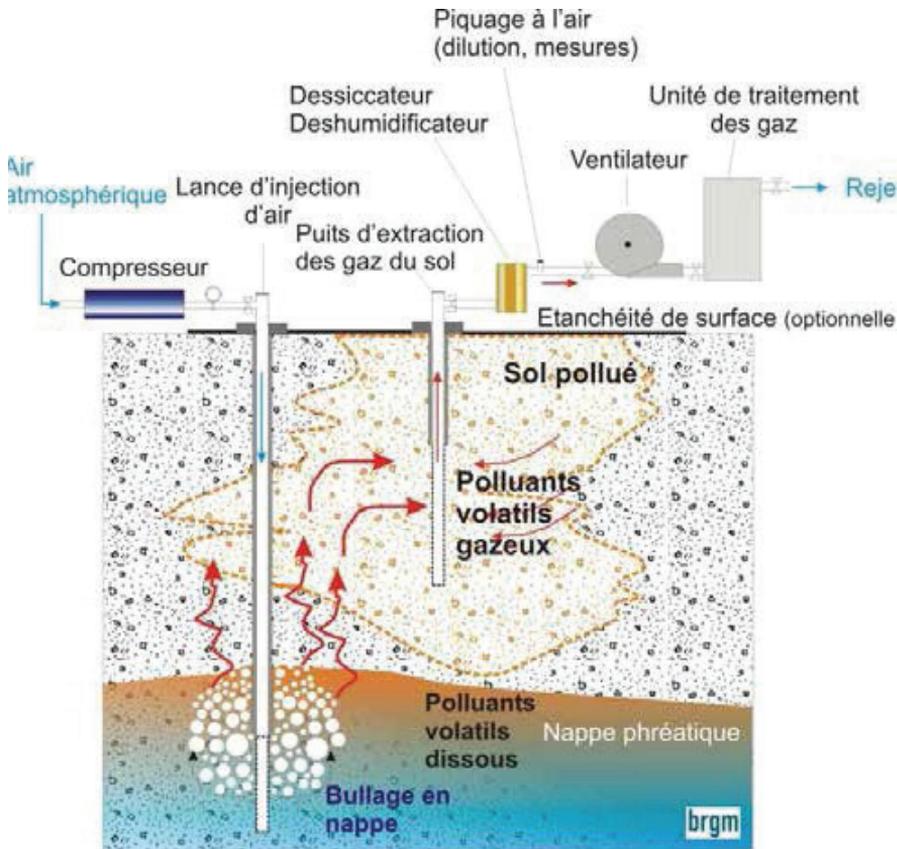


Figure 18. Schéma de principe du bouillonnement couplé à la ventilation.

Source : BRGM, 2010

L'évacuation des pollutions par pompage et traitement permet d'extraire les polluants organiques ou inorganiques en phase dissoute dans la zone saturée et la frange capillaire et les diriger vers des points d'extraction pour leur traitement. Un pliage en un ou plusieurs points de la feuille est alors créé (augmentation du gradient hydraulique). Cette technique traite le panache plutôt que la source de pollution. Il est donc conseillé de traiter, si possible, la source de pollution au préalable. La circulation d'eau induite par le pompage permet de renouveler l'eau dans les pores de la zone saturée. Les équilibres de phases sont alors déplacés. L'eau traversant une zone polluée deviendra polluante et les concentrations de polluants adsorbés sur la matrice solide (dans les zones capillaires et saturées) et présents sous forme gazeuse (zone non saturée) diminueront légèrement (BRGM, 2010).

Avant l'installation du traitement, il sera nécessaire de trouver une sortie pour l'eau pompée. Le choix du point de décharge est primordial. Selon le contexte environnemental, les débits pompés et les autorisations administratives, les rejets peuvent être effectués à certaines concentrations dans les réseaux d'assainissement, les systèmes d'eaux pluviales, les eaux de surface, les eaux souterraines (réinjection), dans certains cas dans des installations d'élimination agréées (BRGM, 2010).

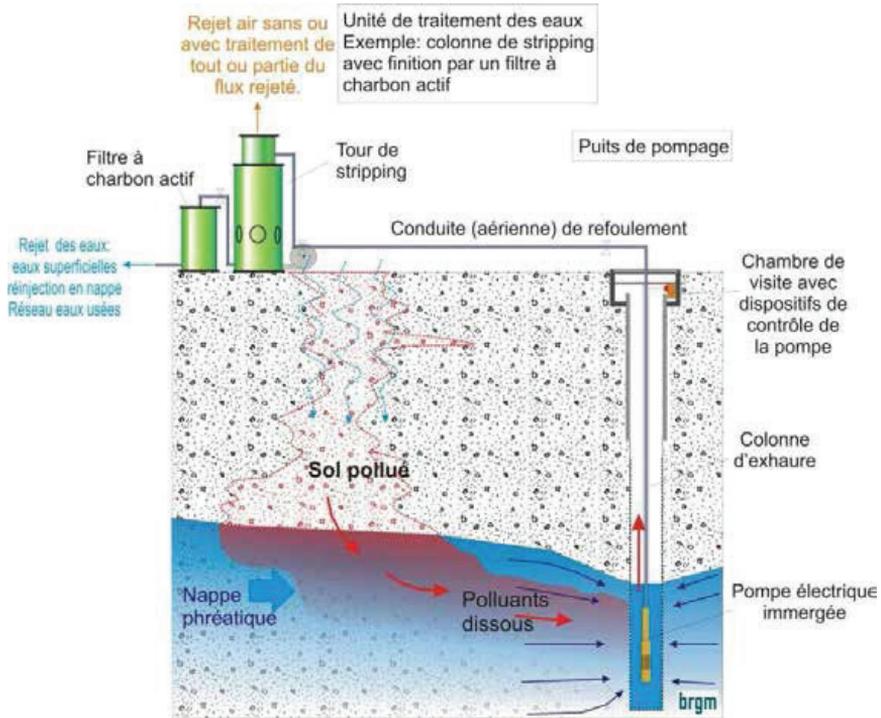


Figure 19. Principe de pompage et schéma de traitement.

Source : BRGM (2010)

Évacuation de la pollution par pompage de l'écémage. En présence de surnageant, l'eau souterraine est pompée, ce qui génère un cône effilé. Les produits en phase pure accumulent la gravité au centre de ce cône facilitant leur récupération en surface (BRGM, 2010).

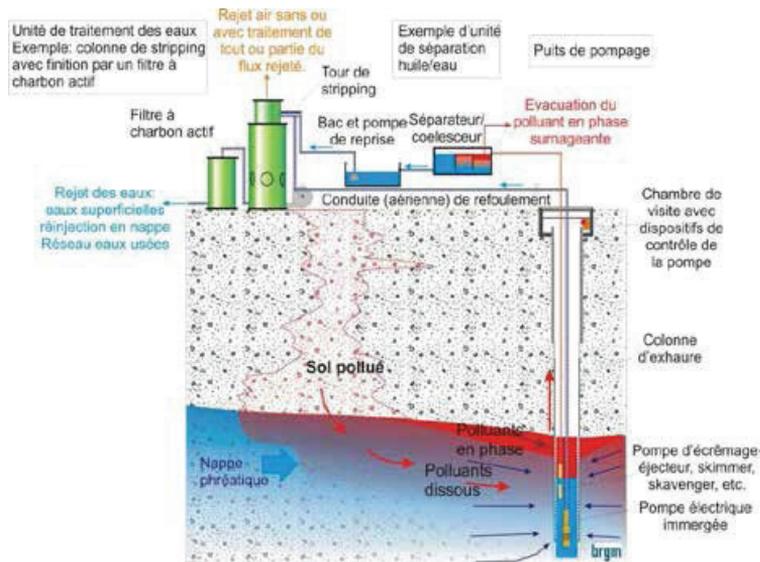
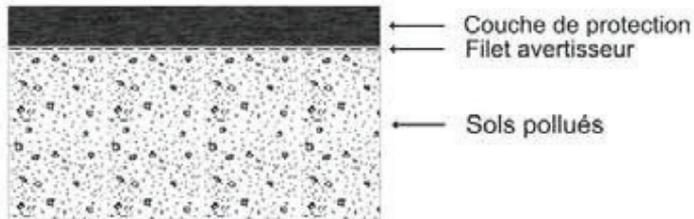


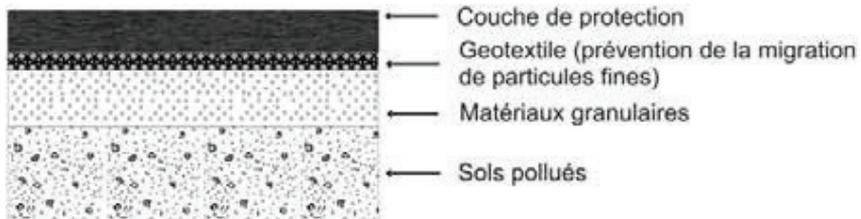
Figure 20. Schéma de l'écémage par pompage.

Source : BRGM (2010)

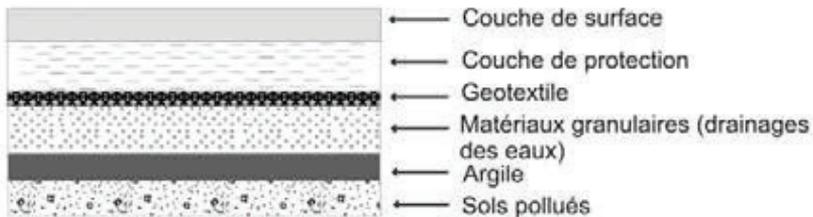
Le piégeage de la pollution par confinement et scellement vise à empêcher l'écoulement des eaux souterraines du site contaminé. Cette technique consiste à isoler les contaminants de manière à empêcher leur propagation de manière pérenne. Le choix des mesures à mettre en œuvre dépend des conditions particulières de chaque cas (nature et étendue de la contamination, caractéristiques géologiques, hydrogéologiques et hydrologiques du terrain). Ces mesures de confinement doivent être durables dans le temps et adaptées aux usages du site (BGRM, 2010)



Couverture pour prévenir la remontée de pollution



Couverture pour prévenir la pollution des eaux souterraines



Couverture pour collecter les émanations gazeuses

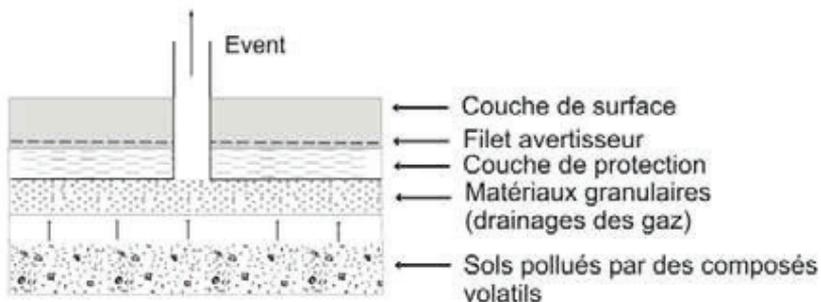


Figure 21. Exemple de différents types de chevauchement de sites pollués.

Source : BGRM (2010)

- Le piégeage de la pollution par confinement vertical consiste à isoler les contaminants afin d'empêcher leur propagation de façon pérenne en implantant le confinement à la périphérie, en aval ou en amont de la source de pollution. L'objectif poursuivi est multiple :
- l'établissement d'une barrière entre la source de pollution et les eaux souterraines et de surface ; et renforcer la stabilité mécanique du stockage des polluants.

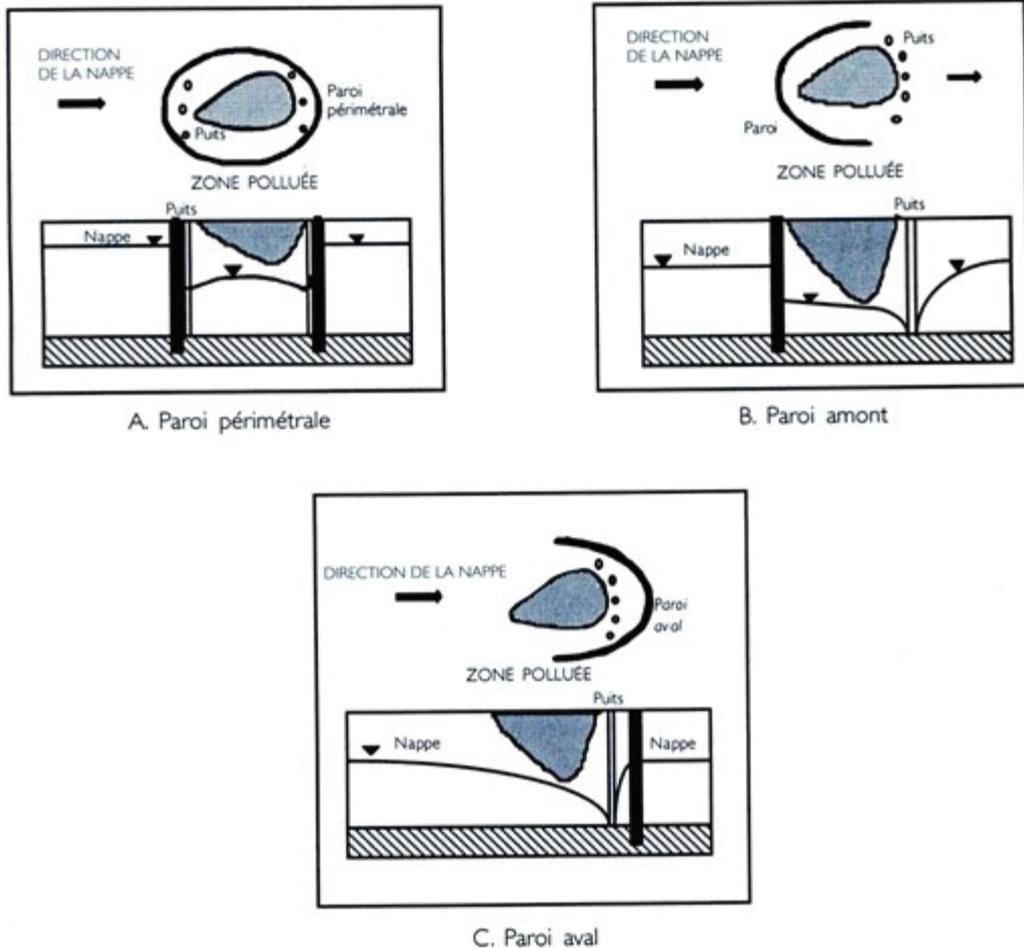


Figure 22. Exemple de confinement vertical associé au pompage

Source : ADEME (1999) cité par BGRM (2010)

Le confinement hydraulique de la pollution consiste à maintenir les eaux souterraines polluées dans un espace prédéfini afin de ne pas générer de pollution en aval. Ce confinement peut être effectué de façon active (par pompage) ou passive (par des tranchées de drainage) (BGRM, 2010).

Le pompage permet d'extraire les eaux souterraines ainsi que les polluants organiques ou minéraux en phase dissoute dans la zone saturée et la frange capillaire et de les diriger vers des points d'extraction pour traitement. Un pliage en un ou plusieurs points de la tôle est alors créé (augmentation du gradient hydraulique).

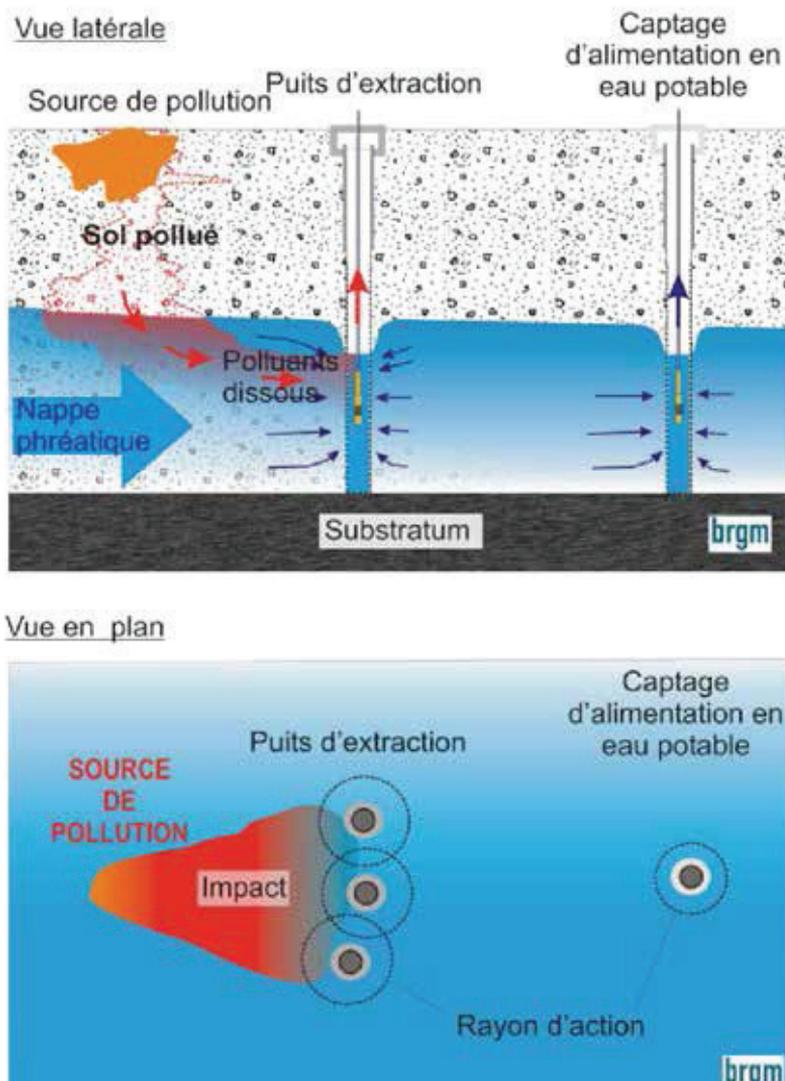


Figure 23. Exemple de piégeage hydraulique actif (pompage).

Source : BRGM (2010)

Contrôle de la pollution par solidification/stabilisation. Le but de cette technique est de piéger les polluants afin de réduire leur mobilité. Les polluants sont soit liés physiquement et inclus dans une matrice stabilisée, soit liés chimiquement.

- L'ajout des adjuvants nécessaires à la solidification et à la stabilisation in situ peut être appliqué de deux façons différentes :
- le mélange mécanique in situ (sous pression et rotatif) ; et,
- l'injection forcée d'un fluide à haute énergie cinétique pour détruire le terrain et le mélanger avec du ciment pour la stabilisation (BGRM, 2010).

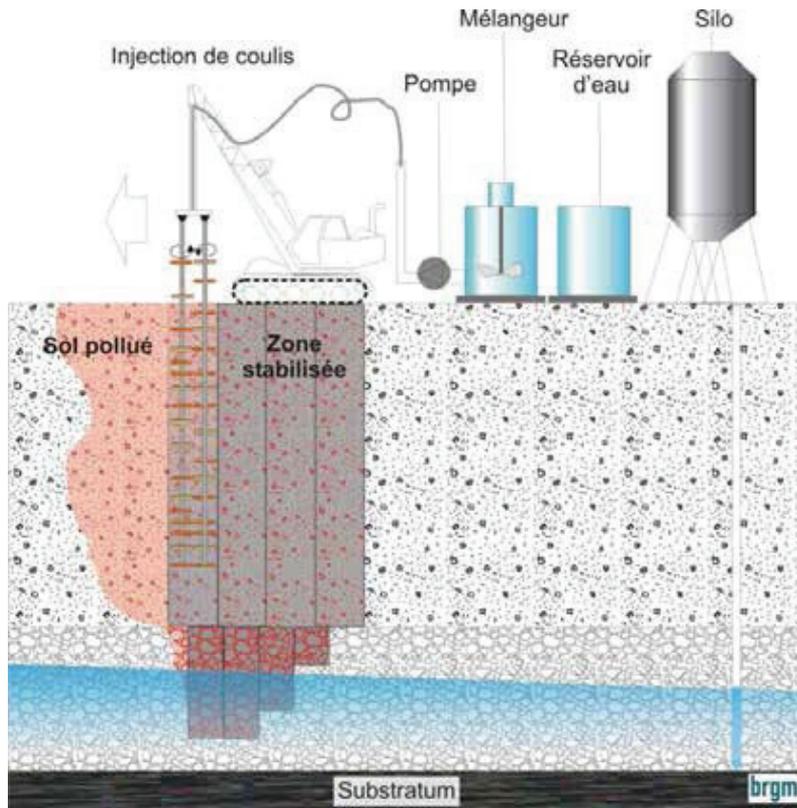


Figure 24. Schéma du principe de mélange mécanique.

Source : BRGM (2010)

Méthodes de décontamination biologique in situ. La majorité des traitements biologiques in situ font appel à des microorganismes, principalement des bactéries, afin de dégrader totalement ou partiellement les polluants (BRGM, 2010).

La biodégradation dynamique nécessite l'ajout de composés spécifiques dans les sols ou les eaux souterraines afin de créer des conditions favorables à l'activité des microorganismes responsables de la biodégradation des contaminants. Pour ce faire, les microorganismes sont maintenus dans des conditions optimales (oxygène, pH, température, potentiel d'oxydoréduction) et des nutriments sont ajoutés sous forme liquide. Les composés qui peuvent être ajoutés dans une zone insaturée ou saturée sont indiqués dans le tableau suivant.

Tableau 5. Composés utilisés dans la biorestauration

Actions	Exemple	Mécanisme impliqué
Bi-augmentation	Insémination avec des bactéries non endogènes	<ul style="list-style-type: none"> Oxydation aérobie (directe ou par co-métabolisme) Réduction anaérobie (directe ou co-métabolique)
Ajout de nutriments	Ajout d'azote, de phosphates ou d'autres facteurs de croissance qui peuvent être déficients dans le milieu	<ul style="list-style-type: none"> Oxydation aérobie (directe ou par co-métabolisme) Réduction anaérobie (directe ou co-métabolique)
Ajout de donneurs d'électrons	Ajout de substrat tel que toluène, propane, méthane	Oxydation aérobie (co-métabolisme)
	Ajout d'hydrogène, d'une source d'hydrogène ou d'un composé de libération d'hydrogène (HRC)	Réduction anaérobie (directe ou par co-métabolisme)
Ajout d'accepteurs d'électrons	Ajout d'oxygène par bioventilation, biosparge ou une source d'oxygène telle que le composé de libération d'oxygène	Oxydation aérobie (directe)
	Ajout de nitrates	Réduction anaérobie (co-métabolisme)

Les sources : ITRC (1998) ; Leeson (1999) ; Sewell (1998) ; U.S. Air Force (1998)

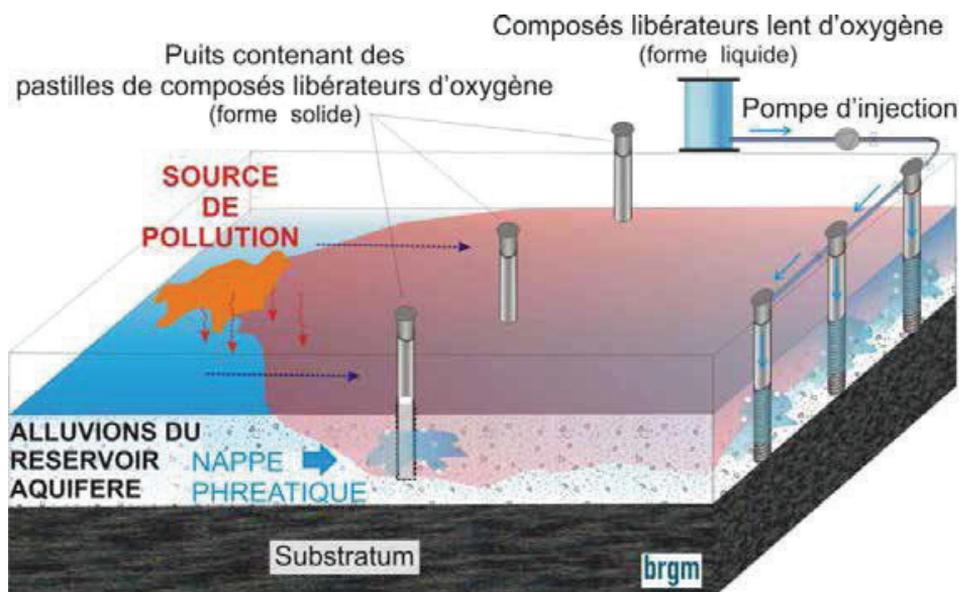


Figure 25. Diagramme schématisé de la biodégradation dynamique in situ.

Source : BRGM (2010)

La *bioventilation* est un traitement biologique aérobie qui consiste à stimuler la biodégradation des polluants dans la zone non saturée en fournissant de l'oxygène tout en injectant de l'air à travers des puits d'injection (figure 26).

Le *biosparging* est un traitement biologique aérobie qui stimule la biodégradation dans la zone saturée et la zone capillaire en fournissant de l'oxygène (figure 27). Il est souvent associé à la bioventilation.

L'*atténuation naturelle contrôlée* est un processus naturel dans les sols et les eaux souterraines sans intervention humaine pour réduire la masse, la toxicité, la mobilité, le volume ou la concentration des contaminants dans ces environnements. Les processus considérés sont : la dispersion, la dilution, la volatilisation, l'adsorption, les mécanismes de stabilisation ou de destruction des polluants, qu'ils soient physiques, chimiques ou biologiques (US EPA, 1997) (figure 28). La technique comprend au moins l'un des éléments suivants : un processus destructeur et / ou un processus de séquestration (par exemple adsorption).

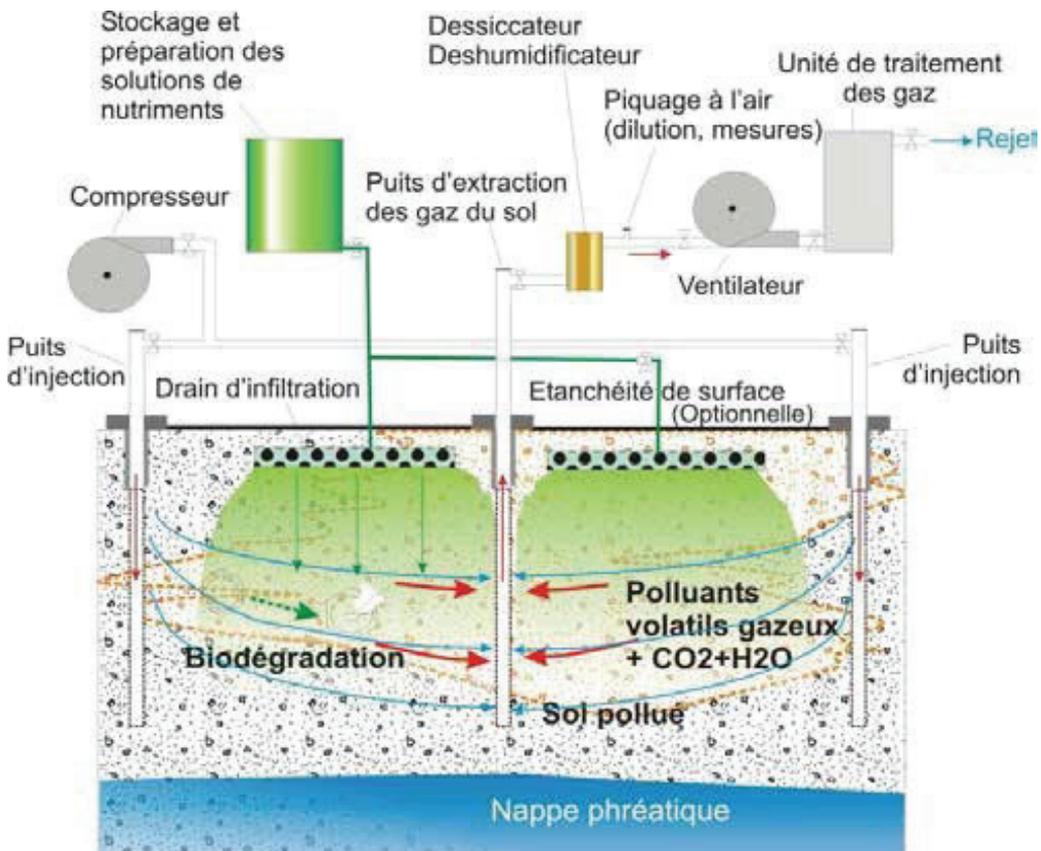


Figure 26. Schéma du principe de la bioventilation.

Source : BRGM (2010)

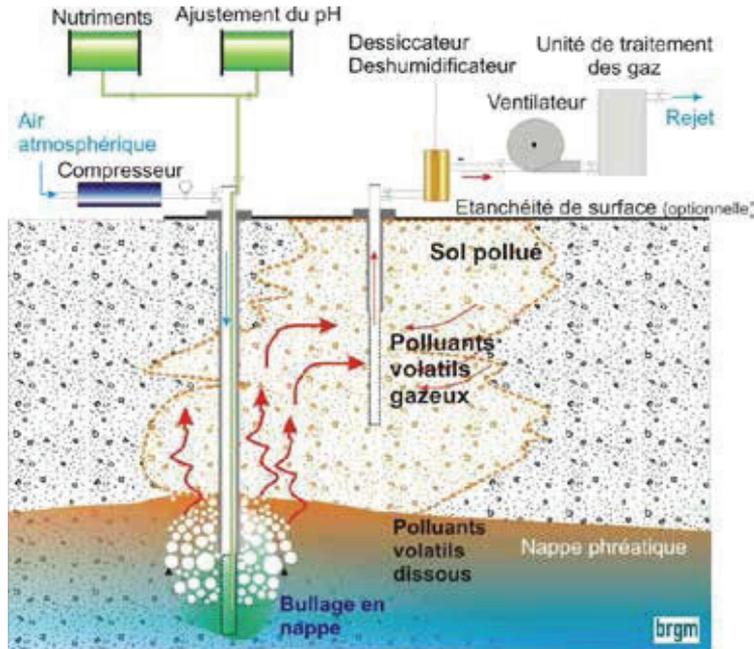


Figure 27. Schéma du biosparging.

Source : BRGM (2010)

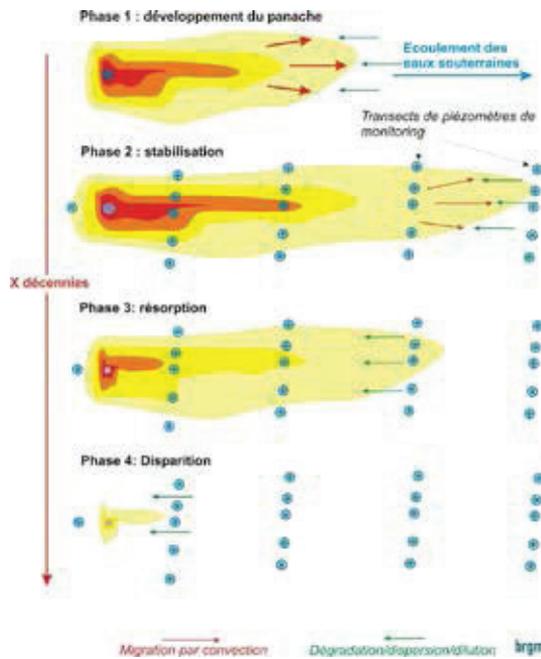


Figure 28. Cycle de vie d'un panache soumis à une atténuation naturelle.

Source : Adapté de Sinke et Le Hécho (1999) par le BRGM (2010)

La *phytoremédiation* consiste à utiliser des plantes pour traiter les sous-sols par dégradation, transformation, volatilisation ou stabilisation. En général, les composés inorganiques sont immobilisés ou extraits tandis que les composés organiques sont dégradés (BRGM, 2010) (figure 29).

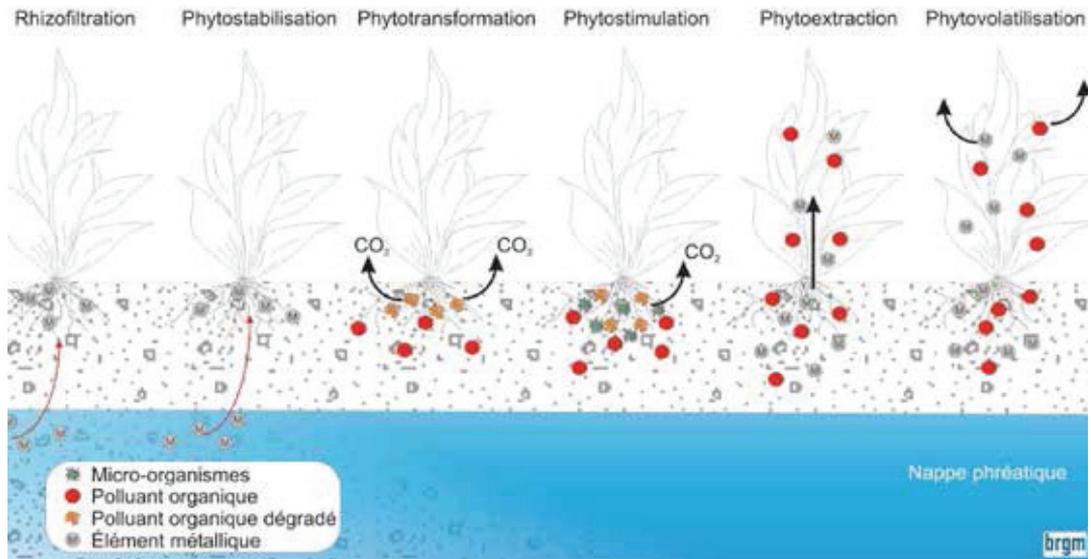


Figure 29. Exemples de différents types de phytoremédiation.

Source : BRGM (2010)

Méthodes mécaniques de contrôle de la pollution ex situ

Évacuation de la pollution par l'excavation des sols. Le processus d'excavation est généralement effectué une fois que la source de pollution est délimitée par des enquêtes et analyses sur le terrain. C'est le moyen le plus simple, le plus radical et le plus rapide pour éliminer une source de pollution. Le sol contaminé excavé doit être traité / confiné sur ou hors site (Figure 30).

Élimination de la pollution par tri granulométrique. Cette technique permet de séparer les différentes fractions des sols. Les fractions fines qui représentent les fractions les plus polluées sont ainsi isolées avant traitement (figure 31).

L'évacuation de la pollution par lavage à l'eau est un procédé couramment utilisé après le tri granulométrique. Les contaminants adsorbés sur les particules fines, préalablement séparés des particules grossières, sont transférés dans la phase aqueuse (ou solution d'extraction). Cette solution polluée est ensuite traitée. Afin d'augmenter le transfert de polluants des particules fines vers l'eau, les agents chélateurs, les ajustements de pH, les ajouts de surfactants (appelés extraction chimique) sont couramment utilisés (BRGM, 2010) (figure 32).

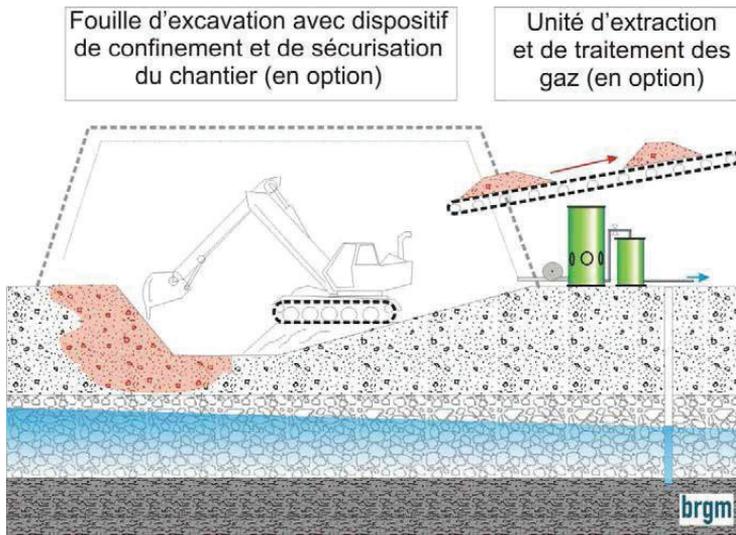


Figure 30. Schéma du principe d'excavation.

Source : BRGM (2010)

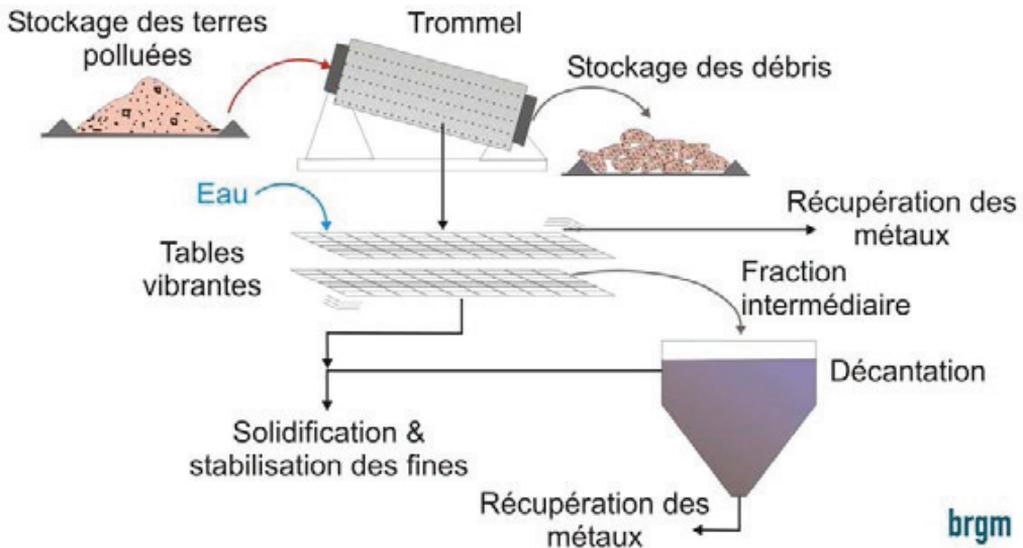


Figure 31. Schéma du tri granulométrique.

Source : BRGM (2010)

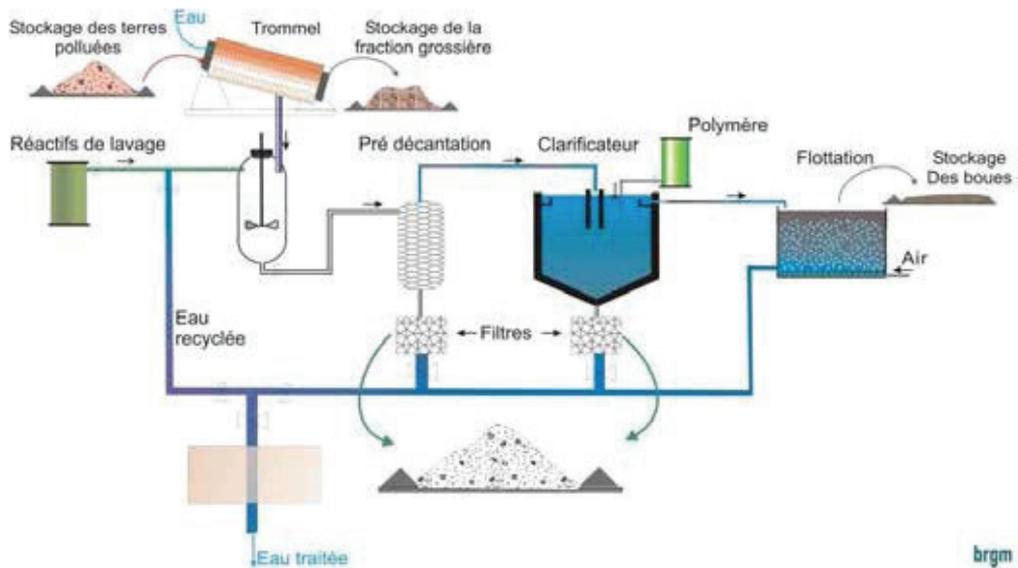


Figure 32. Schéma de principe du lavage ex situ.

Source : BRGM (2010)

Méthodes biologiques de contrôle de la pollution ex situ

Bioréacteur. Cette technique consiste à mélanger des sols pollués avec de l'eau et divers additifs afin de mettre les particules de sol en suspension dans l'eau et de former un mélange boueux. Cela permet donc un meilleur contact polluant / microorganismes et facilite également le fonctionnement enzymatique. Ensuite, les boues sont traitées biologiquement dans des bioréacteurs puis déshydratées (BRGM, 2010) (Figure 33).

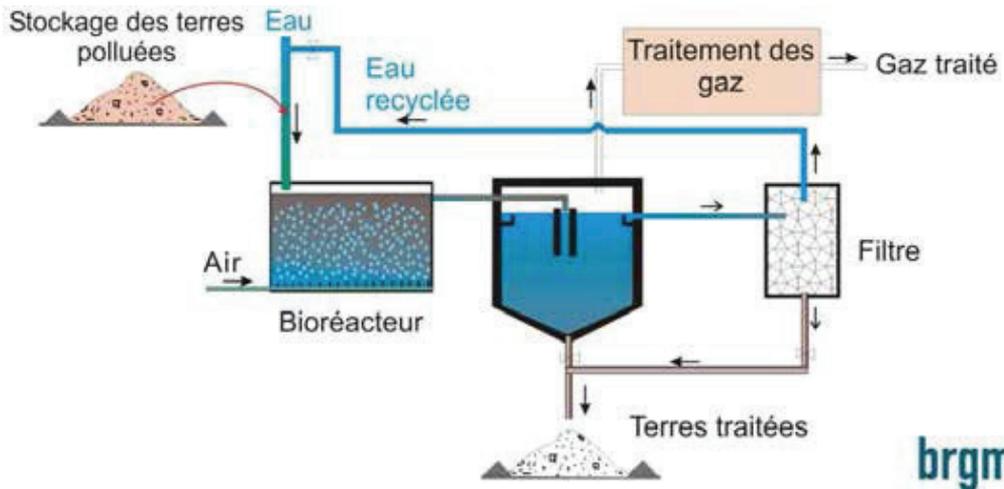


Figure 33. Schéma d'un bioréacteur.

Source : BRGM (2010)

Biopile. Il s'agit de mettre les sols pollués en tas pour un traitement biologique. Le processus exige une excavation préalable. Les sols contaminés sont mélangés à un amendement (agent structurant) et sont ensuite dirigés vers une zone de traitement contenant, au minimum, un système de collecte des lixiviats et des unités de ventilation (extraction ou insufflation d'air) afin d'optimiser le transfert d'oxygène et la stimulation de la biodégradation (BRGM, 2010) (Figure 34).

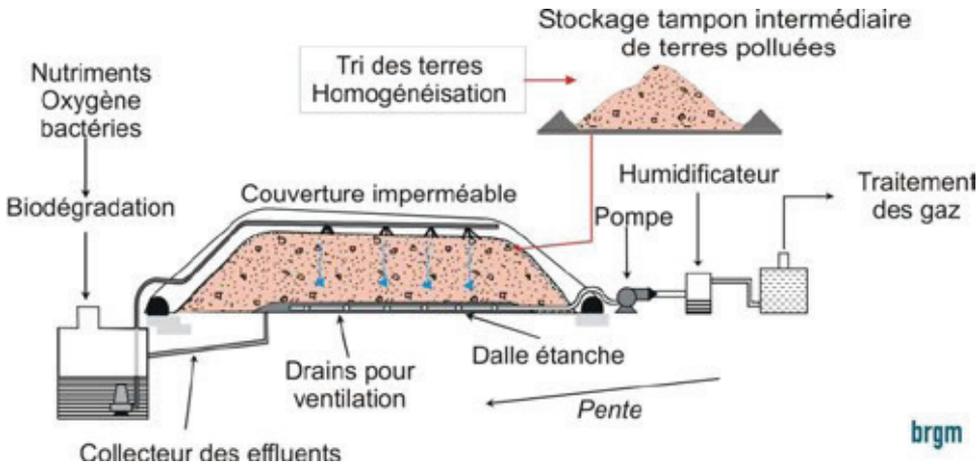


Figure 34. Schéma de la biopile.

Source : BRGM (2010)

Le compostage. Cette technique consiste à mélanger le sol excavé avec des amendements organiques (appelés compost) et à les disposer en piles trapézoïdales (andains) régulièrement espacées pour favoriser la biodégradation (figure 35).

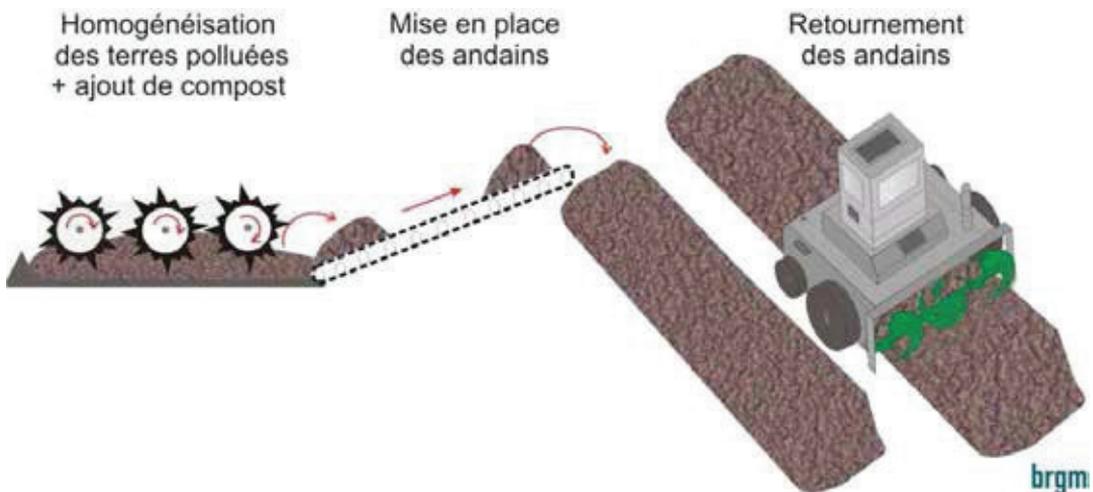


Figure 35. Schéma du compostage.

Source : BRGM (2010)

Landfarming. La méthode consiste à épandre un sol pollué sur une couche mince sur un support imperméable et à favoriser, par des techniques agricoles conventionnelles, leur biodégradation aérobie (Figure 36).

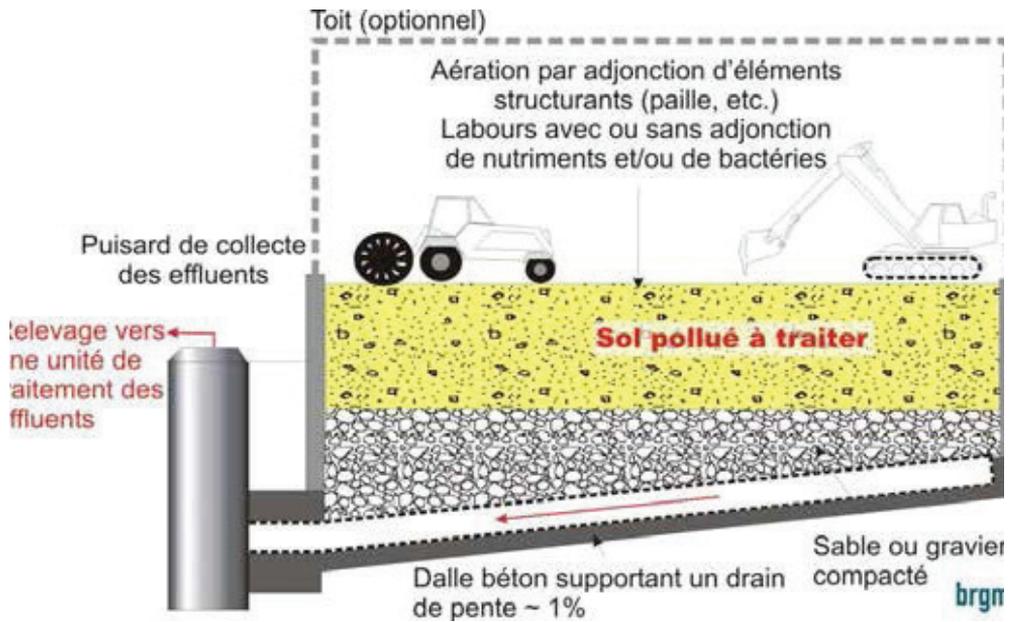


Figure 36. Schéma de principe de l'exploitation des terres.

Source : BRGM (2010)



Activités éducatives (exercices et études de cas)

- Sur la base des informations présentées dans le cours et celles de la littérature, préparer par groupes de 4-5 une fiche technique sur les différentes méthodes de traitement mécanique et biologique des sols pollués.
- Décrire les techniques utilisées et expliquer leurs principes de fonctionnement.

1.16 Dégradation et réhabilitation des terres dégradées



Objectif

A la fin de la session, l'apprenant sera capable de Analyser le concept de mécanismes de dégradation des terres et les mesures de restauration.

Introduction générale

Les processus de dégradation des terres et de désertification⁷ sont le résultat à la fois des activités humaines et de la variabilité du climat (PNUE, 2008). La moitié des terres arables dans le monde sont dégradées par l'érosion due à l'eau, au vent ou aux dommages chimiques (acidification, salinisation) et aux pratiques agricoles. Environ 25 % des terres arables du monde sont menacées par la désertification.

Dans les pays africains, il serait important de former des acteurs qualifiés capables d'identifier, de développer et de promouvoir des pratiques culturelles qui réduisent les émissions agricoles et séquestrent le carbone tout en aidant à augmenter les rendements et à améliorer les moyens de subsistance des agriculteurs. Cela permettrait également de saisir des crédits de carbone dans le cadre des mécanismes qui ont émergé depuis le Protocole de Kyoto.

Érosion éolienne et hydrique

L'érosion hydrique est un mécanisme naturel qui entraîne les particules du sol de haute altitude vers les zones plus basses où elles sédimentent en fonction du débit et de la densité de l'eau (Villeneuve, 1998). L'étendue de l'érosion hydrique dépend de l'intensité des précipitations et du ruissellement, de l'érosion du sol, de la pente et de la longueur, des cultures et de la végétation, et des pratiques culturelles (Ritter, 2015).

L'érosion éolienne peut entraîner des pertes de terres considérables. Il existe trois modes de déplacement des particules de sol : la suspension (élévation des fines particules de sol en hauteur et transport sur de longues distances), la salaison (élévation des particules moyenne et fine sur de courtes distances et déplacement par petits bonds successives) et le roulement (roulement de grosses particules à la surface du sol). Le mode varie en fonction de la taille des particules et de l'énergie éolienne (Ritter, 2015).

Les conséquences de l'érosion n'ont pas toutes la même importance ni la même durée dans le temps. Un taux d'érosion important sur un sol très épais n'a pas les mêmes impacts temporels qu'un même taux d'érosion sur un sol plus fin. Dans le premier cas, le sol peut rester fertile et productif pendant des décennies, tandis que dans le second, les effets de l'érosion peuvent se faire sentir très rapidement en quelques années seulement. L'érosion des sols est responsable d'une perte de production de quelque 20 millions de tonnes de céréales. Les terres arables sont limitées. En Egypte, par exemple, il ne représente que 3% de la superficie du pays.

Perte de la fertilité du sol

La dégradation des terres fait référence à la réduction de la capacité d'une terre à produire de la nourriture ou d'autres matériaux naturels. On estime que 65% des terres agricoles africaines sont dégradées en

⁷ Planète terre, Pertes de terres agricoles rendues incultivables du fait de l'érosion : <http://www.planetoscope.com/cereales/13-pertes->

raison de l'érosion et / ou des dommages chimiques et physiques. 31 % des pâturages d'Afrique et 19 % des forêts et des zones boisées sont également considérés comme dégradés (FAO, 2005).

Les changements dans la productivité des terres peuvent être positifs (par l'irrigation ou la fertilisation des sols) ou négatifs (par la pollution ou l'érosion). Avec la conversion des terres, les changements de productivité peuvent être naturels ou induits par l'activité humaine. Les préoccupations suscitées par l'évolution de l'environnement en Afrique reflètent également des changements négatifs dans la productivité des terres en raison de la dégradation des terres et de la désertification (PNUE, 2008).

La baisse de la fertilité du sol (également décrite comme une baisse de la productivité du sol) est une détérioration des propriétés chimiques, physiques et biologiques du sol (FAO, 2003). Outre l'érosion des sols, les principaux processus impliqués sont :

- réduction de la teneur en matière organique et de l'activité biologique du sol ;
- dégradation de la structure du sol et perte d'autres qualités physiques du sol ;
- disponibilité réduite de nutriments clés (N, P, K) et d'oligo-éléments ; et
- toxicité accrue due à l'acidification ou à la pollution.

Restauration mécanique et biologique des terres

Inverser la dégradation des ressources biologiques, des sols et de l'eau et améliorer la production agricole et animale grâce à des pratiques appropriées d'utilisation et de gestion des terres sont des éléments clés pour garantir la sécurité alimentaire et des moyens de subsistance durables. Les efforts visant à restaurer la productivité des sols dégradés doivent être associés à d'autres mesures qui affectent les pratiques d'utilisation des terres, en particulier l'agriculture de conservation, les bonnes pratiques agricoles et la gestion intégrée des éléments nutritifs des plantes.

L'agriculture de conservation (AC) consiste à réaliser une agriculture durable et rentable et vise donc à améliorer les moyens de subsistance des agriculteurs grâce à l'application des trois principes de l'agriculture de conservation : perturbation minimale du sol, couverture permanente du sol et rotation des cultures. L'AC a un grand potentiel pour tous les types d'exploitations et d'environnements agroécologiques.

De bonnes pratiques agricoles (codes, normes et réglementations) ont été développées par l'industrie alimentaire et les organisations de producteurs, mais aussi par les gouvernements et les ONG pour codifier les pratiques agricoles au niveau de l'exploitation pour une gamme de produits. Leur objectif varie de la réponse aux exigences réglementaires gouvernementales et commerciales (notamment la sécurité et la qualité des aliments) à des exigences plus spécifiques sur des marchés spécialisés ou de niche.

La gestion intégrée des éléments nutritifs des plantes intègre les pratiques de gestion des sols, des nutriments, de l'eau, des cultures et de la végétation. Il est adapté à un système particulier de production agricole et est mis en œuvre dans le but d'améliorer et de maintenir la fertilité des sols, la productivité des terres et de réduire la dégradation de l'environnement. L'objectif de la gestion intégrée des éléments nutritifs des plantes est d'optimiser le sol, ses propriétés physiques, chimiques, biologiques et hydrologiques pour améliorer la productivité agricole. Les mesures mécaniques et biologiques pour la restauration des terres dégradées sont présentées ci-dessous.

Restauration mécanique

Les gabions sont des cages métalliques remplies de pierres. Le but de cette technique est de lutter contre l'érosion hydrique en permettant à l'eau de traverser ces structures tout en retenant les matériaux contenus dans le sol. Il s'agit d'une barrière semi-perméable qui, placée en aval d'un ravin, empêche l'érosion hydrique. Leur flexibilité leur permet d'éviter les ruptures (FAO, 2012).



Figure 37. Gabions en Afrique du Nord

La fixation des dunes de sable avec des feuilles de palmier constitue une barrière dans des feuilles de palmier ou des feuilles de fer ondulé (ou tout matériau inerte disponible) installées perpendiculairement à la direction dominante des vents si elles sont unidirectionnelles ou quadrillées pour les vents multidirectionnels (FAO, 2012).



Figure 38. Fixation des dunes de sable avec des feuilles de palmier Restauration biologique

La fixation biologique des dunes mobiles peut être effectuée lorsque la stabilisation mécanique est terminée. Il s'agit de planter des barrières biologiques pour une fixation définitive des dunes de sable.



Figure 39. Exemple de fixation biologique des dunes en Afrique du Nord

Amélioration pastorale par le repos : ces techniques sont généralement les plus recommandables si la dégradation n'est pas encore devenue irréversible, en raison de la facilité de leur application et de leur coût relativement faible. Parmi les opérations de restauration, le repos est la technique la plus couramment utilisée pour assurer un mouvement ascendant biologique spontané de la végétation dégradée. Les résultats du repos dans plusieurs milieux arides où la dynamique de la végétation a été bloquée témoignent de l'efficacité de cette technique. Cette efficacité entraîne la réinstallation et la régénération d'espèces à haute valeur pastorale qui ont disparu (FAO, 2012).



Figure 40. Exemple d'exclos d'un terrain dégradé

L'agroforesterie est une forme d'utilisation des terres qui implique la conservation, l'introduction et la gestion délibérées d'arbres et d'arbustes dans des systèmes agricoles qui procurent des avantages écologiques, économiques ou sociaux grâce à l'interaction entre l'agriculture et / ou l'élevage et l'arboriculture. Planter des cultures ou élever des animaux dans des zones plantées d'arbres pour conserver les sols et augmenter les rendements (FAO, 2012).

Les haies à racines vivantes sont des rangées d'arbres, d'arbustes ou d'arbustes d'une ou plusieurs espèces plantées sur une ou plusieurs rangées autour d'un périmètre agricole afin de protéger et de restaurer le sol (FAO, 2012).



Activités pédagogiques (exercices et études de cas)

En utilisant les informations de base présentées dans le cours et dans d'autres documents, préparer en groupe de 4-5 un résumé analytique des mesures mécaniques et biologiques pour la restauration des terres dégradées dans une zone agroécologique donnée.

1.17 Interactions eau-terre-atmosphère

1.17.1 Terre-atmosphère : Effet de serre



Objectifs

A la fin de la session, l'apprenant sera capable de

1. Décrire l'effet de serre naturel,
2. Expliquer l'équilibre radiative atmosphère-terre, et ;
3. Analyser le rôle des forêts dans l'atténuation de l'effet de serre.

Introduction générale

L'effet de serre est un processus naturel qui permet de vivre sur terre à une température moyenne de 15°C au lieu de -18°C , en l'absence de l'atmosphère terrestre. Au cours des deux derniers siècles, l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre due aux activités humaines a modifié l'équilibre radiative atmosphère-terre. Depuis plusieurs décennies, le développement industriel conduit à une augmentation des gaz à effet de serre, notamment du CO_2 . L'augmentation du CO_2 a un impact majeur sur les écosystèmes, car elle est directement responsable du réchauffement de notre planète. Les forêts peuvent jouer un rôle important dans la régulation de ces émissions et donc contribuer à la lutte contre le changement climatique.

Grâce à la photosynthèse, les arbres absorbent le CO_2 atmosphérique et le transforme en bois, agissant ainsi comme un puits de carbone.

Effet de serre

L'effet de serre est un phénomène naturel par lequel l'atmosphère emprisonne une partie du rayonnement thermique émis par la terre sous l'effet du soleil. En l'absence de cet effet de serre, la température moyenne sur terre serait de -18°C .

Le climat sur Terre est un système complexe dont la force motrice est fournie par le rayonnement solaire. La Terre reçoit l'énergie du soleil sous forme de lumière et de chaleur. Environ la moitié de ce rayonnement de courte longueur d'onde est réfléchi par l'atmosphère et la surface de la Terre. C'est l'effet albédo. L'autre moitié est absorbée par la surface de la Terre et réchauffe la Terre. Cette chaleur est ensuite restituée sous forme de rayonnement ascendant de grandes longueurs d'onde. Une partie de la chaleur s'écoule dans l'espace, une partie est absorbée dans l'atmosphère par les gaz à effet de serre et renvoyée sur Terre.

Il y a donc un échange continu de rayons de grandes longueurs d'onde entre la terre et l'atmosphère. Cela provoque un réchauffement. L'atmosphère se comporte comme une isolation thermique : ce phénomène est appelé effet de serre naturel. Les principaux gaz à effet de serre naturels sont le CO_2 , le méthane (CH_4), le protoxyde d'azote (N_2O), la vapeur d'eau et l'ozone (O_3). Ces gaz sont présents dans l'atmosphère, mais ils peuvent également être générés par les activités humaines et perturber ainsi l'équilibre radiatif de la Terre. Cette perturbation provoque le changement climatique.

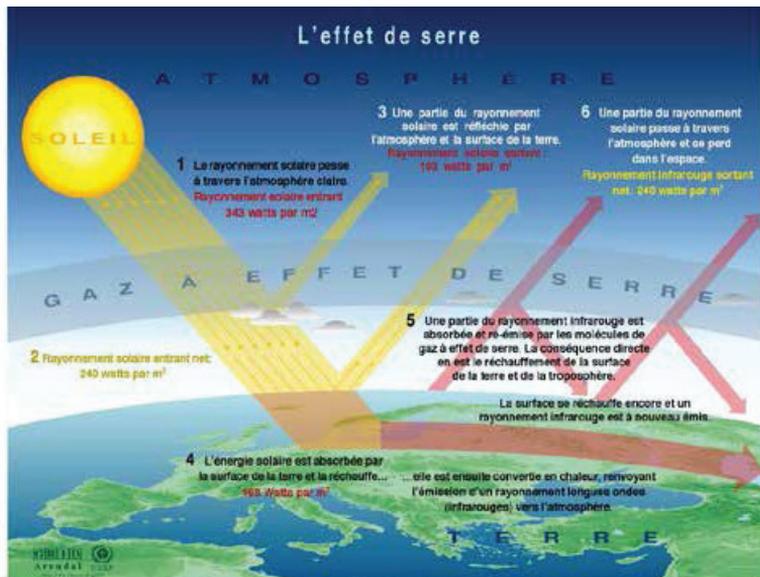


Figure 41. Effet de serre



Figure 42. Forêt du bassin du Congo

Les forêts et l'effet de serre

Les forêts jouent un rôle important dans l'atténuation de l'effet de serre. Lorsqu'ils poussent, les arbres absorbent le CO₂ de l'atmosphère d'environ une tonne par mètre cube. Ils fixent le carbone et libèrent l'oxygène que nous respirons. Ce processus de photosynthèse emprisonne le carbone pendant la vie de l'arbre. À l'inverse, lorsque le bois se décompose ou que la forêt brûle, le carbone est libéré dans l'atmosphère. La forêt et le bois ont trois principaux rôles positifs contre l'effet de serre : 1) l'absorption du CO₂ par photosynthèse, 2) le stockage du CO₂ ; et, 3) alternative aux combustibles fossiles.



Activités pédagogiques (exercices et études de cas)

En utilisant les informations de bases présentées dans le cours et d'autres documents, préparer en groupe de 4-5 personnes un résumé sur le rôle des forêts dans l'atténuation de l'effet de serre.

1.18 Atmosphère-eau-végétation



Objectifs

A la fin de la session, l'apprenant sera en mesure de

1. Décrire l'évaporation, l'évapotranspiration
2. Expliquer le rôle de la variation de l'incidence foliaire dans le bilan hydrique.

Introduction générale

L'évapotranspiration est un processus complexe consistant en une évaporation physique (surface d'eau libre, eau du sol nu) et une évaporation physiologique (transpiration). Compte tenu de la difficulté de distinguer ces deux types de processus dans la situation d'un sol couvert de végétation et du fait qu'ils se produisent simultanément, ils sont généralement regroupés sous le terme générique d'évapotranspiration (Musy 2005).

Pour que le processus d'évaporation se produise, il faut d'une part que le système ait la capacité d'évaporer l'eau (facteur limitant) et, d'autre part, que l'air ambiant exerce une demande évaporative (l'air ne doit pas être saturé). L'évaporation dépend donc des conditions météorologiques mais aussi de la disponibilité de l'eau. En plus de ces deux facteurs, les propriétés physiques et physiologiques du couvert végétal sont prises en compte dans le cas de l'évapotranspiration (figure 43).

Les forêts jouent un rôle important dans les bilans hydriques régionaux en Afrique. La compréhension de l'évapotranspiration dans les formations forestières est utile pour établir leurs bilans hydriques.

Évaporation

L'évaporation commence par le mouvement des molécules d'eau. A l'intérieur d'une masse d'eau liquide, les molécules vibrent et circulent de façon désordonnée en fonction de la température : plus elle est élevée, plus le mouvement est amplifié et plus l'énergie associée est suffisante pour permettre à certaines molécules de s'échapper et de pénétrer dans l'atmosphère (Musy, 2005).

Les facteurs météorologiques. L'évaporation dépend essentiellement de deux facteurs : i) la quantité de chaleur disponible et ii) la capacité de l'air à stocker l'eau.

Chaleur disponible. La quantité d'eau qui peut s'évaporer d'une surface dépend de la quantité de chaleur du soleil. Celui-ci varie en fonction des conditions géographiques (gradient latitudinal) et de l'élévation de la surface liquide par rapport au niveau de la mer (gradient altimétrique). Les échanges thermiques entre l'atmosphère, la surface du sol et la surface des lacs et des océans, qui sont les agents de l'évaporation, sont effectués par convection et conduction. L'énergie échangée est compensée en tous points par un transfert d'eau qui s'évapore à un endroit pour se condenser à un autre et retombe sous forme de précipitation. Ces échanges de chaleur maintiennent le cycle de l'eau.

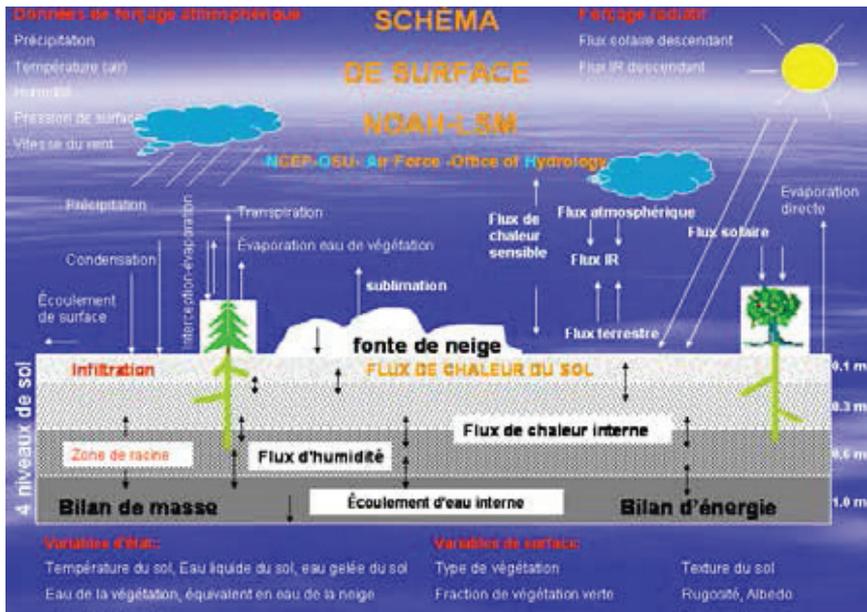


Figure 43. Aperçu des caractéristiques climatiques, physiques et physiologiques de l'environnement.

Source : Bokoye et al. (2004)

Les mouvements horizontaux et verticaux dans l'atmosphère impliquent des échanges et des transformations d'énergie. Une des causes fondamentales de cette agitation est la distribution des températures à la surface de la Terre ainsi que dans l'atmosphère elle-même. L'évaporation est donc fonction des relations énergétiques entre l'atmosphère et la masse d'eau en évaporation. L'action du rayonnement solaire sur l'atmosphère, l'hydrosphère et la lithosphère est illustrée dans la figure suivante.

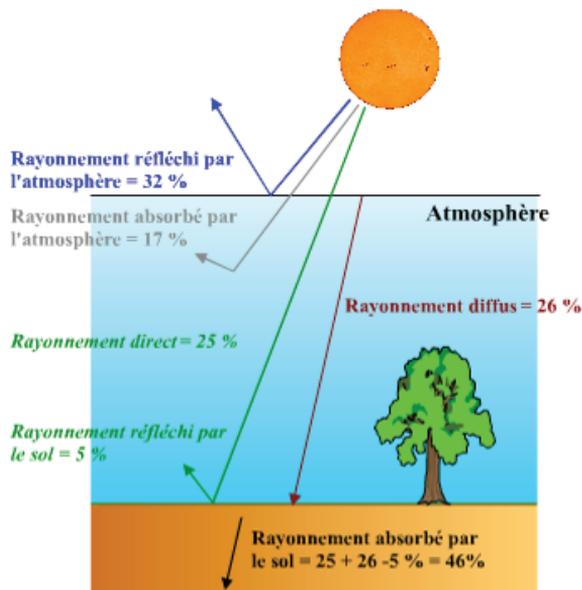


Figure 44. Action du rayonnement solaire sur l'atmosphère, l'hydrosphère et la lithosphère

Le rayonnement global est partiellement réfléchi par la surface du sol, selon la nature, la couleur, l'inclinaison ou la rugosité de ce dernier. L'albédo est défini comme le pourcentage de lumière solaire réfléchi de la surface de la Terre pour une zone irradiée.

Tableau 6. Valeur d'albédo pour différentes surfaces

Surfaces du sol	Albédo
Surface de l'eau	0.03 – 0.1
Forêt	0.05 – 0.2
Sol cultivé	0.07 – 0.14
Pierres et roches	0.15 – 0.25
Champs et prairies	0.1 – 0.3
Sol nu	0.15 – 0.4
Vieille Neige	0.5 - 0.7
Neige fraîche	0.8 – 0.95

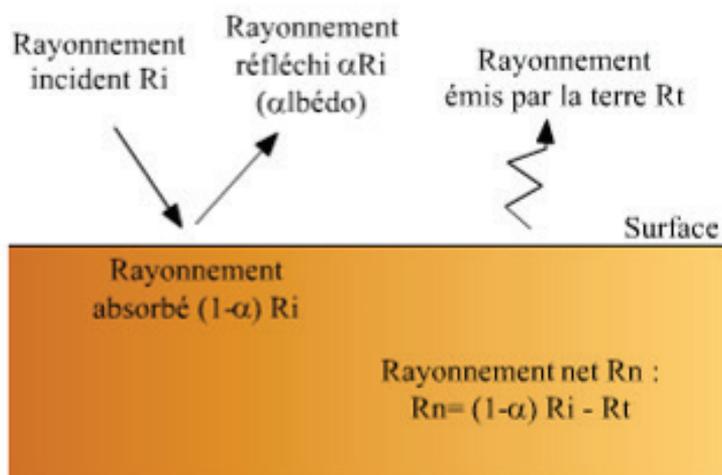


Figure 45. Equilibre des échanges radiatifs à la surface du sol.

Source : Musy (2005)

Capacité d'air à stocker l'eau. L'évaporation est fonction de la température de la surface d'évaporation. Le taux d'évaporation est, en particulier, une fonction croissante de la température de l'eau. Comme la température de l'eau varie dans le même sens que la température de l'air, il est plus facile de mesurer la température. La température de l'air plutôt que celle de l'eau est donc utilisée dans les formules de calcul de l'évaporation.

Les relations entre la pression de vapeur, la température et l'humidité relative sont illustrées dans la figure suivante.

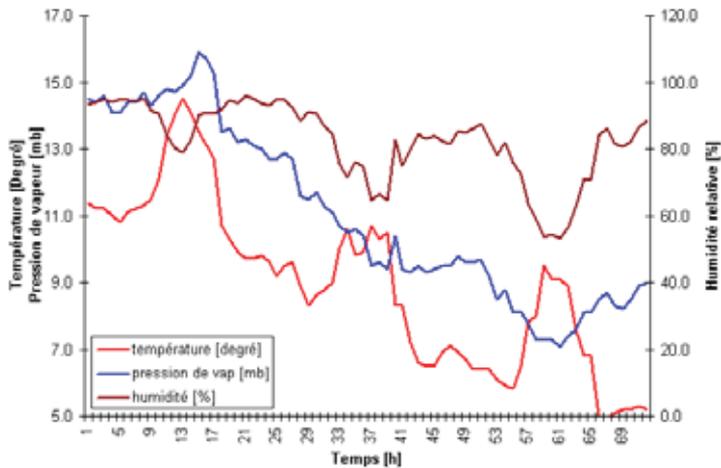


Figure 46. Évolution de la température, de la pression de vapeur et de l'humidité relative.

Source : Musy (2005)

Facteurs physiques de surface

L'évaporation des surfaces d'eau libre dépend non seulement des propriétés physiques et géométriques de cette surface (profondeur, étendue) mais aussi des propriétés physiques de l'eau (température, salinité).

L'évaporation du sol nu est conditionnée par les mêmes facteurs météorologiques que ceux qui interviennent dans l'évaporation d'une surface d'eau libre. Cependant, la quantité d'eau disponible est un facteur limitant. L'évaporation du sol nu est donc influencée d'une part par la demande d'évaporation mais aussi par la capacité du sol à répondre à cette demande et sa capacité à transmettre l'eau à la surface. Elle dépend de diverses caractéristiques : teneur en eau du sol, capillarité, couleur du sol et albédo.

Estimation de l'évaporation de l'eau libre

Les taux d'évaporation peuvent être évalués directement (cuves d'évaporation) et indirectement (bilan énergétique et hydrique ou transfert de masse). Les formulations empiriques et pseudo-empiriques pour l'évaluation des taux d'évaporation ne tiennent pas compte des effets dus à la présence de la végétation.

Evapotranspiration

Le concept d'évapotranspiration englobe les processus d'évaporation directe de l'eau du sol et de transpiration par les plantes. Sur les terres ayant un couvert végétal uniforme, les échanges de transpiration sont quantitativement plus importants que les échanges par évaporation directe (Musy, 2005).

La transpiration peut être définie comme l'émission ou l'expiration de vapeur d'eau par les plantes vivantes. Les plantes prennent l'eau du sol par les racines avec des cellules épidermiques. Le développement du système racinaire est lié à la quantité d'eau disponible dans le sol. Les racines peuvent atteindre des profondeurs très variables, d'une dizaine de centimètres à plusieurs mètres. L'absorption d'eau est obtenue par osmose ou imbibition. L'eau s'écoule à travers les canaux du système vasculaire de la plante pour atteindre les feuilles. Le siège de l'évaporation se situe alors essentiellement au niveau des parois internes des stomates. Une certaine évaporation peut se produire directement à travers les cuticules foliaires.

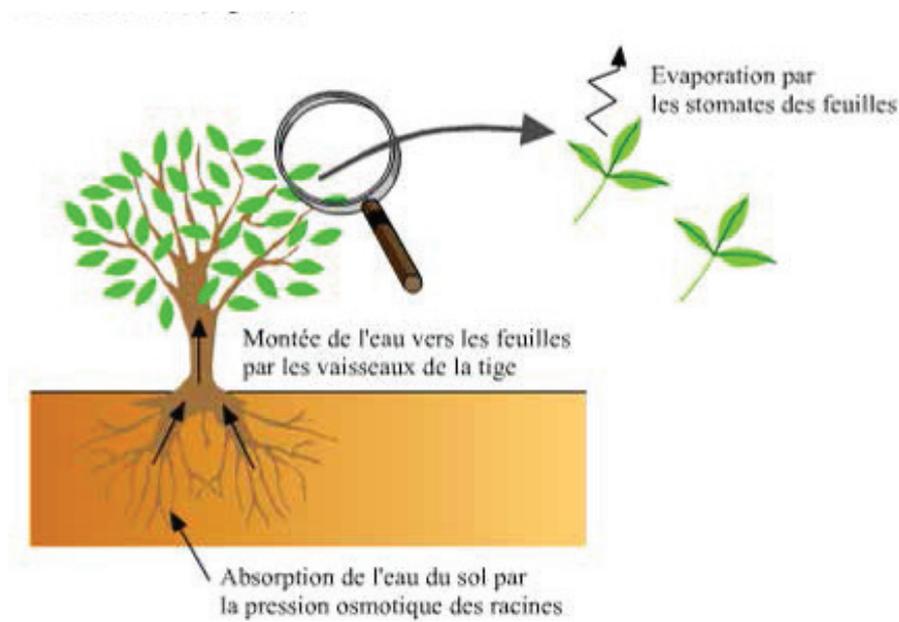


Figure 47. L'écoulement de l'eau dans les plantes.

Source : Musy (2005)

En plus de sa participation au cycle hydrologique en tant que source de vapeur d'eau dans l'atmosphère, la transpiration a de nombreuses autres fonctions, telles que le transport de nutriments dans la plante ou comme système de refroidissement des feuilles.

La quantité d'eau transpirée par la végétation dépend des facteurs météorologiques, de l'humidité du sol dans la zone racinaire, de l'âge et des espèces de plante, du développement de son feuillage et de la profondeur des racines.

Encadré 13. Concepts d'évapotranspiration

L'évapotranspiration de référence (ET) ou évapotranspiration potentielle est définie comme l'ensemble des pertes d'eau par évaporation et transpiration d'une surface de gazon de hauteur uniforme, couvrant complètement le sol, en pleine période de croissance, couvrant tout le sol et abondamment alimentée en eau.

L'évapotranspiration maximale (ETM) d'une culture donnée est définie à différents stades de développement végétatif, lorsque l'eau est suffisante et que les conditions agronomiques sont optimales (sol fertile, bon état sanitaire, etc.).

L'évapotranspiration réelle (ETR) est la somme des quantités de vapeur d'eau évaporées par le sol et par les plantes lorsque le sol est à son humidité spécifique actuelle et les plantes à un stade de développement physiologique et sanitaire réel.

Pour la culture de référence, en l'occurrence le gazon, nous avons: $ETR \leq ETM \leq ET$.

Pour toutes les autres plantes, seule la relation $ETR \leq ETM$ est toujours valable tout au long de l'année.

Évaluation de l'évapotranspiration

L'évapotranspiration d'un sol couvert de végétation est difficile à estimer. Les besoins en eau des cultures, équivalents à l'ETM, sont déterminés en corrigeant l'évapotranspiration potentielle (ET) d'une culture de référence (gazon) par le coefficient cultural (k_c) en utilisant la formule suivante:

$$ETM(\text{crop}) = k_c ET$$

L'échelle de temps sur laquelle les besoins en eau des plantes sont calculés peut être une heure, un jour, une décennie, un mois ou une phase de croissance, selon l'objectif et la disponibilité des données. La valeur du coefficient k_c est largement influencée par la nature de la culture, sa hauteur, la durée du cycle et le taux de croissance, mais aussi par la fréquence des précipitations ou de l'irrigation au début du cycle de la culture. k_c est toujours établi expérimentalement au début pour une région et une culture données, puis confiné à des tableaux pour une utilisation ultérieure dans la même région ou une région similaire. Les valeurs du coefficient k_c sont théoriquement comprises entre 0 et 1, selon le stade de la culture.

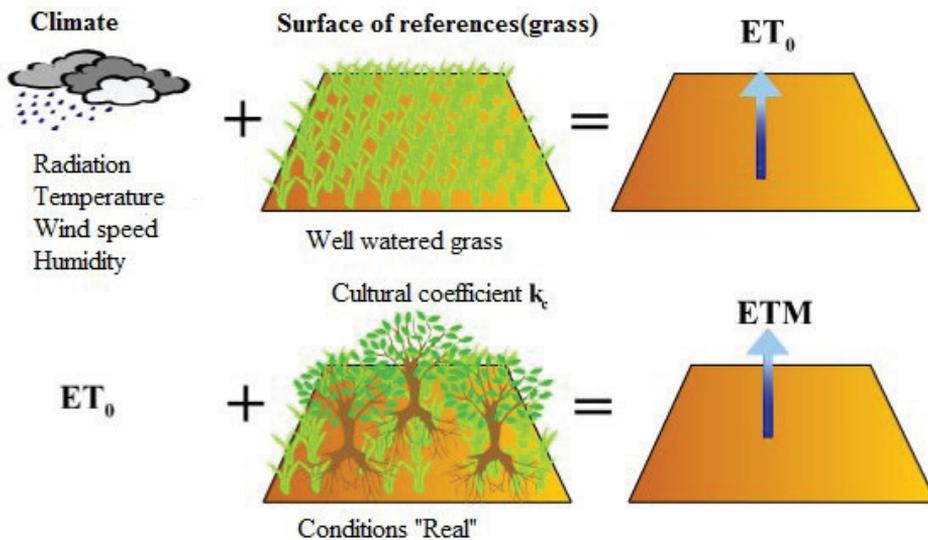


Figure 48. Besoin en eau des cultures (CTE) et évapotranspiration de référence (ET0).

Source : FAO (1998) cité par Musy (2005).

La détermination de l'ET peut être effectuée soit directement à l'aide de lysimètres, soit indirectement au moyen de formules empiriques et théoriques (ou physiques) qui combinent des variables climatiques



Activités pédagogiques (exercices et études de cas)

- Sur la base des informations de base présentées dans le cours et d'autres documents, préparez par groupes de 4-5 une fiche technique sur les méthodes d'estimation de l'évaporation et de l'évapotranspiration adaptées au contexte africain.
- Donnez des exemples d'application de ces méthodes.

Références

- Anthony, S.K. & K.E. Austin, 2013. Drought and Future of rural communities: opportunities and challenges for climate change adaptation in regional Victoria. *Journal of Global Environmental change* 23(5):1307- 1316.
- Arctic Climatology and Meteorology. Condensation. <http://www.nsidc.org/cryosphere> Arctic Climatology and Meteorology. Evaporation. <http://www.nsidc.org/cryosphere>
- Barry, R.G. & R.J. Chorley, 1971. *Atmosphere, Weather and Climate*. London, Methuen and Co Ltd., p.65.
- Barry, R.G. & R.J. Chorley, 1992. *Atmosphere, weather, and climate*. London: Routledge
- Christopherson, R.W., 1992. *Geosystems. An Introduction to Physical Geography*. New York: Macmillan Publishing Company, pp. 222–224.
- Cleanenergy–EPA-- <http://www.epa.gov/cleanenergy/energy-and-you/glossary.html>
- Climate Change Glossary Word Definitions Related to Climate Change and Global Warming <http://climatechange-glossary.com/>
- Dinnie, E., C. Reynolds & E. Hopkins, 2015. Rural responds to climate change: Challenge and opportunity in neoliberal times. The James Hutton Institute, University of Aberdeen, UK.
- Dr. Art's Guide to Planet Earth. The Water Cycle. <http://www.nepis.epa.gov>
- Durack, P.J., S.E. Wijffels & R.J. Matear, 2012. Ocean Salinities Reveal Strong Global Water Cycle Intensification During 1950 to 2000. *Science* 336(6080):455–458.
- Emanuel, K., 2001. Contribution of tropical cyclones to meridional heat transport by the oceans. *Journal of Geophysical Research* 106(14):14771–14781.
- EPA Glossary of Climate Change Terms-- <http://www.epa.gov/climatechange/glossary.html>
- Hastenrath, S., 1985. *Climate and Circulation of the Tropics*. Kluwer Academic Publ. p. 464.
- Hellebrand, H.J. & W.D. Kalk, 2001. Emission of methane, nitrous oxide, and ammonia from dung windrows. *Nutr. Cycling Agroecosystem* 60:83–87.
- Holdren, J.P. & P.R. Ehrlich, 1974- Human Population and the Global Environment, *American Scientist* 62:282–292. <http://nimbuseco.com/2013/01/deforestation-and-pollution-facts>
- IPCC, 2012. Glossary of terms. In Field, C.B. et al. (eds.): *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of IPCC*. Cambridge University Press, UK, and New York, USA. pp. 555-564.
- Lutgens, F.K. & J.T. Edward, 1995. *The Atmosphere*. Prentice Hall, 6th ed., pp14-17.
- McCarty, J.P., 2001. Ecological consequences of recent climate change. *Conservation Biology* 15:320– 331.
- Ocampo, J.A., 2009. The macroeconomics of the green economy. Paper in report of a Panel of Experts entitled "The transition to a green economy: benefits, challenges and risks from a sustainable development perspective", presented at the 2nd Preparatory Committee Meeting for UNCED.
- Ohio State University Extension Fact Sheet. Nitrogen and the Hydrologic Cycle.
- Pasch, R.J., S.B. Eric, D.C. Hugh & P.D. Roberts, 2006. *Tropical Cyclone Report: Hurricane Wilma*. National Hurricane Center.

Pidwirny, M., 2006. The Atmospheric composition. Fundamentals of Physical Geography, 2nd Edition. Available online: <http://www.physicalgeography.net/fundamentals/8b.html>

Pidwirny, M., 2006. The Hydrologic Cycle. Fundamentals of Physical Geography, 2nd Edition. Available online: <http://www.physicalgeography.net/fundamentals/8b.html>

Ramage, C., 1971. Monsoon Meteorology. International Geophysics Series. Academic Press, San Diego, California. Vol. 12, p. 296.

Roja Raman, M., J. Rao, M.V. Ratnam, M. Rajeevan, S.V.B. Rao, D.N. Rao & N.P.Rao, 2009. Characteristics of the Tropical Easterly Jet: Long-term trends and their features during active and break monsoon phases. Journal of Geophysical. Research. Volume 114.

Stanitski, Conrad L.; Eubanks, Lucy P; Middlecamp, Catherine H.; and Pienta, Norman J. (2003). Chemistry in Context: Applying Chemistry to Society, 4th edition. Boston: McGraw-Hill

States, R.J. & C.S. Gardner, 2000. Thermal Structure of the Mesopause Region (80–105 km) at 40°N Latitude. Part I: Seasonal Variations. Journal of the Atmospheric Sciences 57:66–77.

Trenberth, K.E., D.P. Stepaniak & J.M. Caron, 2000. The global monsoon as seen through the divergent atmospheric circulation., Journal of climate, page 3969-3993.

Tyson, P.D. & R.A. Preston-Whyte, 2013. The Weather and Climate of Southern Africa. (Second Edition).Oxford University Press. p. 4.

UNFCCC. Glossary. Available at: http://unfccc.int/resource/cd_roms/na1/ghg_inventories/english/8glossary/Glossary.htm

Von Bassewitz, N., 2011. International Climate Change Policy and Legislation; Where do we stand?

Ruppel, O.C. & K. Ruppel-Schlichting (eds): Environmental Law and Policy in Namibia. Windhoek, Orumbonde Press, Essen, Welwitschia Verlag, Dr. A. Eckl.

Willows, R.I. & R.K. Connell (eds.), 2003. Climate adaptation; risk uncertainty and decision-making, Climate Impacts Programme. Oxford, U.K. Available at: http://www.ukcip.org.uk/risk_uncert/main_risk_uncert.htm

Woodward, D., 2013. Global growth, inequality and the prospects for poverty eradication in a carbon- constrained world. Background paper prepared for World Economic and Social Survey 2013.

World Economic Forum, 2013. The Green Investment Report: The Ways and Means to Unlock Private Finance for Green Growth - A Report of the Green Growth Action Alliance. Geneva.

Chapitre 2 : Preuves et causes du changement climatique

Aperçu du chapitre

Les causes du changement climatique font partie intégrante de la science de la climatologie. Ces causes ont été principalement associées aux activités humaines (anthropiques). Ce chapitre présentera aux apprenants les causes anthropiques du changement qui entraînent des émissions de GES, comme les changements d'utilisation des terres, notamment la déforestation, l'urbanisation et les transports. Il décrira également les risques associés aux émissions de GES et examinera les tendances du changement climatique.



Objectif et résultats d'apprentissage

- Doter les apprenants de connaissances et de compétences sur les causes et les preuves du changement climatique. A la fin de ce chapitre, les apprenants seront en mesure de
 - expliquer les causes du changement climatique ;
 - décrire les risques associés au changement climatique ; et
- évaluer et interpréter les tendances du changement climatique et leurs impacts.

2.1 Causes des GES et effets liés au changement climatique

2.1.1 Introduction

Cette session de formation présente les différentes causes des gaz à effet de serre.



Objectifs

- A la fin de cette session, l'apprenant sera capable de :
- décrire les gaz à effet de serre ;
- déterminer les différentes sources de gaz à effet de serre ; et déterminer les risques associés aux gaz à effet de serre.



Activité 1 : Remue-méninges (20 minutes)

Partagez vos points de vue sur le concept de changement climatique

2.1.2 Gaz à effet de serre

Un gaz à effet de serre (GES) est tout gaz dans l'atmosphère qui absorbe et réémet de la chaleur, et maintient ainsi l'atmosphère de la planète plus chaude qu'elle ne le serait autrement. Les principaux GES de l'atmosphère terrestre sont la vapeur d'eau, le dioxyde de carbone (CO_2), le méthane (CH_4), le protoxyde d'azote (N_2O) et l'ozone (O_3). Les GES se produisent naturellement dans l'atmosphère terrestre, mais les activités humaines, telles que la combustion de combustibles fossiles, augmentent les niveaux, provoquant le réchauffement climatique et le changement climatique. Le Protocole de Kyoto est un traité international pour contrôler la libération de GES des activités humaines.

Il convient de noter que différents GES durent dans l'atmosphère pendant des périodes de temps différentes et absorbent également différentes quantités de chaleur. Le « Potentiel de Réchauffement Global » (PRG) d'un GES indique la quantité de réchauffement causée par un gaz sur une période de temps donnée (normalement 100 ans). Le PRG est un indice, le CO_2 ayant la valeur d'indice de 1 et le PRG pour tous les autres GES est le nombre de fois plus de réchauffement qu'ils provoquent par rapport au CO_2 . Par exemple, 1 kg de méthane provoque 25 fois plus de réchauffement sur une période de 100 ans par rapport à 1 kg de CO_2 , et donc le méthane a un PRG de 25.



Questions textuelles (30 minutes)

- Qu'est-ce que l'effet de serre et comment affecte-t-il le climat ?
- Quels sont les signes les plus visibles du changement climatique ?

2.1.3 Dioxyde de carbone

Le dioxyde de carbone (CO_2) est le GES le plus couramment émis par les activités humaines, en termes de quantité rejetée et d'impact total sur le réchauffement climatique. Par conséquent, le « CO_2 » est parfois utilisé comme expression abrégée pour tous les gaz à effet de serre. Cependant, cela peut prêter à confusion et une manière plus précise de se référer collectivement à un certain nombre de GES consiste à utiliser le terme « équivalent CO_2 » ou « CO_2e ». Étant donné que le CO_2 est considéré comme le gaz à effet de serre le plus important, certaines évaluations ou rapports de GES n'incluent que le CO_2 et ne tiennent pas compte des autres GES, ce qui peut conduire à une sous-estimation de l'impact total

du réchauffement climatique. Les inventaires de GES sont plus complets s'ils incluent tous les GES et pas seulement le CO₂.



Activité 2 : (Discussion de groupe) (20 minutes)

Le CO₂ est déjà présent naturellement dans l'atmosphère, alors pourquoi les émissions de l'activité humaine sont-elles significatives ?

2.1.4 Sources de gaz à effet de serre

La déforestation est l'enlèvement d'une forêt ou d'un peuplement d'arbres où la terre est convertie à un usage non forestier. Des exemples de déforestation comprennent la conversion de terres forestières en plantations, en ranch ou en utilisation urbaine. La déforestation la plus importante se produit dans les zones de forêt tropicale humide. La déforestation contribue au réchauffement climatique et est souvent citée comme l'une des principales causes de l'augmentation de l'effet de serre. La déforestation est responsable de c. 20% des émissions mondiales de GES. Selon le GIEC, la déforestation, principalement dans les zones tropicales, pourrait représenter jusqu'à un tiers du total des émissions anthropiques de CO₂. La déforestation fait que le CO₂ persiste dans l'atmosphère. À mesure que le CO₂ s'accumule, il produit une couche dans l'atmosphère qui emprisonne le rayonnement solaire. Le rayonnement se transforme en chaleur qui provoque le réchauffement global, mieux connu sous le nom d'effet de serre.

La dégradation des forêts est la réduction à long terme de la capacité globale d'une forêt à produire ou à fournir des avantages tels que le stockage du carbone, la biodiversité, le bois et d'autres produits, en raison d'altérations environnementales et anthropiques. Il en résulte une diminution du nombre d'espèces dans la forêt et du couvert forestier ou une modification de la structure de la forêt. La dégradation des forêts est différente de la déforestation. La dégradation des forêts crée de grands problèmes écologiques dans toutes les régions du monde, dont l'impact le plus significatif est la perte d'habitat de nombreuses espèces ou la perte de biodiversité. Elle entraîne également la perturbation des cycles de l'eau et des écosystèmes fluviaux, l'érosion des sols, l'augmentation de l'intensité et de la fréquence des sécheresses et l'escalade des températures moyennes et maximales. Les conditions climatiques extrêmes diminuent considérablement le couvert forestier et assèchent les plans d'eau qui traversent la forêt.

L'urbanisation est un déplacement de la population des zones rurales vers les zones urbaines, et la façon dont chaque société s'adapte à ce changement. C'est principalement le processus par lequel les villes se forment et deviennent plus grandes à mesure que de plus en plus de personnes commencent à y vivre et à y travailler. L'existence d'îlots de chaleur urbains est devenue une préoccupation croissante au fil des ans. Un îlot de chaleur urbain se forme lorsque les zones industrielles et urbaines produisent et retiennent de la chaleur. Une grande partie du rayonnement solaire qui atteint les zones rurales est consommée par l'évaporation de l'eau de la végétation et du sol. Dans les villes, où il y a moins de végétation et de sol exposé, la plus grande partie de l'énergie solaire est plutôt absorbée par les bâtiments et les asphaltes, ce qui entraîne une température de surface plus élevée. Les véhicules, les usines et les appareils de chauffage et de refroidissement industriels et domestiques dégagent encore plus de chaleur. Les impacts comprennent également la réduction de l'humidité du sol et une réduction de la réabsorption des émissions de CO₂ qui conduit au réchauffement climatique.

Le transport est le déplacement de personnes, d'animaux et de marchandises d'un endroit à un autre. Les modes de transport comprennent : l'air, le rail, la route, l'eau, le câble, le pipeline et l'espace. Il peut être divisé en infrastructures, véhicules et opérations. Le transport est important car il permet le commerce entre les personnes, ce qui est essentiel pour le développement des civilisations. L'infrastructure de transport comprend des installations fixes, notamment des routes, des chemins de fer, des voies aériennes, des voies navigables, des canaux et des pipelines, et des terminaux tels que les aéroports, les

gares ferroviaires, les entrepôts, les terminaux de camionnage et de ravitaillement (quais de ravitaillement et stations de carburant) et les ports maritimes. Le transport est une utilisation majeure de l'énergie et brûle la majeure partie du pétrole mondial. Cela crée de la pollution atmosphérique, notamment des oxydes d'azote et des particules, et contribue de manière significative au réchauffement de la planète par l'émission de CO₂, dont le transport est le principal responsable, le secteur d'émission qui connaît la plus forte croissance.



Activité 3 : (Discussion de groupe) (20 minutes)

A quels changements climatiques assisterions-nous si les gaz à effet de serre étaient arrêtés ?

2.1.5 Risques associés au changement climatique

L'insécurité alimentaire fait référence au problème social et économique du manque de nourriture en raison de ressources ou d'autres contraintes, du jeûne ou du régime non volontaire, de la maladie ou d'autres raisons. Cette définition signifie que l'insécurité alimentaire est vécue lorsqu'il y a :

- incertitude quant à la disponibilité et à l'accès futurs aux aliments ;
- insuffisance de la quantité et du type de nourriture nécessaires à un mode de vie sain ; ou,
- la nécessité d'utiliser des moyens socialement inacceptables pour se procurer de la nourriture.

Bien que le manque de ressources économiques soit la contrainte la plus courante, l'insécurité alimentaire peut également être vécue lorsque la nourriture est disponible et accessible mais ne peut pas être utilisée en raison de contraintes physiques ou autres, telles que le fonctionnement physique limité des personnes âgées ou handicapées. On suppose que certaines conséquences étroitement liées de l'incertitude, de l'insuffisance et de l'inacceptabilité sociale font partie de l'expérience de l'insécurité alimentaire. L'inquiétude et l'anxiété résultent généralement de l'incertitude. Des sentiments d'aliénation et de privation, de détresse et de changements défavorables dans les interactions familiales et sociales se produisent également.

L'insécurité alimentaire est mesurée comme un concept au niveau des ménages qui fait référence à la disponibilité, à l'accès ou à l'utilisation des aliments incertains, insuffisants ou inacceptables. Elle est vécue avec ses conséquences étroitement liées. Il existe une justification solide pour mesurer l'insécurité alimentaire au niveau des ménages. Il est possible pour les individus d'être en sécurité alimentaire dans un ménage en situation d'insécurité alimentaire, tout comme il est possible pour les individus de ne pas être pauvres dans un ménage pauvre, en fonction de l'allocation intra-ménage des ressources. Cela signifie que nous pouvons mesurer et déclarer le nombre de personnes qui vivent dans des ménages en situation d'insécurité alimentaire (avec pas nécessairement toutes en insécurité alimentaire). Lorsqu'un ménage contient une ou plusieurs personnes en situation d'insécurité alimentaire, le ménage est considéré comme en situation d'insécurité alimentaire.

Bien que la nourriture soit un besoin fondamental dans la mesure où chaque individu doit avoir accès aux nutriments nécessaires pour survivre et participer activement à la société, la nourriture n'est qu'un des besoins que les gens doivent considérer. Les ménages font souvent des compromis entre les besoins pour assurer leur viabilité à long terme en tant qu'unités. Ils gèrent les stocks et les flux d'actifs et de trésorerie pour répondre aux besoins de base, compenser les risques, atténuer les chocs et faire face aux imprévus.

La pollution est l'introduction de contaminants dans l'environnement naturel qui provoque des changements défavorables. La pollution peut prendre la forme de substances chimiques ou d'énergie, telles que le bruit, la chaleur ou la lumière. Les polluants, les composants de la pollution, peuvent être des substances / énergies étrangères ou des contaminants naturels. La pollution est souvent classée comme pollution ponctuelle ou non ponctuelle.

Une mauvaise qualité de l'air peut tuer de nombreux organismes, y compris les humains. La pollution par l'ozone peut provoquer des maladies respiratoires et cardiovasculaires, une inflammation de la gorge, des douleurs thoraciques et une congestion. La pollution de l'eau provoque c. 14 000 décès par jour, principalement en raison de la contamination de l'eau potable par des eaux usées non traitées dans les pays en développement. On estime que 500 millions d'Indiens n'ont pas accès à des toilettes adéquates, plus de dix millions de personnes en Inde sont tombées malades de maladies d'origine hydrique en 2013 et plus de 1 500 sont décédées, pour la plupart des enfants.

- Les émissions de CO₂ provoquent l'acidification des océans, la diminution continue du pH des océans de la Terre à mesure que le CO₂ se dissout.
- L'émission de GES entraîne un réchauffement de la planète qui affecte les écosystèmes de nombreuses façons.
- Les espèces envahissantes peuvent faire concurrence aux espèces indigènes et réduire la biodiversité. Les plantes envahissantes peuvent apporter des débris et des biomolécules qui peuvent modifier le sol et la composition chimique d'un environnement, ce qui réduit souvent la compétitivité des espèces indigènes.
- • Les oxydes d'azote sont éliminés de l'air par la pluie et fertilisent le sol, ce qui peut modifier la composition des écosystèmes.
- • Le smog et la brume peuvent réduire la quantité de lumière solaire reçue par les plantes pour effectuer la photosynthèse et entraîner la production d'ozone troposphérique qui endommage les plantes.
- Le sol peut devenir infertile et inadapté aux plantes. Cela affectera d'autres organismes du réseau alimentaire.

Le dioxyde de soufre et les oxydes d'azote peuvent provoquer des pluies acides qui abaissent la valeur du pH du sol.

L'incidence des maladies. Le réchauffement des températures, l'alternance de périodes de sécheresse et de déluges, et la perturbation des écosystèmes ont contribué à l'apparition plus généralisée d'infections comme le paludisme, la dengue, l'encéphalite à tiques et les maladies diarrhéiques. Les personnes vivant dans la pauvreté seront durement touchées par l'augmentation des maladies infectieuses. Les moustiques porteurs de maladies se répandent car le climat leur permet de survivre dans des zones autrefois inhospitalières. Les moustiques qui peuvent être porteurs du virus de la dengue étaient auparavant limités à des altitudes de 3 300 pieds, mais sont récemment apparus à 7 200 pieds dans les Andes en Colombie. Le paludisme a été détecté dans de nouvelles zones de haute altitude en Indonésie et en Afrique, ce qui pose de nouveaux risques pour des millions de personnes pauvres dont la santé est déjà menacée.

Les fortes pluies peuvent entraîner les pathogènes des sols, des fermes et des rues contaminés vers les sources d'eau potable. Une épidémie de maladie diarrhéique à Milwaukee en 1993, qui a touché 403 000 personnes, a été causée par le parasite *Cryptosporidium*, qui s'est infiltré dans l'approvisionnement en eau potable de la ville après de fortes pluies. Des températures extérieures plus élevées peuvent provoquer une augmentation des épidémies de maladies d'origine alimentaire, comme la salmonelle, qui se reproduit plus rapidement lorsque la température augmente. Une autre bactérie d'origine alimentaire, *Vibrio parahaemolyticus*, autrefois originaire des régions subtropicales, a étendu son aire de répartition jusqu'en Alaska, où, en 2004, elle a rendu malades les malheureux passagers de navires de croisière qui mangeaient des huîtres locales crues.



Questions de l'exercice (30 minutes)

- 1) Comment le changement climatique affecte-t-il la force et la fréquence des :
 - (i) inondations ;
 - (ii) sécheresses ;
 - (iii) ouragans ; ou
 - (iv) tornades ?

- 2) Qu'est-ce que l'acidification des océans et pourquoi est-elle importante ?



Résumé

Au cours de cette séance, nous avons discuté des causes des changements climatiques, des sources de gaz à effet de serre et des risques associés aux gaz à effet de serre. Au cours de la prochaine session, nous examinerons les tendances du changement climatique global.

2.2 Tendances et scénarios nationaux, régionaux et mondiaux du changement climatique

2.2.1 Introduction

Cette session de formation présente les tendances nationales, régionales et mondiales en matière de changement climatique et les scénarios. Il résume la façon dont le climat change, les raisons de ce changement et les prévisions pour l'avenir.



Objectif

A la fin de cette session, l'apprenant devrait être capable d'expliquer les tendances et les scénarios du changement climatique global



Activité 1 : Remue-méninges (20 minutes)

Partagez vos points de vue sur le concept de changement climatique.

Le système climatique de la Terre comprend la surface terrestre, l'atmosphère, les océans et la glace. De nombreux aspects du climat global changent rapidement, et les principaux moteurs de ce changement à l'origine sont les humains. Les preuves de changements abondent, du sommet de l'atmosphère aux profondeurs des océans. Des scientifiques et des ingénieurs du monde entier ont compilé ces preuves à l'aide de satellites, de ballons météorologiques, de thermomètres installés dans des stations terrestres et de nombreux autres types de systèmes d'observation qui surveillent la météo et le climat de la Terre. La somme de ces preuves raconte une histoire sans équivoque : la planète se réchauffe.



Questions textuelles (10 minutes)

- Comment les scientifiques savent-ils que les récents changements climatiques sont en grande partie causés par les activités humaines ?
- Quels instruments aident les scientifiques à compiler les preuves du changement climatique ?

2.2.2 La tendance moderne de la température

En suivant la température moyenne du monde depuis la fin du 19e siècle, on s'est rendu compte dans les années 1930 qu'il y avait eu une tendance prononcée au réchauffement. Au cours des années 1960, les experts en météorologie ont constaté qu'au cours des deux dernières décennies, la tendance s'était déplacée vers le refroidissement. Au début des années 1970, certains scientifiques ont pris conscience que le climat pouvait changer de façon importante et ont prédit un refroidissement progressif continu, peut-être une phase d'un long cycle naturel ou causé par la pollution de l'atmosphère par le smog et la poussière. D'autres ont insisté sur le fait que les effets d'une telle pollution étaient temporaires et que l'émission de GES par l'humanité entraînerait un réchauffement à long terme. Tous ont convenu que la connaissance était primitive et que toute prédiction n'était qu'une supposition. Mais la compréhension

du système climatique progressait rapidement. L'opinion selon laquelle le réchauffement doit dominer a gagné à la fin des années 1970, lorsqu'il est devenu évident que la période de refroidissement (principalement un effet de l'hémisphère Nord) avait en effet été une distraction temporaire. Lorsque la montée s'est poursuivie au 21^e siècle, pénétrant même dans les profondeurs de l'océan, les scientifiques ont reconnu qu'elle signalait un changement profond dans le système climatique. Rien de tel n'avait été vu depuis des siècles, et probablement pas depuis des millénaires. La configuration spécifique des changements, révélée dans des objets allant des journaux de bord aux calottes glaciaires en passant par les cernes des arbres, correspondait étroitement aux effets prévus des émissions de GES.

La température annuelle moyenne aux États-Unis en 2015 était de 12,5 °C, soit 1,3 °C de plus que la moyenne du XX^e siècle, la deuxième année la plus chaude jamais enregistrée. Seule l'année 2012 a été plus chaude pour les États-Unis avec une température moyenne de 12,9 °C. C'est la 19^e année consécutive où la température moyenne annuelle a dépassé la moyenne du 20^e siècle. La première partie de l'année a été marquée par une chaleur extrême dans l'Ouest et un froid dans l'Est, mais à la fin de 2015, un record de chaleur a été établi dans l'Est, avec des températures proches de la moyenne dans l'Ouest. Ce schéma de température a fait en sorte que chaque état a eu une température annuelle supérieure à la moyenne.

Les précipitations moyennes contiguës aux États-Unis ont été de 876 mm, soit 115 mm de plus que la moyenne, et se sont classées au troisième rang des années les plus humides sur la période record de 121 ans. Seules les années 1973 et 1983 ont été plus humides. Le Centre et le Sud-Est des États-Unis étaient beaucoup plus humides que la moyenne, tandis que certaines parties de l'Ouest et du Nord-Est étaient plus sèches que la moyenne. L'empreinte nationale de la sécheresse a diminué d'environ 10 % au cours de l'année.

En 2015, il y a eu 10 catastrophes météorologiques et climatiques, chacune ayant entraîné des pertes de plus d'un milliard de dollars. Il y a eu une sécheresse, deux inondations, cinq violentes tempêtes, un incendie de forêt et une tempête d'hiver. Ces événements ont entraîné la mort de 155 personnes et ont eu des effets économiques importants.



Activité 2 : (Discussion de groupe) (20 minutes)

Pourquoi est-ce un problème si la température moyenne de la terre se réchauffe un peu ?

2.2.3 Elévation du niveau de la mer

Les océans absorbent plus de 90 % de la chaleur atmosphérique accrue associée aux émissions provenant de l'activité humaine. Comme le mercure dans un thermomètre, l'eau se dilate en se réchauffant, ce qui fait monter le niveau de la mer. La fonte des glaciers et des calottes glaciaires contribue également à l'élévation du niveau de la mer à un rythme croissant.



Activité 3 : (Discussion de groupe) (20 minutes)

À quelle vitesse le niveau de la mer monte-t-il ?

Depuis la fin des années 1800, les marégraphes du monde entier ont montré que le niveau de la mer a augmenté d'environ 20 cm. Le taux d'élévation du niveau de la mer mesuré par les satellites a été environ deux fois plus élevé que celui observé au cours du siècle dernier, ce qui témoigne d'une accélération supplémentaire. Il est difficile de prévoir les taux futurs d'élévation du niveau de la mer. Même les modèles climatiques les plus sophistiqués, qui représentent explicitement les processus physiques de la Terre, ne peuvent pas simuler les changements rapides de la calotte glaciaire et risquent donc de sous-estimer

l'élévation future du niveau de la mer. Ces dernières années, des méthodes « semi-empiriques » ont été mises au point pour projeter les taux futurs d'élévation du niveau de la mer sur la base d'une relation statistique simple entre les taux passés de changement de la température moyenne mondiale et l'élévation du niveau de la mer. Ces modèles suggèrent une fourchette d'élévation supplémentaire du niveau de la mer allant d'environ 0,6 m à 1,8 m d'ici 2100, selon les scénarios d'émissions. Toutefois, quelle que soit l'ampleur des changements d'ici 2100, l'élévation du niveau de la mer devrait se poursuivre bien au-delà de ce siècle en raison des émissions passées et futures dues aux activités humaines.

Les scientifiques s'efforcent de réduire l'éventail des projections relatives à l'élévation du niveau de la mer pour ce siècle. Des projections récentes montrent que, même pour les scénarios d'émissions les plus faibles, l'expansion thermique des océans et la fonte des petits glaciers de montagne entraîneront une élévation du niveau de la mer de 0,28 m d'ici 2100, même sans la contribution des calottes glaciaires du Groenland et de l'Antarctique. Cela suggère qu'environ 0,3 m d'élévation du niveau mondial de la mer d'ici 2100 est probablement une limite inférieure réaliste. En particulier, la partie supérieure de ces scénarios peut être utile aux décideurs dont la tolérance au risque est faible. Bien que les scientifiques ne puissent pas encore attribuer de probabilité à un scénario particulier, on s'attendrait à ce que des scénarios d'émissions plus élevées qui entraînent un réchauffement plus important entraînent une élévation plus importante du niveau de la mer. Près de 5 millions de personnes aux États-Unis vivent à moins de 1,2 m du niveau local de la marée haute. Au cours des prochaines décennies, les ondes de tempête et les marées hautes pourraient se combiner avec l'élévation du niveau de la mer et l'affaissement des terres pour accroître encore les inondations dans bon nombre de ces régions. L'élévation du niveau de la mer ne s'arrêtera pas en 2100 parce que les océans mettent très longtemps à réagir à des conditions plus chaudes à la surface de la Terre. Les eaux océaniques continueront donc à se réchauffer et le niveau de la mer continuera à s'élever pendant de nombreux siècles à un rythme égal ou supérieur à celui du siècle actuel. En fait, des recherches récentes ont suggéré que même les niveaux actuels de CO₂ sont suffisants pour faire fondre complètement le Groenland au cours des prochains milliers d'années.



Questions de l'exercice (30 minutes)

- Quelles sont les causes de l'élévation actuelle du niveau de la mer à l'échelle mondiale ?
- De combien le niveau de la mer mondial devrait-il augmenter d'ici 2100 ?
- Y a-t-il des preuves que le niveau de la mer à l'échelle mondiale a augmenté au cours du XXe siècle et qu'il augmente actuellement ?



Résumé

Dans cette session, nous avons couvert les tendances et scénarios nationaux, régionaux et mondiaux du changement climatique. C'est ainsi que le climat change, pourquoi il change et ce qui est projeté pour l'avenir.

Références

Brown, C.J. , E.A. Fulton, A.J. Hobday, R.J. Matear, H.P. Possingham, C. Bulman, V. Christensen, R.E. Forrest, R.C. Gehrke, N.A. Gribble, S.P. Griffiths, H. Lozano-Montes, J.M. Martin, S. Metcalf, T.A. Okey, R. Watson et A.J. Richardson, 2010. Effets des changements de la production primaire dus au climat sur les réseaux alimentaires marins : Implications pour la pêche et la conservation. *Global Change Biology* 16 (4):1194-1212.

Dominic, F. , S.J. Burns, U. Neff, M. Mudulsee, A. Mangina et A. Matter, 2004. Interprétation paléoclimatique des profils isotopiques de l'oxygène à haute résolution dérivés des spéléothèmes laminés annuellement du sud d'Oman. *Quaternary Science Rev.* 23(8):935-945.

Edwards, P.G. et C.A. Miller, 2001. *Changer l'atmosphère : connaissances d'experts et gouvernance environnementale*. Cambridge, Mass, MIT Press.

LE GIEC. 2018. Annexe I : Glossaire [R. Matthews (éd.)]. Dedans : Réchauffement de la planète de 1,5°C. Un GIEC Rapport spécial sur les effets d'un réchauffement de la planète de 1,5 °C par rapport aux niveaux préindustriels et les voies d'émission de gaz à effet de serre connexes à l'échelle mondiale, dans le cadre du renforcement de la réponse mondiale à la menace des changements climatiques, du développement durable et des efforts visant à éliminer la pauvreté [V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H. O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J. B. R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M. I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, T. Waterfield (eds.)]. Dans la presse.

GIEC, 2014 : Changements climatiques 2014 : rapport de synthèse. Contribution des groupes de travail I, II et III au 5e rapport d'évaluation du GIEC. Genève, Suisse, 151 p

GIEC, 2013. La base des sciences physiques. Contribution du Groupe de travail I au cinquième rapport d'évaluation du GIEC. Stocker, T.F. et al. (éd.). Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York, États-Unis.

GIEC, 2007. Qu'est-ce que le changement et la variabilité climatiques ?

GIEC, 2001. Changement climatique 2001 : la base scientifique. Contribution du Groupe de travail 1 au 3ème Rapport d'évaluation du GIEC. Edité par JT Houghton et al. Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni, et New York, États-Unis, 2001. 881 p.

GIEC, 2000. Rapport spécial sur les scénarios d'émissions. Cambridge, Royaume-Uni : Université de Cambridge.

Melillo, J.M., T.C. Terese et W. Y. Gary, 2014. Impacts des changements climatiques aux États-Unis. La troisième évaluation nationale du climat. Programme américain de recherche sur les changements mondiaux.

CNRC, 2010. Faire progresser la science des changements climatiques. Conseil national de recherches. The National Academies Press, Washington, DC, USA.

O'Neill B.C. , E. Kriegler, K. Riahi, K.L. Ebi, S. Hallegatte, T.R. Carter, R. Mathur et D. P. Van Vuuren, 2013. Un nouveau cadre de scénarios pour la recherche sur le changement climatique : Le concept de parcours socio-économiques partagés.

Repetto, R. , 2008 : The Climate Crisis and the Adaptation Myth, Yale School of Forestry and Environmental Studies, document de travail numéro 13. Disponible à : <http://environment.research.yale.edu/documents/downloads/v-z/Working>.

Ruddiman, W.F, 2003. L'ère des serres anthropiques a commencé il y a des milliers d'années. *Climate Change* 61(3):261-293.

Sydney Coastal Councils Group, 2008. Cartographie de la vulnérabilité au changement climatique dans le groupe des conseils côtiers de Sydney. Disponible à : http://www.sydneycoastalcouncils.com.au/systemapproach-to-regional-climate-change-adaptation-strategiesin-metropolises/data_collection.php

Tol, R.S.J., 2002. Estimates of the Damage Costs of Climate Change, Part 2 : Dynamic Estimates, *Environmental and Resources Economics* 21(2):135-160.

Chapitre 3 : Surveillance des changements climatiques

Aperçu du chapitre

L'accès à des données actualisées de haute qualité et à d'autres informations pertinentes connexes est essentiel pour relever les défis du changement climatique. Ces informations comprennent des données climatiques (température, humidité, direction du vent, vitesse du vent, ensoleillement, précipitations et fréquence des événements extrêmes), ainsi que des données non climatiques (par exemple, en ce qui concerne la situation actuelle sur le terrain pour différents secteurs, notamment les ressources en eau, l'agriculture et la sécurité alimentaire, la santé humaine, les écosystèmes terrestres et la biodiversité, et les zones côtières).

Les formes de données climatiques sont très utiles pour modéliser le changement climatique et aussi pour élaborer des stratégies d'atténuation de ses effets à partir des tendances climatiques passées. La définition de normes uniformes de collecte de données est très importante pour la production d'informations météorologiques de base fiables et véritablement mondiales. La fiabilité des données de base sur les changements climatiques dépendra de la source de vos données, des méthodes de collecte, des instruments utilisés et de la façon dont la gestion, l'analyse et l'interprétation sont effectuées. Ce chapitre présentera aux apprenants les différentes sources de données climatiques et non climatiques, les méthodes de collecte de données, les outils et l'instrumentation, la gestion, l'analyse et l'interprétation des données.



Objectif

Produire des données pertinentes et surveiller les changements climatiques



Résultats d'apprentissage

A la fin de ce chapitre, les apprenants seront en mesure de :

- distinguer les données et les sources climatiques et non climatiques ;
- appliquer des méthodes appropriées de collecte de données climatiques ;
- nettoyer, analyser et interpréter les données climatiques ; et
- traduire les données climatiques en informations significatives pour la prise de décisions dans le secteur forestier et ses secteurs connexes.

3.1 Types et sources de données

«Sans données, vous êtes comme une autre personne avec une opinion»

3.1.1 Introduction

Cette session de formation présente les différents types de données sur les changements climatiques. Il nous éclaire davantage sur les diverses sources de données sur le changement climatique.



Objectifs

À la fin de cette session, l'apprenant sera en mesure de :

- identifier les différents types de données sur le changement climatique
- analyser les différentes sources de données sur le changement climatique.

3.1.2 Types de données

Les données quantitatives ou numériques surviennent lorsque les observations sont des dénombrements ou des mesures. Les données sont dites discrètes si les mesures sont des nombres entiers (par exemple, le nombre de personnes dans une maison, le nombre de cigarettes fumées par jour) et continues si les mesures peuvent prendre n'importe quelle valeur, généralement dans une certaine fourchette (par exemple, le poids).

Les données qualitatives surviennent lorsque les observations sont classées dans des catégories distinctes. Par exemple, la couleur des yeux (bleu, vert, brun, etc.), le résultat de l'examen (réussite ou échec) et le statut socio-économique (faible, moyen ou élevé). Les données sont classées comme nominales s'il n'y a pas d'ordre naturel entre les catégories (p. ex. couleur des yeux), ou ordinales s'il existe un ordre (p. ex. résultats d'examen, statut socioéconomique).



Questions textuelles (10 minutes)

- Identifier et définir les principaux types de données
- Sous chaque type, donner quelques exemples de données climatiques qui en relèvent.

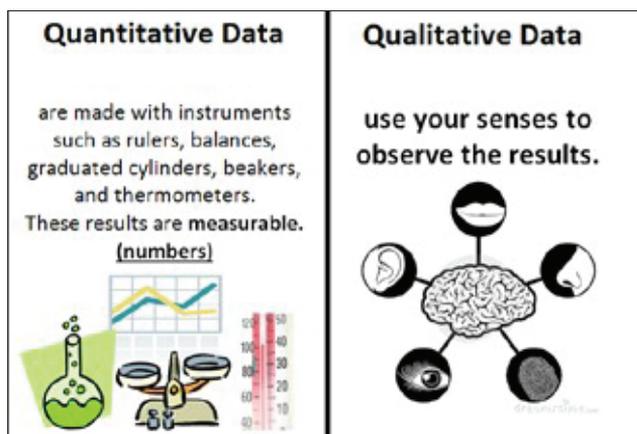


Figure 49. Données quantitatives vs données qualitatives.

Source : Kenan (2015)

3.1.3 Sources des données

- Réseau mondial de climatologie historique (GHCN)
- Centres nationaux de prévision environnementale (NCEP)
- Unité de recherche sur le climat (URC) de l'Université d'East Anglia (UEA) et de l'Institut international de gestion de l'eau (IWMI)
- Modèles de circulation générale (MCG)
- Profils climatiques du PNUD
- CI:GRASP
- Partenariat international sur l'atténuation du MRV
- IRI Colombie
- Modèles climatiques CIAT
- Services climatiques de la NOAA
- SERVIR
- Centre de distribution des données du GIEC



Activité 2 : (Discussion de groupe) (20 minutes)

Discutez des principales sources de données climatiques dans le monde, du type de données qu'elles fournissent et de l'importance de ces données.



Résumé

Au cours de cette session, nous avons appris à connaître certains types de données clés et les diverses sources de données sur le changement climatique. Au cours de la prochaine session, nous nous familiariserons avec les diverses méthodes de collecte de données climatiques.

3.2 Méthodes de collecte des données

Vous pouvez avoir des données sans information, mais vous ne pouvez pas avoir l'information sans données»

3.2.1 Introduction

Cette formation nous présente les différentes méthodes de collecte de données sur les changements climatiques.



Objectif

A la fin de cette session, l'apprenant devrait être capable d'identifier les différentes méthodes utilisées pour la collecte des données climatiques.



Activité 1 : Remue-méninges (20 minutes)

Partagez vos points de vue sur les différents types de méthodes de collecte de données que vous avez utilisées auparavant dans votre pays d'origine.

3.2.2 Méthodes de collecte des données

- Expériences
- Recensement
- Questionnaires
- Interviews
- Recherche-action
- Études de cas
- Enregistrements
- Étude observationnelle
- Groupes de discussion



Questions de l'exercice (30 minutes)



Figure 50. Outils et instrumentation.

Source : Écologie souterraine (2016)

Étudiez attentivement la figure ci-dessus et réalisez les activités suivantes :

- identifier tous les instruments ;
- déterminer à quoi sert chacun des instruments dans la collecte de données climatiques;
- identifier les erreurs que chaque instrument peut produire pendant la collecte des données ; et
- identifier les différentes manières de maintenir chaque instrument.



Activité 2 : (Discussion de groupe) (20 minutes)

Discutez des défauts associés à chaque méthode de collecte pendant la collecte des données climatiques.



Résumé

Au cours de cette session, nous avons pris connaissance des méthodes utilisées pour collecter les données climatiques. Au cours de la prochaine session, nous apprendrons à connaître les différents outils et instruments utilisés pour la collecte des données climatiques.

1.3 Outils et instrumentation

«*Tout ce qui est mesuré et regardé, s'améliore*»

3.3.1 Introduction

Cette session de formation nous présente les différents outils et instruments impliqués dans la collecte des données climatiques. Cela nous éclaire davantage sur ce à quoi ils servent exactement.



Objectifs

A la fin de cette session, l'apprenant devrait être capable de :

- identifier les divers outils et instruments utilisés pour la collecte de données climatiques
- identifier les fonctions de ces outils et instruments.



Activité 1 : Remue-ménages (20 minutes)

Partagez vos points de vue sur l'essence de la compréhension des outils et de l'instrumentation dans la collecte de données climatiques.

3.1.2 Outils et instruments utilisés pour enregistrer les données climatiques

Le thermomètre (fig. 51) est un instrument utilisé pour mesurer la température en degrés Celsius ou Fahrenheit. Lorsque la température augmente, le mercure dans le thermomètre augmente lorsqu'elle diminue, le mercure diminue.

L'anémomètre (fig. 52) est un type d'instrument météorologique qui mesure la vitesse du vent. Un anémomètre et une girouette sont souvent combinés en un seul instrument pour recueillir de l'information sur l'air en mouvement. L'anémomètre montré ici est appelé anémomètre à coupelle. Lorsque l'air se déplace et que les coupes tournent, les données sont recueillies mécaniquement pour produire une évaluation de la vitesse et de la force du vent.



Figure 51. Thermomètre.

Source: http://www.weatherwizkids.com/?page_id=82



Figure 52. Anémomètre.

Source : http://www.weatherwizkids.com/?page_id=82

La girouette/girouette/Coq météo (fig. 53) est un instrument utilisé pour déterminer la direction à partir de laquelle l'air se déplace. Par exemple, un vent d'Ouest se déplace d'Ouest en Est, et non vers l'Ouest.



Figure 53. La girouette.

Source : http://www.weatherwizkids.com/?page_id=82



L'hygromètre (fig. 54) est un instrument utilisé pour mesurer l'humidité relative.

Figure 54. Hygromètre.

Source : Khara (2016)

Le pluviomètre/Udomètre/Pluviomètre/Fluviographe (fig. 55) est un instrument permettant de mesurer la quantité de précipitations liquides sur une certaine durée. Ils peuvent être montés comme l'image du haut ou ils peuvent être ancrés dans le sol comme l'image du bas.



Figure 55. Pluviomètre.

Source: http://www.weatherwizkids.com/?page_id=82

Le baromètre (fig. 56) est utilisé pour mesurer la pression atmosphérique. Les météorologues peuvent déterminer si la pression de l'air augmente ou diminue à l'aide d'un baromètre. Ces données peuvent ensuite être utilisées pour prévoir des conditions météorologiques spécifiques. Les hautes pressions indiquent du beau temps, tandis que les basses pressions indiquent du temps orageux.

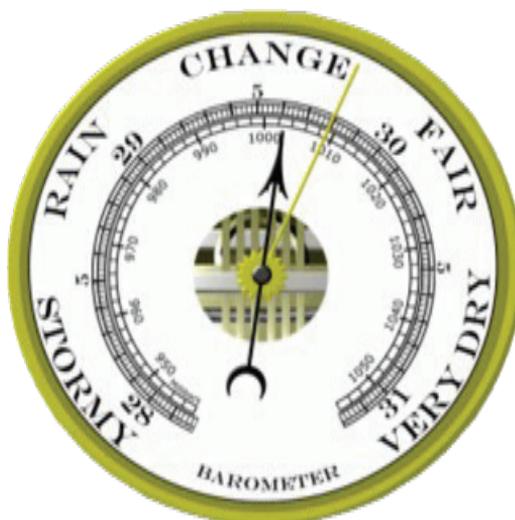


Figure 56. Baromètre.

Source: http://www.weatherwizkids.com/?page_id=82

Le sismographe (fig.57) est un instrument utilisé pour mesurer les mouvements du sol causés par des tremblements de terre ou des explosions.

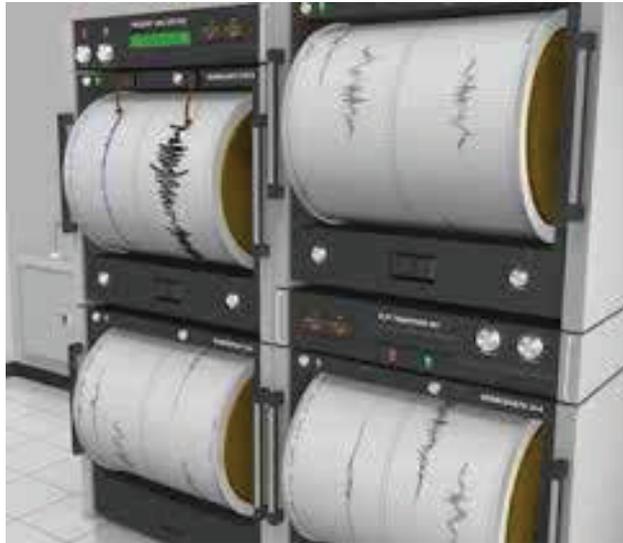


Figure 57. Sismographe

Source: http://www.weatherwizkids.com/?page_id=96

L'hydromètre (fig. 58) est un instrument utilisé pour mesurer la densité relative ou le poids spécifique des liquides.



Figure 58. Hydromètre.

Source: http://www.wilko.com/homebrew-accessories+equipment/_wilko-hydrometer-loose-wine-and-beer/invt/0022575

Le nivomètre (fig. 59) est un instrument utilisé pour mesurer les précipitations solides.



Figure 59. Jauge à neige. Source :

http://www.globalspec.com/learnmore/sensors_transducers_detectors/weather_sensing/weather_instruments

L'enregistreur d'ensoleillement (fig. 60) est un instrument qui enregistre la quantité d'ensoleillement à un endroit donné.



Figure 60. Enregistreur de soleil.

Source : http://www.metcheck.co.uk/acatalog/Sunshine_Recorder.html

La manche à vent (fig. 61) est un tube textile conique qui ressemble à une chaussette géante, conçu pour indiquer la direction et la vitesse relative du vent

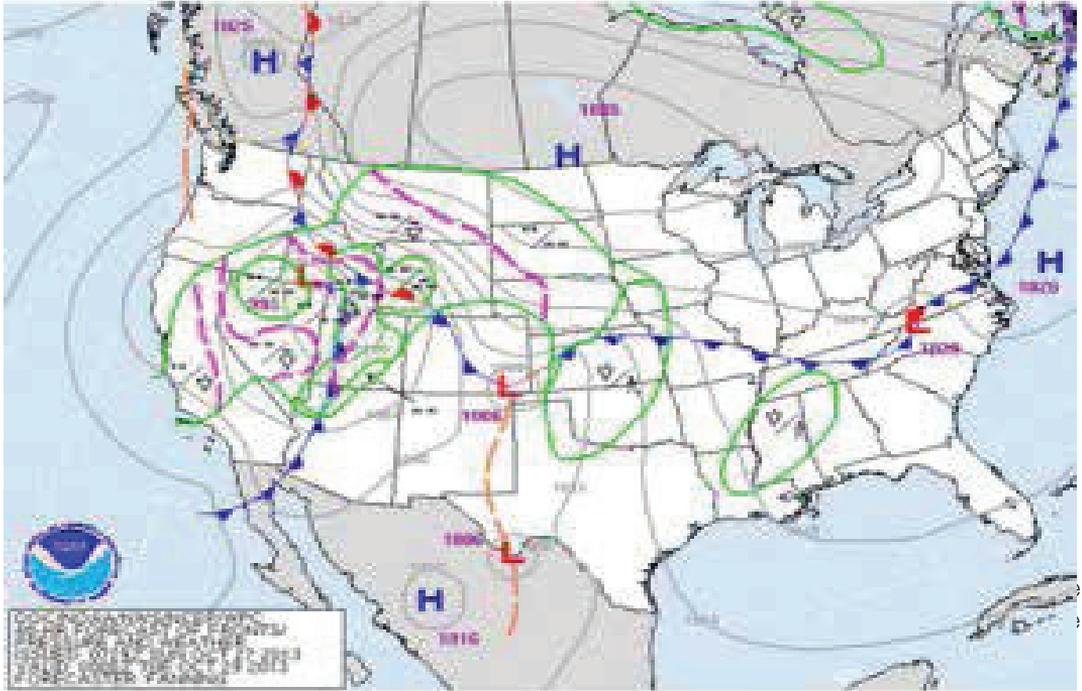


Figure 62. Cartes météorologiques.

Source : http://www.weatherwizkids.com/?page_id=82

Le ballon météo (fig. 63) mesure les conditions météo plus haut dans l'atmosphère.



Figure 63. Ballon météo.

Source : http://www.weatherwizkids.com/?page_id=82

La boussole (fig. 64) est un instrument de navigation permettant de trouver des directions.



Figure 64. La boussole.

Source : http://www.weatherwizkids.com/?page_id=82

Le satellite météorologique (fig. 65) est utilisé pour photographier et suivre les mouvements d'air à grande échelle. Ensuite, les météorologues compilent et analysent les données à l'aide d'ordinateurs.



Figure 65. Satellite météorologique.

Source : http://www.weatherwizkids.com/?page_id=82

Votre œil (fig. 66) est l'un des meilleurs moyens d'aider à détecter le temps. Gardez toujours un œil sur le ciel et vous serez généralement au courant des conditions météorologiques.



Figure 66. Ton œil.

Source: http://www.weatherwizkids.com/?page_id=82



Questions textuelles (10 minutes)

- 1) Identifier certains instruments couramment utilisés pour la collecte de données climatiques.
- 2) Identifier à quoi sert chaque instrument énuméré ci-dessus.



Activité 2 : (Discussion de groupe) (20 minutes)

Discutez de la façon dont les instruments peuvent être entretenus et comment ils peuvent être utilisés pour minimiser les erreurs dans les données recueillies.



Questions de l'exercice (30 minutes)

Figure 67 : Outils et instrumentation.



Source : <http://www.slideshare.net/atylor29/weather-instruments-33270034>

Étudiez attentivement la figure ci-dessus et réalisez les activités suivantes :

- 1) identifier tous les instruments ;
- 2) déterminer à quoi sert chacun des instruments dans la collecte de données climatiques ;
- 3) identifier les erreurs que chaque instrument peut produire pendant la collecte des données ; et
- 4) identifier les différentes manières de maintenir chaque instrument.



Résumé

Les risques et les dangers du changement climatique ont été présentés dans Au cours de cette session, nous avons appris à connaître certains instruments clés utilisés dans la collecte de données climatiques et à quoi ils servent. Dans la prochaine session, nous apprendrons la gestion, l'analyse et l'interprétation des données climatiques.

3.4 Introduction à la Gestion des données, analyses descriptives et interprétation

« Les données sont une chose précieuse et dureront plus longtemps que les systèmes eux-mêmes »

3.4.1 Introduction

Cette séance de formation nous présente la façon dont les diverses données climatiques recueillies peuvent être gérées pour l'utilisation actuelle et future. Elle nous éclaire davantage sur l'analyse et l'interprétation des données climatiques à des fins scientifiques et pour la prise de décisions.



Objectifs

À la fin de cette session, l'apprenant sera en mesure de

- démontrer leur capacité à gérer les données climatiques ;
- analyser et interpréter les données climatiques.



Activité 1 : Remue-méninges (20 minutes)

Partagez vos points de vue sur votre participation à tout processus d'analyse et d'interprétation des données.

3.4.2 Gestion des données

- La gestion des données est le processus de contrôle de l'information générée au cours d'un projet de recherche. Toute recherche nécessitera un certain niveau de gestion des données.
- Au cours de votre recherche, vous pouvez accumuler une grande quantité de données, qui devront être soigneusement organisées et gérées pour une analyse ultérieure
- La gestion des données climatiques consiste à recueillir, à enregistrer et à archiver les données météorologiques et climatiques provenant du réseau d'observation du Ministère.
- L'objectif fondamental de la gestion des données climatiques est de préserver, de saisir et de fournir l'accès aux données et aux produits des clients à l'usage des planificateurs, des décideurs et des chercheurs. Les données climatiques sont stockées et gérées dans un système de gestion des données climatiques (SGDC).
- Un SGDC est un ensemble d'outils et de procédures qui permet de stocker et de gérer correctement toutes les données pertinentes pour les études climatiques.
- Les principaux objectifs de la gestion de la base de données sont de maintenir l'intégrité de la base de données en tout temps et de s'assurer qu'elle contient toutes les données et métadonnées nécessaires pour répondre aux besoins pour lesquels elle a été conçue, maintenant et à l'avenir.
- Les systèmes de gestion de bases de données ont révolutionné la gestion des données climatiques en permettant un stockage, un accès, une conversion et une mise à jour efficaces pour de nombreux types de données, et en renforçant la sécurité des données.
- Les principales opérations de traitement des données ont été automatisées, avec l'aide des ordinateurs à toutes les étapes du traitement.

- Le contrôle de la qualité des données est effectué par un logiciel adapté de l'OMM, CLICOM, qui est maintenant remplacé par une base de données plus récente, CLIMFOT
- Dans la planification de la gestion, il faut également tenir compte de la durée de vie à long terme des données climatiques, afin qu'elles restent disponibles comme ressource pour les futurs utilisateurs. Parmi les questions à prendre en compte figure la planification de la relève et la formation du personnel, le cycle de remplacement du matériel, les coûts de maintenance et de mise à niveau, le soutien et la formation pour les logiciels du marché.



Questions textuelles (10 minutes)

- 1) Qu'est-ce que la gestion des données ?
- 2) Quelle est la pertinence de la gestion des données en ce qui concerne les données climatiques ?

3.4.3 Analyse et interprétation des données

- L'analyse et l'interprétation des données sont un processus par lequel on donne un sens et une signification aux données recueillies dans la recherche qualitative, et par lequel les connaissances émergentes sont appliquées aux problèmes du client. Ces données sont sous la forme des enregistrements de discussions de groupe et des entretiens, mais ne se limitent pas à cela. Par des processus de réexamen et d'immersion dans les données, et par des activités complexes de structuration, de recadrage ou d'exploration d'une autre manière, le chercheur explore des modèles et les aperçus pertinents aux questions de recherche et les utilise pour aborder la thèse du client.
- Les données brutes telles que les tableaux de nombres (dates et température), les descriptions (couverture nuageuse), l'emplacement, etc. peuvent être utiles en soi. Par exemple, si vous vouliez connaître la température de l'air à Londres le 5 juin 1801. Mais les données seules ne peuvent rien vous dire sur la façon dont la température a changé à Londres au cours des deux cents dernières années, ni sur la façon dont cette information est liée au changement climatique à l'échelle mondiale. Afin de voir les modèles et les tendances dans les données, il faut d'abord les analyser et les interpréter.
- Les données analysées et interprétées peuvent ensuite être utilisées comme preuve dans des arguments scientifiques, pour appuyer une hypothèse ou une théorie. De bonnes données sont un trésor potentiel - elles peuvent être exploitées par les scientifiques à tout moment et, par conséquent, une partie importante de toute investigation scientifique est l'enregistrement précis et cohérent des données et des méthodes utilisées pour collecter ces données.
- Le traitement et l'analyse des données sont parfois interprétés à tort comme une manipulation des données pour obtenir les résultats souhaités mais, en réalité, le but de ces démarches est de rendre les données plus claires, et non de les modifier fondamentalement.
- Les données analysées peuvent alors être interprétées et expliquées. En général, lorsque les scientifiques interprètent des données, ils tentent d'expliquer les modèles et les tendances dégagés par l'analyse, ils mettent à profit toutes leurs connaissances, leur expérience et leurs compétences pour répondre à la question et ils relient leurs données aux idées scientifiques existantes.



Activité 2 : (Discussion de groupe) (20 minutes)

Discutez des processus impliqués dans la gestion, l'analyse et l'interprétation des données climatiques



Résumé

Au cours de cette session, nous avons appris à gérer, analyser et interpréter les données climatiques, ceci clôture le chapitre sur la production de données de référence sur le changement climatique.

Références

"Data Collection Methods". Available online: <https://people.uwec.edu/piercech/ResearchMethods/Data%20collection%20methods/DATA%20COLLECTION%20METHODS.htm>

"Weather Instruments and Equipment explained" Available online: <http://www.nwclimate.org/guides/meteorological-instrumentation/>

Attride-Stirling, J., 2001. Thematic networks: an analytic tool for qualitative research. *Qualitative Research*, SAGE Publications (London, Thousand Oaks, CA and New Delhi) 1(3):385–405. Available online: <http://utsc.utoronto.ca/~kmacd/IDSC10/Readings/Readings/text%20analysis/themes.pdf>

Egger, A. E. & A. Carpi, 2009. "Data collection, analysis, and interpretation" *Visionlearning*. Vol. HID (5). Available online: <http://www.visionlearning.com/en/library/Hidden/59/Data-collection-analysis-andinterpretation:/167>

Egger, A.E. & A. Carpi, 2011. *The Process of Science*. Lulu.com. ISBN 1257961322, 9781257961320.

270pp. Harrell M.C. & M.A. Bradley, 2009. *Data collection methods: Semi-structured interviews and focus groups*.

RAND Corporation. TR-718-USG. 146pp. Available online: http://www.rand.org/content/dam/rand/pubs/technical_reports/2009/RAND_TR718.pdf

Kenan, D., 2015. Qualitative vs. quantitative data. Available online: <https://kenandeen.wordpress.com/2015/01/18/quantitative-vs-qualitative-data/>

Khara, K., 2016. How to calibrate a hygrometer. *Buzzle*. Available online: <http://www.buzzle.com/articles/hygrometer-calibration-how-to-calibrate-hygrometer.html>

Metacheck Weather Instruments: sunshine recorder. Available online: http://www.metcheck.co.uk/acatalog/Sunshine_Recorder.html

National Environment Agency of Singapore, 2013. *Weather Instruments*. Available online: <http://www.nea.gov.sg/training-knowledge/weather-climate/weather-instruments>

Stephenson, D.B., 2005. *Data analysis methods in weather and climate research*. Department of Meteorology, University of Reading, UK. 98pp. Available online: http://www.realtechsupport.org/UB/CM/current/DataAnalysisWeatherResearch_2005.pdf

Strat Trek, 2016. *Data Collection Methods*. Available online: <http://stattrek.com/statistics/data-collection-methods.aspx?Tutorial=AP>

Subterranean Ecology, 2016. *Scientific Environmental Services: services overview*. On site Pilbara, Western Australia. Available online: <http://www.subterraneanecology.com.au/services/stygofauna-services/services-overview>

The World Bank Group, 2016. *Climate Change Knowledge Portal for development practitioners and policy makers: Global climate data*. Available online: http://sdwebx.worldbank.org/climateportal/index.cfm?page=climate_data.

Weather Instruments Information. Available online: http://www.globalspec.com/learnmore/sensors_transducers_detectors/weather_sensing/weather_instruments

Weather Instruments. Available online: <http://www.slideshare.net/at Tyler29/weather-instruments-33270034>

Weather Processes and Systems (Chapter 11). Available online: <http://www.opengeography.org/ch->

11weather-processes-and-systems.html

Wilko Hydrometer Loose Wine and Beer. Available online: <http://www.wilko.com/homebrew-accessories+equipment/wilko-hydrometer-loose-wine-and-beer/invt/0022575>

Hydromètre Wilko Vin et bière en vrac. Disponible en ligne : <http://www.wilko.com/homebrew-accessories+equipement/wilko-hydrometer-loose-wine-and-beer/invt/0022575>

Chapitre 4 : Vulnérabilité et impact de changement climatique

Aperçu général

Depuis quelques années, le changement climatique est devenu un sujet de préoccupation mondiale. La température moyenne à la surface du globe a augmenté d'environ 0,6 degré Celsius au cours des 100 dernières années. Le changement climatique a déjà eu un impact important sur notre planète. La fonte des calottes glaciaires polaires, la modification de la configuration des précipitations et l'augmentation de la fréquence des tempêtes sont quelques-uns des effets néfastes. Sauver notre planète, sortir la population de la pauvreté, faire progresser la croissance économique, sont le même combat. Nous devons faire des liens entre le changement climatique, la pénurie d'eau, les pénuries d'énergie, la santé mondiale, la sécurité alimentaire et l'autonomisation des femmes. Les solutions à un problème doivent être des solutions pour tous. La vulnérabilité est un élément essentiel de la science de base du changement climatique parce qu'elle comprend un ensemble de conditions déterminées par des facteurs ou des processus physiques, sociaux, économiques et environnementaux, qui augmentent la vulnérabilité d'une communauté à l'impact des dangers ou à être affecté par le stress externe. Les impacts démontrent l'effet du changement climatique sur différents secteurs des systèmes naturels et humains. Ces impacts ont de graves implications pour les sociétés en aggravant les vulnérabilités. Pour contenir ces effets négatifs, il faudra mettre au point des mécanismes d'adaptation au changement climatique. Ce chapitre présentera aux apprenants les concepts de vulnérabilité, de vulnérabilité biophysiques et ses d'impacts, de vulnérabilité socio-économique et ses d'impacts, de prévention des catastrophes et de risques associés au changement climatique.



Objectif

Reliez les concepts de vulnérabilité et de réponse au changement climatique.



Activité 2 (Discussion de groupe) (20 minutes)

- Discutez des trois causes naturelles des feux de forêt



Résultats d'apprentissage

A la fin de ce chapitre, l'apprenant sera capable de

- classer les concepts clés impliqués dans la vulnérabilité des systèmes aux impacts du changement climatique ;
- décrire les effets biophysiques et socio-économiques du changement climatique sur les écosystèmes ; et
- expliquer les risques associés au changement climatique et la façon d'entreprendre la réduction des risques de catastrophes dans divers secteurs.

4.1. Le concept de vulnérabilité : définitions des terminologies

4.1.1 Introduction

Cette session de formation nous présente la vulnérabilité des systèmes aux impacts du changement climatique. Elle nous éclaire aussi sur la définition de certains concepts clés de la vulnérabilité, tels que l'exposition, la sensibilité, la capacité d'adaptation/résilience, etc. Il permet d'expliquer les différents concepts de vulnérabilité et leurs implications en matière de changement climatique.



Objectifs

A la fin de cette session, l'apprenant devrait être capable de :

- a) définir la vulnérabilité ; et,
- b) expliquer certains concepts clés de la vulnérabilité.



Activité 1 : Remue-méninges (20 minutes)

Partagez vos points de vue sur la vulnérabilité humaine aux impacts du changement climatique.

4.1.2 Définitions et terminologies de la vulnérabilité aux changements climatiques

La vulnérabilité est la mesure dans laquelle un système naturel ou social est susceptible de subir des dommages dus au changement climatique, et est fonction de l'ampleur des changements, de la sensibilité du système aux changements et de la capacité d'adaptation du système à ces changements. Par conséquent, un système très vulnérable est un système qui est très sensible aux modestes modifications du climat et pour lequel la capacité d'adaptation est fortement limitée.



Questions textuelles (10 minutes)

- 1) Expliquer le terme « vulnérabilité » dans le contexte du changement climatique.
- 2) Identifier certains systèmes naturels et leur vulnérabilité au changement climatique.
- 3) Identifier certains systèmes sociaux et leur vulnérabilité au changement climatique.

L'exposition est le degré de stress climatique sur une unité d'analyse particulière, représenté soit par un changement à long terme des conditions climatiques, soit par des changements dans la viabilité du climat, y compris l'ampleur et la fréquence des événements extrêmes.

La sensibilité est le degré auquel un système est affecté, soit négativement, soit positivement, par des stimuli liés au climat.

La capacité d'adaptation est la capacité d'un système à s'adapter au changement climatique (y compris les variations et les extrêmes climatiques), à modérer les dommages potentiels, à tirer parti des opportunités ou à faire face aux conséquences.

**Activité 2 : (Discussion de groupe) (20 minutes)**

Discutez de la manière dont la vulnérabilité est liée aux impacts du changement climatique en Afrique.

**Questions de l'exercice (30 minutes)**

Figure 68. Outils et instrumentation.

Source : VOA (2010)

Étudiez attentivement la figure et réalisez les activités suivantes :

- 1) identifiez ce qui se passe sur la scène ;
- 2) établissez le lien entre la capacité d'adaptation, la sensibilité et l'exposition en ce qui concerne la vulnérabilité ; et
- 3) identifiez les moyens de résoudre ces problèmes.

**Résumé**

Au cours de cette session, nous avons appris certains termes clés, tels que la vulnérabilité, l'exposition, la sensibilité et la capacité d'adaptation. Au cours de la prochaine séance, nous examinerons la vulnérabilité des systèmes biophysiques aux impacts du changement climatique.

4.2 Vulnérabilité des systèmes biophysiques et impacts

«Quand le dernier arbre meurt, le dernier homme meurt»

4.2.1 Introduction

Cette session de formation nous présente les différents systèmes biophysiques et leur vulnérabilité au changement climatique. Elle nous éclaire sur les diverses manières dont certains éléments de la biodiversité, de la topographie et des facteurs édaphiques sont affectés par le changement climatique. Elle aide à expliquer la vulnérabilité des systèmes biophysiques aux impacts du changement climatique.



Objectifs

À la fin de cette session, l'apprenant sera en mesure de

- a) définir un système biophysique ;
- b) déterminer les facteurs clés qui contribuent au succès d'un système biophysique ;
- c) expliquer comment les facteurs contribuent au succès du système biophysique; et
- d) expliquer les impacts du changement climatique sur ces systèmes biophysiques.



Activité 1 : Remue-méninges (20 minutes)

Analysez les différents systèmes d'un environnement et expliquez comment chaque système est vulnérable au changement climatique.

4.2.2 Définitions et terminologies de la vulnérabilité des systèmes biophysiques aux impacts du changement climatique

Le système biophysique est un système biologique qui fait appel à des méthodes et des théories physiques.

La biodiversité est le terme donné à la variété de la vie sur Terre. Il s'agit de la variété au sein de toutes les espèces de plantes, d'animaux et de micro-organismes et entre elles, ainsi que des écosystèmes dans lesquels elles vivent et interagissent.

Les gènes sont des segments d'ADN situés sur les chromosomes. Ils existent sous des formes alternatives appelées allèles, qui déterminent les traits qui peuvent être transmis des parents à la progéniture.

L'espèce est un groupe d'organismes étroitement apparentés qui sont très semblables les uns aux autres et sont généralement capables de se croiser et de produire une progéniture féconde.

Les écosystèmes comprennent tous les êtres vivants (plantes, animaux et organismes) dans une zone donnée, qui interagissent entre eux, mais aussi avec leurs environnements non vivants (temps, terre, soleil, sol, climat et atmosphère).

Les facteurs édaphiques sont les propriétés écologiques du sol résultant de ses caractéristiques physiques et chimiques.



Questions textuelles (10 minutes)

Définissez les terminologies suivantes à l'aide d'exemples :

- 1) Systèmes biophysiques ;
- 2) Biodiversité ;
- 3) Gènes ;
- 4) Espèces ;
- 5) Écosystèmes ; et,
- 6) Facteurs édaphiques.

4.2.3 Vulnérabilité de la biodiversité aux impacts du changement climatique

Le changement climatique entraîne l'extinction de nombreuses espèces végétales et animales et provoque également la réduction de la diversité des écosystèmes terrestre, d'eau douce et marin. Selon le GIEC, 20 à 30 % des espèces végétales et animales sont susceptibles d'être davantage menacées d'extinction si l'augmentation de la température moyenne mondiale dépasse 1,5 à 2,5 °C.

- La vulnérabilité des écosystèmes et des espèces est en partie fonction du rythme rapide prévu du changement climatique par rapport à la résilience de ces systèmes. Un million d'espèces pourraient être confrontées à une menace croissante d'extinction en raison du changement climatique, selon l'Évaluation du système écologique du millénaire.
- Le développement humain réduit considérablement la résilience des écosystèmes et rend de nombreux écosystèmes et espèces plus vulnérables au changement climatique en raison de l'obstruction des voies de migration, de la fragmentation des habitats, de la réduction des populations, de l'introduction d'espèces exotiques et des stress liés à la pollution.
- Les changements dans la distribution des espèces, la phénologie et les interactions écologiques auront des répercussions, par exemple sur la pollinisation, les invasions de systèmes agricoles par les mauvaises herbes et l'emplacement des principaux lieux de pêche.
- Le changement climatique a déjà commencé à affecter le fonctionnement, l'apparence, la composition et la structure des écosystèmes (par exemple, diminution de l'épaisseur de la glace de mer dans l'Arctique, blanchiment généralisé des coraux, salinisation des zones humides et intrusion d'eau salée). Les changements dans le calendrier des événements naturels affectent les interactions entre les organismes, perturbant les équilibres et les écosystèmes.

4.2.4 Vulnérabilité des facteurs édaphiques aux impacts du changement climatique

- La modification de certains paramètres climatiques tels que la température et les régimes de précipitations endommagent la structure physique des sols. La température et l'eau ont une grande influence sur les processus qui se déroulent dans les sols. La matière organique est particulièrement touchée. Cet équilibre est essentiel pour l'équilibre nutritif du sol, sa stabilité, la quantité d'eau qu'il peut contenir et la population des organismes du sol.
- En outre, les changements sont susceptibles de rendre certains sols plus vulnérables à l'érosion. Le changement climatique affecte les propriétés du sol telles que la teneur en humidité, la capacité d'infiltration, la capacité de rétention d'eau, la température, la teneur en éléments nutritifs, la teneur en matière organique, etc.



Activité 1 : (Discussion de groupe) (20 minutes)

Discutez de la vulnérabilité des sols forestiers aux impacts du changement climatique en Afrique.



Questions exercice (30 minutes)

Figure 69. Vulnérabilité des systèmes biophysiques au changement climatique

Source : Schuetze C. F (2013)

Étudiez attentivement la figure et réalisez les activités suivantes :

- 1) décrire l'activité réalisée dans la photographie ;
- 2) énumérer les systèmes biophysiques présents dans la photographie ; et
- 3) expliquer les diverses façons dont les activités sur la photographie affecteront les systèmes biophysiques impliqués.



Résumé

Au cours de cette session, nous avons appris ce qui rend certains systèmes biophysiques vulnérables au changement climatique et à ses impacts. La session a également mis en évidence divers concepts impliqués dans la vulnérabilité d'un système au changement climatique. Dans la prochaine session, nous apprendrons comment l'aspect socio-économique et les moyens de subsistance des populations sont vulnérables aux impacts du changement climatique.

4.3 Vulnérabilité et impacts socio-économiques et sur les moyens de subsistance

«Le changement climatique est un problème terrible, et il doit absolument être résolu. Cela mérite d'être une priorité énorme»

4.3.1 Introduction

Cette session de formation présente la vulnérabilité du développement socio-économique et des moyens de subsistance aux impacts du changement climatique. Elle nous éclaire sur la façon dont les domaines clés du développement socio-économique et des moyens de subsistance, comme l'infrastructure et l'établissement des collectivités, sont touchés par les répercussions du changement climatique. Elle explique en outre comment divers secteurs comme la forêt, la santé, l'agriculture et la sécurité alimentaire, les ressources hydriques et côtières et le transport sont vulnérables aux impacts du changement climatique.



Objectifs

À la fin de cette session, l'apprenant sera en mesure de

- expliquer comment les infrastructures et les établissements sont vulnérables au changement climatique.
- expliquer que les différents secteurs dans le monde sont vulnérables au changement climatique.



Activité 1 : Remue-méninges (20 minutes)

Partagez vos points de vue sur les diverses manières dont le changement climatique a eu des répercussions sur les infrastructures et les établissements dans votre pays d'origine.

4.3.2 Vulnérabilité des infrastructures et des établissements aux impacts du changement climatique

- Le changement climatique pourrait affecter la durabilité des établissements humains soit en affectant directement la qualité de vie (par exemple en modifiant la probabilité des inondations ou les effets de la pollution atmosphérique), soit en modifiant les effets des établissements sur leur environnement (par exemple en modifiant la demande d'eau ou la capacité d'assimilation des zones humides), soit en modifiant les fondements économiques (par exemple en modifiant la productivité des terres cultivées, des forêts ou des pêcheries dont dépend l'établissement).
- La plupart des impacts du changement climatique sur les établissements humains sont susceptibles d'être ressentis indirectement par le biais d'effets sur d'autres secteurs (par exemple, les changements dans l'approvisionnement en eau, la productivité agricole et la migration humaine).
- Bon nombre des impacts attendus dans le monde en développement se produiront parce que le changement climatique pourrait, en réduisant la productivité des ressources naturelles dans les zones rurales, accélérer la migration des campagnes vers les villes, aggravant ainsi des conditions déjà difficiles dans les villes et épuisant davantage la main-d'œuvre des campagnes.
- On peut s'attendre à ce que le réchauffement de la planète affecte la disponibilité des ressources en eau et de la biomasse, qui sont toutes deux des sources d'énergie importantes dans de nombreux pays en développement. La perte de ressources en eau et de biomasse peut mettre

en péril l'approvisionnement en énergie et en matériaux essentiels à l'habitation humaine et à la production d'énergie.

- Dans les zones rurales, en particulier celles des pays à faible revenu, les routes représentent une bouée de sauvetage pour les moyens de subsistance écologiques et agricoles, ainsi qu'un certain nombre d'avantages indirects, notamment l'accès aux soins de santé, à l'éducation, au crédit, à la participation politique, etc.
- Les routes peuvent être dispersées selon les lieux géographiques, ce qui rend chaque route essentielle. Les événements extrêmes constituent un danger coûteux pour les routes en termes de dégradation, d'entretien nécessaire et de diminution potentielle de la durée de vie. Le changement climatique a des répercussions coûteuses en termes d'entretien, de réparations et de perte de connectivité.



Activité 2 : (Présentation de groupe) (20 minutes)

Divisez-vous en quatre groupes, chaque groupe représentant un continent du monde. Vous ferez des présentations de groupe sur la vulnérabilité des infrastructures et des établissements de ce continent aux impacts du changement climatique, avec des exemples pratiques.

4.3.3 Vulnérabilité sectorielle aux impacts du changement climatique

Forêt

- Les forêts dépendent fortement du climat pour leur fonction (exemple : la croissance) et leur structure (exemple : la composition des espèces). La distribution des forêts est généralement limitée par la disponibilité de l'eau ou la température.
- En ce qui concerne les organismes et les espèces, les changements de température, de précipitations, de vent et d'humidité sont susceptibles d'affecter de nombreux processus, notamment la croissance, la reproduction, la pollinisation, la dispersion des semences, la phénologie, la résistance aux ravageurs et aux maladies et la capacité compétitive.
- Les effets du changement climatique sur les espèces sont susceptibles de modifier l'équilibre et la composition des écosystèmes de manière imprévisible. Par exemple, le changement climatique peut à la fois perturber et améliorer les défenses des plantes contre les ravageurs et les pathogènes.
- Les interactions entre les parasites, les agents pathogènes et le feu peuvent provoquer soit des boucles de rétroaction négative, soit des boucles de rétroaction positive déstabilisantes. Les incendies peuvent entraîner des flambées de ravageurs et d'agents pathogènes, ce qui peut accroître la probabilité et la gravité des incendies. Parfois, les incendies peuvent réduire les infestations de ravageurs et la suppression des incendies peut augmenter le risque d'épidémies.
- La fragmentation et la perturbation de l'habitat créent également des possibilités pour les espèces envahissantes et réduisent la probabilité que les espèces indigènes migrent dans des zones contiguës.
- La santé et la vitalité des forêts sont menacées par des facteurs de stress tels que l'exploitation forestière incontrôlée, la chasse et la collecte de PFNL, le feu, la sécheresse, les espèces envahissantes, les ravageurs et les maladies. Ces facteurs sont susceptibles de s'intensifier à l'avenir en raison du changement climatique.

Agriculture et sécurité alimentaire

- L'agriculture est l'un des secteurs les plus sensibles au climat. Le changement climatique affecte les quatre dimensions de la sécurité alimentaire : la disponibilité alimentaire, l'accessibilité alimentaire, l'utilisation alimentaire et la stabilité des systèmes alimentaires.
- Le changement climatique affecte la santé et la productivité des cultures, du bétail, des poissons et des forêts ainsi que les moyens de subsistance des populations rurales qui en dépendent. Cela conduit à la faim et à la malnutrition dans ces régions.
- Une baisse du niveau des eaux, la sécheresse, la désertification et l'intrusion d'eau salée entraînent une aggravation de la faim et de la pauvreté. L'insécurité hydrique et alimentaire est exacerbée.
- Si certaines régions des latitudes moyennes et élevées bénéficieront initialement d'une production agricole plus élevée, pour beaucoup d'autres situées à des latitudes plus basses, en particulier dans les régions tropicales et saisonnières sèches, l'augmentation des températures et la fréquence des sécheresses et des inondations auront probablement des effets négatifs sur la production agricole, ce qui pourrait accroître le nombre de personnes menacées par la faim et les niveaux accrus de déplacement et de migration.

Eau et ressources côtières

- Le changement climatique affecte les ressources en eau par ses effets sur la quantité, la variabilité, le cycle, la forme et l'intensité des précipitations.
- Augmentation des taux d'évaporation, augmentation de la proportion des précipitations reçues sous forme de pluie, augmentation de la température de l'eau et diminution de la qualité de l'eau dans les zones intérieures et côtières. Celles-ci tendent à réduire l'approvisionnement en eau des secteurs agricole et urbain.
- Les zones touchées par la sécheresse seront probablement plus étendues. Il est très probable que la fréquence des précipitations plus importantes augmente, ce qui entraînera une augmentation des risques d'inondation.
- D'ici le milieu du siècle, la disponibilité en eau diminuera probablement aux latitudes moyennes, dans les tropiques secs et dans d'autres régions alimentées par les eaux de fonte des chaînes de montagnes. Plus d'un sixième de la population mondiale dépend actuellement de l'eau de fonte des chaînes de montagnes.
- Les impacts du changement climatique sur les ressources en eau et les ressources côtières affectent les écosystèmes et les communautés, allant des impacts économiques et sociaux à la santé et à l'insécurité alimentaire, ce qui menace la survie de nombreuses régions du monde.



Questions textuelles (10 minutes)

Comment les éléments suivants sont-ils vulnérables aux impacts du changement climatique :

- 1) les forêts ;
- 2) l'agriculture et la sécurité alimentaire ; et,
- 3) les ressources en eau et les ressources côtières ?

Santé

- Le changement climatique est susceptible de modifier l'état de santé de millions de personnes, notamment par une augmentation du nombre de décès, de maladies et de traumatismes dus aux vagues de chaleur, à l'élévation du niveau de la mer, aux inondations, aux tempêtes, aux ouragans intenses, à la dégradation de la qualité de l'air, aux incendies et aux sécheresses.

- Les changements dans les précipitations entraînent des changements dans la disponibilité et la qualité de l'eau, ainsi que des phénomènes météorologiques extrêmes tels que des ouragans et des inondations intenses.
- Le changement climatique peut être un facteur de migration des maladies, et aggraver les effets sur la santé résultant du rejet de polluants atmosphériques toxiques dans les populations vulnérables comme les enfants, les personnes âgées et les personnes souffrant d'asthme ou de maladies cardiovasculaires.
- L'augmentation de la malnutrition, des maladies diarrhéiques et du paludisme dans certaines régions augmentera la vulnérabilité de la santé publique et les objectifs de développement seront menacés par les dommages à long terme causés aux systèmes de santé par les catastrophes.
- Des vagues de froid extrêmes et sans précédent et un environnement humide prolongé entraînent des problèmes de santé tels que l'hypothermie, la bronchite et la pneumonie, surtout chez les personnes âgées et les jeunes enfants.

Transport

- Des températures plus élevées peuvent entraîner un ramollissement et une dilatation de la chaussée. Cela peut créer des ornières et des nids de poule, en particulier dans les zones à forte circulation et peut exercer une contrainte sur les joints des ponts. Les inondations massives, les ouragans, les cyclones, les typhons et les ondes de tempête entraînent la destruction des maisons, des infrastructures (ponts, routes, lignes électriques, barrages, bassins de décantation des mines, etc.).
- Les vagues de chaleur peuvent limiter les activités de construction, en particulier dans les régions où l'humidité est élevée. Avec ces changements, il pourrait devenir plus coûteux de construire et d'entretenir les routes. Les fortes pluies peuvent provoquer à nouveau des inondations, ce qui pourrait perturber la circulation, retarder les activités de construction et affaiblir ou emporter le sol et les ponceaux qui soutiennent les routes, les tunnels et les ponts.
- L'exposition aux inondations et aux chutes de neige extrêmes réduit également l'espérance de vie des routes et des autoroutes. Le stress de l'eau et de la neige peut causer des dommages, nécessitant des réparations et des reconstructions plus fréquentes. L'infrastructure routière dans les zones côtières est particulièrement sensible aux inondations plus fréquentes et permanentes dues à l'élévation du niveau de la mer et aux ondes de tempête.



Activité 3 : (Discussion de groupe) (20 minutes)

Discutez de la façon dont les divers secteurs sont vulnérables aux impacts du changement climatique dans un pays africain de votre choix et classez les secteurs selon leur vulnérabilité au changement climatique.



Questions de l'exercice (30 minutes)

Figure 70. Vulnérabilité sectorielle au changement climatique

Étudiez attentivement la figure ci-dessus et réalisez les activités suivantes :

- 1) décrire la scène sur la photo ;
- 2) expliquer la relation entre le changement climatique et la scène ;
- 3) identifier le secteur vulnérable à cet effet du changement climatique ; et
- 4) décrire les causes possibles de ce qui se passe dans la scène.



Résumé

Au cours de cette séance, nous avons pris connaissance de certains termes clés utilisés dans la vulnérabilité de divers systèmes biophysiques aux impacts du changement climatique. Dans la prochaine session, nous apprendrons comment le changement climatique conduit à des catastrophes et les stratégies pour réduire ces risques.

4.4 Changement climatique et réduction des risques de catastrophe

«Nous ne pouvons pas arrêter les catastrophes naturelles, mais nous pouvons nous armer de connaissances : tant de vies n'auraient pas à être perdues si la préparation aux catastrophes était suffisante»

4.4.1 Introduction

Cette séance de formation présente aux participants la façon de réduire les risques de catastrophes associés aux impacts du changement climatique. Elle nous éclaire en outre sur les différents facteurs météorologiques qui contribuent à de telles catastrophes. Elle nous renseigne sur les principales stratégies qui peuvent être adaptées pour aider à réduire les risques de catastrophes causées par le changement climatique.



Objectifs

À la fin de cette session, l'apprenant sera en mesure de

- a) définir la réduction des risques de catastrophes ;
- b) déterminer les facteurs météorologiques qui contribuent aux catastrophes et la façon dont elles se produisent ;
- c) définir des stratégies de réduction des risques de catastrophes liées au changement climatique.



Activité 1 : Remue-méninges (20 minutes)

Avec des exemples pratiques, partagez vos points de vue sur la relation entre le changement climatique et la réduction des risques de catastrophe.

4.4.2 Définitions et terminologies en matière de changement climatique et de réduction des risques de catastrophes

La réduction des risques de catastrophes désigne les mesures prises pour réduire les risques de catastrophes et les effets néfastes des aléas naturels, par des efforts systématiques d'analyse et de gestion des causes des catastrophes, notamment en évitant les aléas, en réduisant la vulnérabilité sociale et économique aux aléas et en améliorant la préparation aux événements indésirables.



Questions textuelles (10 minutes)

- 1) Définir le concept de réduction des risques de catastrophes.
- 2) Identifier cinq exemples de catastrophes causées par les effets du changement climatique.

4.4.3 Les facteurs météorologiques qui contribuent aux catastrophes

Les catastrophes sont principalement causées par certaines conditions météorologiques, telles que la température, la couverture nuageuse, le vent, l'humidité et la pression atmosphérique.

4.4.4 Stratégies de réduction des risques de catastrophes liées au changement climatique

- Veiller à ce que la réduction des risques de catastrophes soit une priorité nationale et locale, avec une base institutionnelle solide pour sa mise en œuvre.
- Identifier, évaluer et surveiller les risques de catastrophes et améliorer l'alerte rapide.
- Utiliser les connaissances, l'innovation et l'éducation pour bâtir une culture de la sécurité et de la résilience à tous les niveaux.
- Réduire les facteurs de risque sous-jacents.
- Renforcer la préparation aux catastrophes pour une réponse efficace à tous les niveaux.



Activité 2 : (Discussion de groupe) (20 minutes)

Discutez de l'impact de la croissance démographique et de l'urbanisation sur le changement climatique et de l'effet correspondant sur la foresterie dans un pays de votre choix en Afrique.



Questions de l'exercice (30 minutes)



Figure 71. Changement climatique et réduction des risques de catastrophes.

Source : Heidorn (2000)

Étudiez attentivement la figure ci-dessus et réalisez les activités suivantes :

- 1) décrire la scène sur la photo ;
- 2) identifier les divers facteurs qui pourraient avoir contribué à ce qui se passe dans la photographie ; et
- 3) exposer certaines stratégies qui peuvent être employées pour réduire ces risques de catastrophes.



Résumé

Dans cette session, nous avons appris comment le changement climatique conduit à des catastrophes et les stratégies pour réduire ces risques. Le chapitre sur la vulnérabilité et les impacts du changement climatique se termine. Dans le prochain chapitre, nous apprendrons à produire des données de base sur le changement climatique.

Références

- Das, H.P. 2004. Adaptation strategies required to reduce vulnerability in agriculture and forestry to climate change, climate variability and climate extremes. In World Meteorological Organization (WMO). Management Strategies in Agriculture and Forestry for Mitigation of Greenhouse Gas Emissions and Adaptation to Climate Variability and Climate Change, pp. 41-92. Report of CAGM Working Group. Technical Note No. 202, WMO No. 969, Geneva, WMO.
- FAO Forestry Paper, 2011. Wildlife in a changing climate. Rome, Italy, 108 pp. Available online: <http://www.fao.org/docrep/015/i2498e/i2498e.pdf>
- FAO, 2010. Global Forest Resources Assessment. Available online: www.fao.org/forestry/fra/en/
- UNEP, 2012. Global Environment Outlook (GEO-5) Available online: http://www.unep.org/geo/pdfs/GEO5_SPM_English.pdf
- Heidorn K. C. 2000. The Weather Doctor's Weather Almanac: The Great Fires of October 1871. Weather Doctor articles. Available online: <http://www.islandnet.com/~see/weather/almanac/arc2000/alm00oct.htm>
- International Federation, 2004. The Hyogo Framework for Action and The International Federation. World Disasters Report. 2pp. Available online: <http://www.ifrc.org/Global/hyogo-framework-federation-en.pdf>
- IPCC. 2018. Annex I: Glossary [R. Matthews (ed.)]. In: Global warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H. O. Pörtner,
- D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J. B. R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M. I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, T. Waterfield (eds.)]. In Press.
- IPCC, 2014: climate change 2014: synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the 5th Assessment Report of IPCC. Geneva, Switzerland, 151 p
- IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the 5th Assessment Report of IPCC. 1535 p.
- IPCC, 2012. Managing the risk of extreme events and disasters to advance climate change adaptation. A special report of working group 1 and 2 of IPCC. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, USA, 582pp. Available online: https://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srex/SREX_Full_Report.pdf
- IPCC WG2, 2012. Human Settlements in a Changing Climate: Impacts and Adaptation. Cp401-426. Available online: https://www.ipcc-wg2.gov/publications/SAR/SAR_Chapter%2012.pdf
- IPCC, 2007. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of IPCC. Parry, M.L. et al. (Eds.). Cambridge University Press, Cambridge, UK, 976pp. Available online: https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg2/ar4_wg2_full_report.pdf
- ISDR, 2008. Climate Change and Disaster Risk Reduction. UNISDR Palais des Nations. CH-1211 Geneva 10, Switzerland. 12pp. Available online: http://www.unisdr.org/files/4146_ClimateChangeDRR.pdf
- Niang I, Ruppel OC, Abdrabo MA, Essel A, Lennard C, Padgham J, Urquhart P (2014) Africa. In: Climate change. 2014. impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fifth

Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge

Schuetze, C.F, 2013. Canada's Latest Climate Change. The New York Times. Available online: http://rendezvous.blogs.nytimes.com/2013/04/01/canadas-latest-climate-change/?_r=0

Tebtebba, 2010. Climate Change, REDD+ and Indigenous Peoples: Training Course for Indigenous Peoples.

Tebtebba Foundation, Baguio City, Philippines. ISBN: 978-971-93566-7-7. Available online: <http://www.tebtebba.org/phocadownload/publications-and-multimedia/books-training-modules-and-other-publications/training-manuals-and-resource-books/climate-change-redd-and-ips-training-course.pdf>

Trapped woman on a car roof during flash flooding in Toowoomba 2. Available online: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Trapped_woman_on_a_car_roof_during_flash_flooding_in_Toowoomba_2.jpg

UNFCCC, 2007. Climate change impact, vulnerability and adaptation in developing countries. A report by the UNFCCC. Available online: <https://unfccc.int/resource/docs/publications/impacts.pdf>

Van Arend, B.J., S. Herman & W. Marieke (eds), 2009. Forests and Climate Change: adaptation and mitigation. Tropenbos International, Wageningen, The Netherlands. xvi + 160 pp.

Voice of America (VOA), 2010. Illegal Logging Down by One Quarter Worldwide. VOA News. Available online: <http://www.voanews.com/content/illegal-logging-down-by-one-quarter-worldwide-99469029/122831.html>

Weather Processes and Systems (Chapter 11). Available online: <http://www.opengeography.org/ch-11-weather-processes-and-systems.html>

Chapitre 5 : Connaissances de base sur les organismes et leur milieu de vie

Vue d'ensemble

La connaissance des interactions entre les organismes et leur environnement est une condition préalable à la compréhension de la science du changement climatique. Ce chapitre rappelle aux étudiants/apprenants les principales composantes des systèmes vivants, terrestres et atmosphériques et leur évolution.

La stabilité des écosystèmes dépend de leur dynamique interne et de leurs interactions avec les facteurs externes. La stabilité et la gestion durable des forêts peuvent contribuer à atténuer les effets néfastes des changements climatiques. Ce chapitre traite également de la typologie des écosystèmes terrestres, des mécanismes de surveillance de ces écosystèmes et des concepts de gestion durable et de conservation des écosystèmes.



Objectifs

Fournir aux étudiants des connaissances de base sur les interactions entre les organismes et leur milieu de vie ainsi que quelques méthodes d'évaluation.

Fournir aux techniciens des connaissances de base sur les outils/approches et les méthodes de gestion durable des écosystèmes.



Résultats d'apprentissage

A la fin de ce chapitre, les apprenants seront capables de

- expliquer les interactions entre les organismes et leur environnement
- expliquer l'évolution des écosystèmes terrestres ;
- expliquer le fonctionnement des différents écosystèmes terrestres ;
- préparer des outils d'inventaire et de surveillance des écosystèmes ; et,
- développer des outils de gestion durable des écosystèmes.

5.0 Comprendre les bases des sciences de la terre et de la vie

5.0.1 Botanique



Objectif

A la fin de la session, l'apprenant sera en mesure de
1. décrire et reconnaître les plantes.

Introduction générale

Définition de la botanique : « science qui vise à étudier les plantes ». La plante est définie comme un « organisme vivant caractérisé par rapport aux autres (animaux) par une mobilité et une sensibilité plus faible, une composition chimique spécifique (chlorophylle, cellulose) et une nutrition à base d'éléments uniques » (dictionnaire Petit Robert). Le terme botanique vient du mot grec botanê, qui signifie « plante », dérivé du verbe boskein signifiant « aliment ». Cette étymologie montre clairement le rôle clé des plantes dans les chaînes alimentaires en raison de leur métabolisme autotrophe et basé sur la lumière.

Caractéristiques de vie : Les organismes vivants ont un mode de fonctionnement spécifique composé de plusieurs activités. Le premier, appelé métabolisme, consiste à prélever dans leur environnement les substances nécessaires à leur fonctionnement et à produire des déchets. Le deuxième mode est appelé reproduction qui permet aux organismes vivants de se multiplier. Les organismes vivants peuvent également se déplacer, de manière visible ou non à l'œil nu, sont en contact avec l'environnement (communication) et restent dans une forme relativement constante malgré les changements qui se produisent dans leur environnement (Larousse.edu.fr).

A partir des points ci-dessus, on peut observer sept caractéristiques des organismes vivants : mouvement, nutrition, excrétion, respiration, croissance, sensibilité et reproduction⁸.



Figure 72. Plan d'une feuille en spirale.

Source : Caractéristiques de la vie

Caractéristiques de la plante : Les plantes sont caractérisées par la cellule, le tissu, la photosynthèse, la propagation végétative, la totipotence cellulaire et leur capacité à se reproduire⁹.

Cellule végétale : La cellule végétale est caractérisée par les plastides et les pigments absorbants (chlorophylles, caroténoïdes et phycobilines), la paroi et la vacuole¹⁰.

Tissu : les cellules se différencient, se spécialisent et forment divers tissus. La combinaison des tissus donne des organes tels que les racines, les tiges, les feuilles et les fleurs¹¹ qui ont diverses fonctions.

La photosynthèse : Les plantes sont autotrophes. Elles synthétisent leur matière organique à partir de substances minérales qu'elles puisent dans le sol (eau et sels minéraux) et dans l'air (carbone sous forme de CO₂). L'énergie nécessaire à la synthèse, générée par le soleil, est captée par des pigments absorbants (chlorophylles) lors de la photosynthèse. L'équation chimique de la réaction de photosynthèse peut être résumée comme suit¹² :

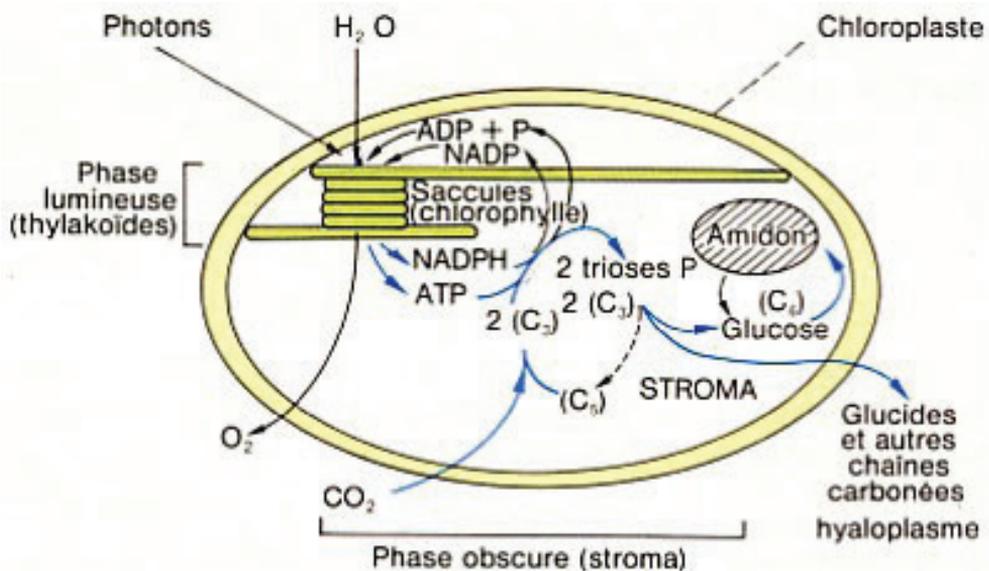


Figure 73. Processus de photosynthèse.

Source : Caractéristiques de la plante : Autotrophie et photosynthèse <http://www.creaweb.fr/perso/bv/autotro.html>

Les plantes sont soit photosynthétiques, soit photoautotrophiques. L'autotrophie est essentielle puisqu'elle est la condition préalable à l'existence des plantes¹³.

Multiplication végétative et totipotentialité : La totipotence cellulaire des plantes est la capacité de toute cellule végétale potentielle à se différencier afin de se redifférencier et de générer un nouvel organisme.

La reproduction peut être soit sexuelle, soit asexuée.

9 Caractéristiques de la plante : Multiplication végétative et Totipotentialité : <http://www.creaweb.fr/perso/bv/tissus.html>

10 Caractéristiques de la plante : Cellule végétale : <http://www.creaweb.fr/perso/bv/tissus.html>

11 Caractéristiques de la plante : Tissus : <http://www.creaweb.fr/perso/bv/tissus.html>

12 Caractéristiques de la plante : Autotrophie et photosynthèse : <http://www.creaweb.fr/perso/bv/tissus.html>

13 Caractéristiques de la plante : Autotrophie et photosynthèse : <http://www.creaweb.fr/perso/bv/tissus.html>

Principaux groupes de plantes : procaryotes et eucaryotes

Les premiers organismes vivants, apparus sur terre il y a environ 3,5 milliards d'années, étaient des bactéries dépourvues de noyau cellulaire : ce sont les procaryotes. De ces procaryotes, des organismes plus complexes sont apparus : les eucaryotes. Leur caractéristique essentielle est un noyau cellulaire, qui contient l'ADN portant l'information génétique. Tous les animaux et les plantes sont des eucaryotes. Les principales différences entre les eucaryotes et les procaryotes sont résumés dans le tableau 7 :

Tableau 7. Principaux groupes de plantes4

Procaryotes	Eucaryotes
Pas de noyau	Existence d'un noyau
Division cellulaire par scissiparité	Division cellulaire par mitose et méiose
Pas d'organites sous-cellulaires	Nombreux organites (mitochondries, réticules, dictyosomes et plastides des plantes)
Paroi de glycoprotéine	Paroi pectocellulosique dans les plantes
Pas de cytosquelette	Cytosquelette (actine, microtubules)

Source : Systématique des plantes supérieures ; Classification ; définition des espèces <http://ecologieenvironnement.blogspot.com/2015/01/systematique-des-plantes-superieures.html>

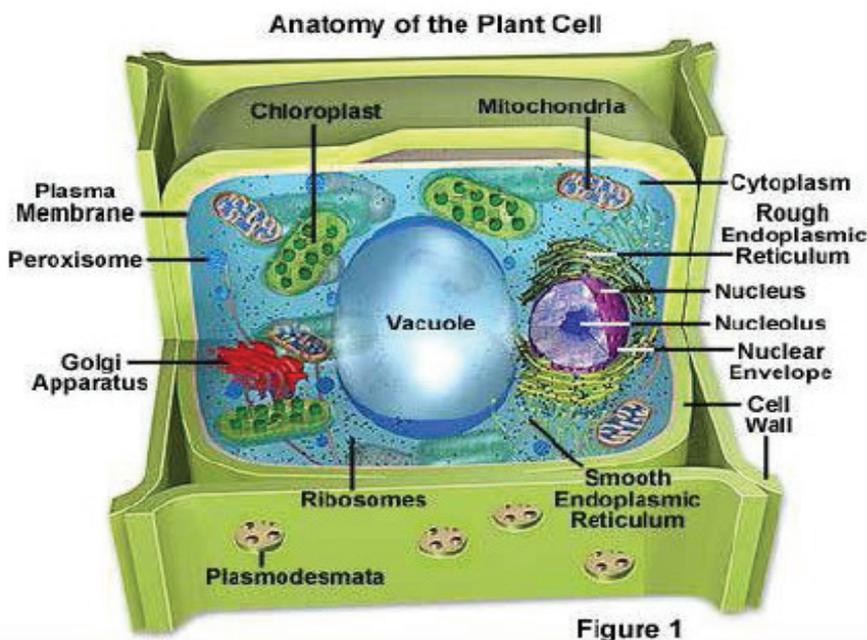


Figure 74. Contenu en cellules de plantes eucaryotes.

Source : Herborologie : http://www.doc-developpement-durable.org/file/Agriculture-Lutte Biologique/ebook_cours_de_botanique_I_appareil_vegetatif_des_vegetaux_superieurs_jean_marie_savoie.pdf

Morphologie de la plante

Morphologie végétale : partie de la botanique qui décrit la forme et la structure externe des plantes et de leurs organes (figure 75). La diversité morphologique est le résultat de l'expression de génotypes influencés par l'environnement. La principale différence entre les espèces végétales réside dans leur morphologie. La morphologie est déterminée par de nombreux facteurs parmi lesquels se trouvent les facteurs génétiques.

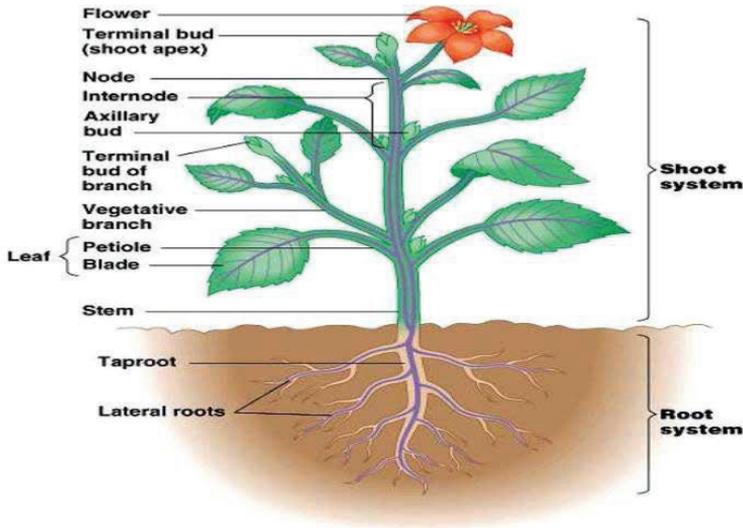


Figure 75. Morphologie de la plante.

Source : <http://image.slidesharecdn.com/plantmorphology-110809031433-phpapp01/95/plant-morphology-2-728.jpg?cb=131285988>

Systématique des plantes supérieures

La systématique des plantes supérieures se réfère à l'étude de la diversité biologique. L'objectif de son étude est la reconstitution de la phylogénie végétale (étude des relations de parenté entre les organismes vivants). La systématique met en évidence l'évolution des relations entre divers organismes. Elle comprend la taxonomie qui est la science de la description des organismes vivants et de leur regroupement en entités appelées taxons afin de les identifier, de les nommer et de les classer. La Systématique organise la classification des taxons et leurs relations¹⁴.

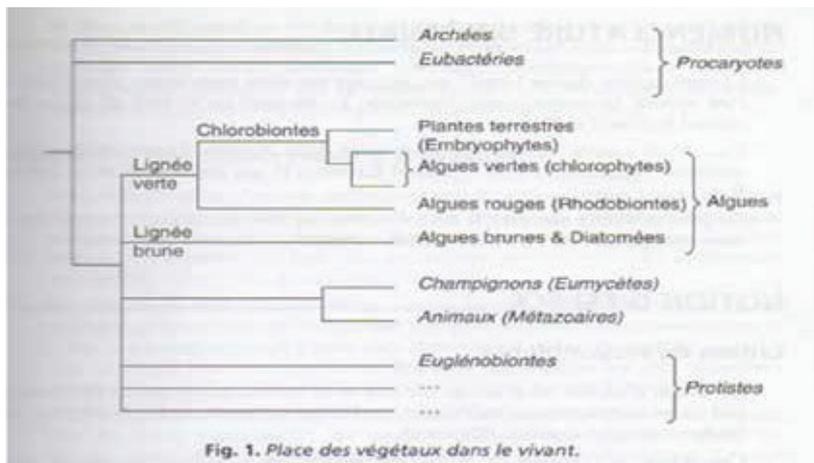


Figure 76. Systématique des plantes supérieures, définition et classification des espèces.

Source : <http://ecologieenvironnement.blogspot.com/2015/01/systematique-des-plantes-superieures.html>

14 Systématique des plantes supérieures : classification, définition des espèces <http://ecologieenvironnement.blogspot.com/2015/01/systematique-des-plantes-superieures.html>

Les organismes procaryotes (Archaea et Eubacteria) sont à l'origine de deux lignées :

- une lignée verte caractérisée par la présence de chloroplastes qui comprend des algues rouges ou des Rhodobiontes dont la chlorophylle est masquée par la phycoérythrine et les Chlorobiontes (chlo. a et b) y compris les algues vertes et les plantes terrestres ; et
- une lignée brune d'Ochrophytes (fucoxanthine) avec des algues brunes ou des Diatomées.

Certains Ochrophytes ont perdu secondairement leurs pigments photosynthétiques et se comportent comme des champignons (un groupe frère de Choanoflagellés et d'Éponges) et sont donc plus proches des animaux que des plantes. Euglenobiontes = Protistes (paramécie ou amibe).

Branche, Classe, Ordre, Famille, Genre, Espèce

Chacun des grands groupes correspond à des lignées évolutives différentes.

- Chacun d'eux est un clade du grec Klados = branche constituée par l'ancêtre commun et ses descendants.
- Certains sont monophylétiques (à partir d'une lignée), par exemple les Chlorobiontes d'ancêtre commun inconnu.
- Certains sont polyphylétiques, par exemple Algues, pas d'ancêtre commun direct mais +++.
- Certaines sont paraphylétiques, par exemple : les algues vertes, car elles ne comprennent qu'une partie de leur descendance.

Classification des organismes vivants en catégories hiérarchiques

Les divisions de haut niveau sont appelées branches ou phylum, et sont subdivisées en S-branches, classes, S-classes, Ordres, Familles. Toutes ces divisions sont appelées des taxons. Les lettres de fin sont utilisées pour déterminer les niveaux de classification, par exemple : ales pour les ordres, aceae pour les familles. L'espèce est l'unité systématique de base dans la nomenclature botanique.

Méthodes de systématique phylogénétique

Les méthodes comprennent : la morphologie comparative, l'anatomie comparative, la palynologie, la phytopaléontologie, la phytogéographie, la biochimie comparative, la chimio-taxonomie, le séquençage des acides nucléiques, la taxonomie numérique et informatique, la cladistique et l'arbre phylogénétique. La classification phylogénétique ou cladistique est basée sur les caractères morphologiques, anatomiques, cytologiques et moléculaires (ARN, ADN, protéines).

Encadré 14. Directives de classification

La ligne directrice de classification comprend :

- La constitution de clades comprenant l'ancêtre commun et ses descendants ;
- la formation d'arbres dont les branches sont séparées par des innovations progressives ;
- la comparaison d'acides aminés et d'ARN pour former des clades ou des taxons monophylétiques (ayant le même ancêtre commun) ; et
- la démonstration de groupes polyphylétiques (dérivés de 2 ou plusieurs ancêtres).

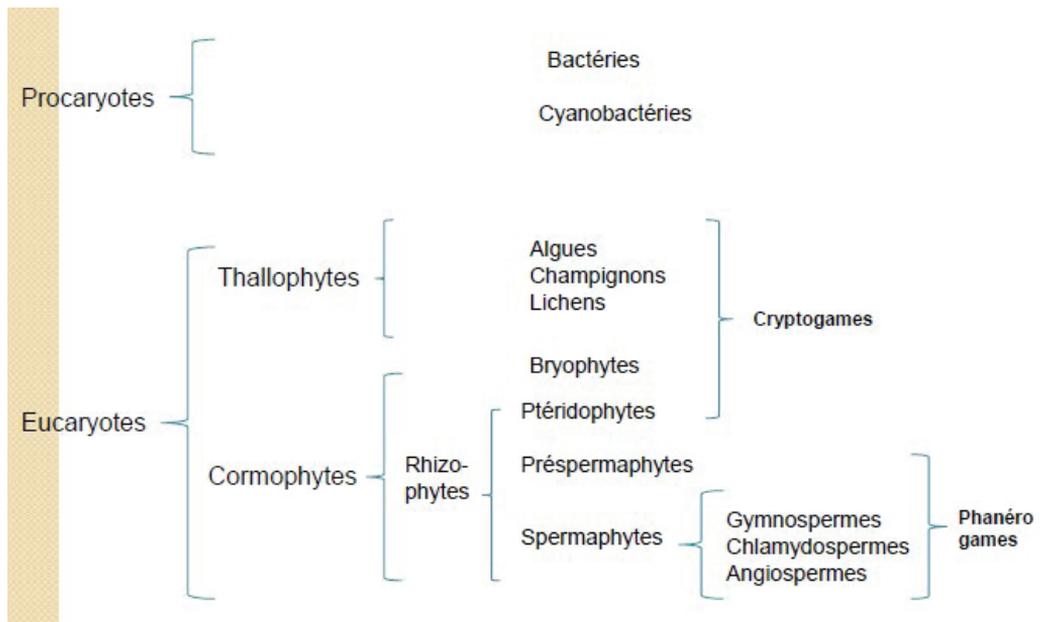


Figure 77. Représentation classique du règne végétal (bases morphologiques et anatomiques, puis bases cytologiques et biologiques).

Source: Office de l'environnement de la Corse (2012)

Modes de reproduction

La reproduction sexuée implique deux processus fondamentaux : la méiose et la fécondation. Lors de la fécondation, l'union de deux gamètes haploïdes donne naissance à un zygote diploïde ($n + n = 2n$) dont le patrimoine génétique est le résultat de la recombinaison aléatoire des deux génomes parentaux issus des gamètes¹⁵.

Inversement, pendant le processus de méiose, le stock de chromosomes diploïdes est divisé en deux parties numériquement égales ($2n \rightarrow n$), mais qualitativement différentes. Les individus issus de la reproduction sexuée sont le résultat d'un double brassage génétique.

Ce sont des individus originaux, génétiquement uniques ; certains seront mieux adaptés à un nouvel environnement que d'autres. La reproduction sexuée est donc le véritable moteur de l'évolution des organismes vivants et permet la création de nouvelles espèces¹⁶.

15 Caractéristiques de la plante, la cellule végétale : <http://www.creaweb.fr/perso/bv/cellule.htm>

16 Caractéristiques de la plante, la cellule végétale : <http://www.creaweb.fr/perso/bv/cellule.html>

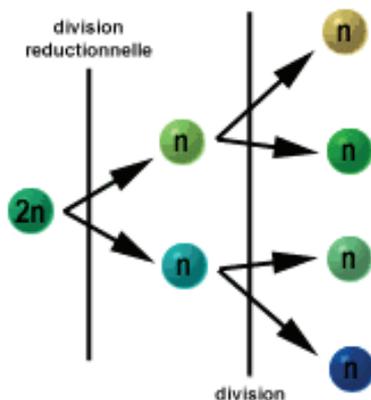


Figure 78. La fécondation.

Source : <http://www.creaweb.fr/perso/bv/cellule.html>

Encadré 15. Étape du cycle de reproduction sexuée

Les étapes de la reproduction sexuée sont :

- la pollinisation (transport du pollen de l'anthere de l'étamine au stigmate du pistil) ;
- la fécondation (union d'une cellule mâle et d'une cellule femelle) ;
- la fructification (formation d'un fruit portant des graines) ; et
- la germination (développement de l'embryon dans la graine et émergence des racines et de la tige)

.Dans la reproduction asexuée, un individu provient du développement d'une partie végétative d'une plante parenté (tige, racine, feuille). Ces fragments redonnent des individus identiques à la plante mère. La multiplication végétative ne concerne qu'un seul génome qui est identique dans tous les individus dérivés, et on assiste à la formation d'un clone.

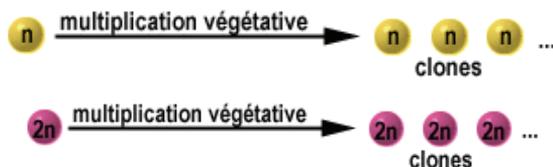


Figure 79. Formation de clones.

Source : <http://www.creaweb.fr/perso/bv/cellule.html>

Types de reproduction asexuée : la division cellulaire (division de la cellule en deux), le bourgeonnement (développement d'un nouvel individu à partir d'une excroissance du corps d'un parent), le marcottage (techniques d'augmentation de la densité de certains arbustes, les branches basses près du sol reproduisent les racines et forment ainsi de nouveaux arbustes), le bouturage (fragments d'organismes produits naturellement ou artificiellement capables de produire un nouvel individu complet).



Activités éducatives (exercices et études de cas)

A partir de l'information de base présentée dans le cours et d'autres renseignements tirés de la documentation, faites un résumé fondé sur les questions suivantes :

- Quels sont les principaux groupes de plantes et leurs caractéristiques ?
- Quelle est la diversité morphologique des plantes ? Expliquez et résumez ?
- Que savez-vous de la systématique des plantes supérieures ? Analysez et résumez les différentes lignées évolutives.
- Quelles sont les méthodes de la systématique phylogénétique ?
- Quels sont les modes de reproduction des plantes ?

5.1 Zoologie



Objectif

A la fin de la session, l'apprenant sera en mesure de

1. Déterminer la diversité des animaux et leur mode de reproduction.

Introduction générale

La zoologie est la branche des sciences naturelles qui se consacre à l'étude et à la classification des animaux. Son objectif fondamental est de dresser un inventaire des formes animales pour une classification et une analyse méthodique de leur structure, de leur développement et de leurs relations entre eux-mêmes et avec le milieu environnant.

Les animaux sont très divers. Leur taille peut varier de 0,1 mm à quelques dizaines de mètres. Leur durée de vie varie de quelques jours à un siècle. On les trouve dans tous les habitats, de la boue aux sommets des plus hautes montagnes. Malgré ces différences, ils ont plusieurs points communs : ils viennent probablement du même ancêtre, ont fondamentalement les mêmes besoins et font face aux mêmes contraintes environnementales. Il y a actuellement 1 500 000 espèces animales connues, mais on estime qu'il pourrait y en avoir 5 à 30 fois plus à cause de celles qui ne sont pas enregistrées. Trois principaux habitats les accueillent : le milieu marin, l'eau douce et le milieu terrestre. Les contraintes liées à leur survie sont liées à ces différents environnements.

Principaux groupes d'animaux

La systématique est la branche de la biologie qui s'occupe de la classification et du nom scientifique des organismes. Elle est basée sur le regroupement d'espèces partageant certaines similitudes anatomiques et provenant de la même lignée évolutive. La classification des animaux par branche sur la base des caractéristiques générales est la suivante.

Les Arthropodes (insectes, araignées, crabes)

Les arthropodes, du grec arthron «articulation» et podos «pied», sont une branche des animaux invertébrés dont la ligne d'organisation est caractérisée par un corps segmenté formé de métamères hétéronomiques munis chacun d'une paire d'appendices «articulés» et recouverts d'une cuticule ou d'une carapace rigide, qui constitue leur exosquelette, constitué dans la plupart des cas de chitine. La mue permet, en changeant périodiquement leur exosquelette, de croître en taille (mue de croissance) ou d'acquérir de nouveaux organes ou de changer de forme (mue de métamorphose). Ils sont apparus il y a 540 millions d'années.

La branche des arthropodes est de loin celle qui compte le plus d'espèces et le plus d'individus dans tout le règne animal (80 % des espèces connues). Il existe plus d'un million et demi d'espèces vivantes d'arthropodes présentant les modes de vie les plus variés (guildes écologiques), probablement grâce à leur stigmatisation. Les arthropodes sont un groupe cosmopolite qui s'est adapté aux milieux naturels (déserts, forêts, abîmes, montagnes, etc.) ou anthropogéniques (habitat, puits de pétrole, etc.) et sont parmi les premiers animaux à avoir colonisé la terre. Les microarthropodes sont les plus petits d'entre eux.

Bien que discrets, ceux d'entre eux qui décomposent jouent un rôle essentiel dans les réseaux trophiques en favorisant le recyclage de la nécromasse, en particulier dans les sols où, avec les champignons, ils contribuent à la production d'humus¹⁷.



17 <https://fr.wikipedia.org/wiki/Arthropode>



Figure 80. Arthropodes de différentes classes : un trilobite, un eurypteride, un scorpion, un crustacé, un myriapode et un insecte.

Source : <https://fr.wikipedia.org/wiki/Arthropode>

Les Mollusques (escargots, moules, poulpes)

Les mollusques (Mollusca) sont une branche des animaux lophozoaires. Ils sont non segmentés, avec une symétrie bilatérale parfois altérée. Le corps est généralement constitué d'une tête, d'une masse viscérale et d'un pied. La masse viscérale est recouverte en tout ou en partie par un manteau qui sécrète une enveloppe calcaire. Le système nerveux comprend un double collier périosophagien. La cavité générale est plus ou moins réduite au péricarde et aux néphridies. La branche des mollusques (Mollusca) tire son nom du latin mollis, « doux ». La science consacrée à l'étude des mollusques est la malacologie, du grec malakos, équivalent de « doux ».

Dans la classification phylogénétique, les mollusques sont des métazoaires coelomatiques, triploblastiques (les termes « coelomate », « acœlomate » et « pseudo-coelomate » ont été récemment retirés de la classification), bilatériens protostomiens ; les principales synapomorphies de ce clade étant la présence d'une radula et d'un manteau. La branche des mollusques contient plus de 130 000 espèces, dont certaines sont souvent consommées par l'homme. Certains mollusques sécrètent des perles en recouvrant de nacre les éléments irritants qui s'introduisent dans leur coquille. Les mollusques ou leurs coquilles (et leurs perles dans certains cas) sont utilisés à différentes fins, y compris comme aliments pour la consommation humaine depuis la préhistoire.



Figure 81. Exemples de différentes classes de mollusques.

Source <https://fr.wikipedia.org/wiki/Mollusca>

Les nématodes (Ascaris)

Les vers ronds sont une branche des vers non segmentés. Classés comme ecdysozoaires, ils sont recouverts d'une épaisse cuticule. Ils vivent un type de " vie ouverte " (dans les sols, l'eau, les sédiments, le bois mort et d'autres formes de nécromasse où ils sont des détritivores ou des microprédateurs). De nombreuses espèces ont une vie parasitaire, au sein d'organismes fongiques, de plantes ou d'animaux. Dans ce dernier cas, il s'agit le plus souvent de parasites gastro-intestinaux, mais certaines espèces colonisent différents types de tissus, dont les muscles). Parmi les formes parasitaires, il y a des vers dont le cycle ne nécessite pas d'hôte intermédiaire (développement monoxène), et d'autres nécessitant deux hôtes (dixène), en particulier chez les filaires¹⁸.



Figure 82. Ascaris (Ascaris lombricoïdes)- Chordés (Mammifères, oiseaux, poissons, reptiles)

Les chordés sont une branche des animaux deutérostomiens. Il y a trois sous-branches : Cephalochordata, Tunicata et Craniata contenant des Myxines et des Vertébrés. Ces deux derniers groupes sont parfois classés sous le taxon Olfactore

18 <https://www.google.com/#q=Nematoda>



Figure 83. Des chordés de différentes classes.

Source : <https://www.google.com/#q=Nematoda>

Les plathelminthes (Vers solitaires)

Les plathelminthes sont des vers plats contenant de nombreuses espèces qui sont des parasites. Cette branche est principalement constituée de vers qui sont des animaux allongés sans appendice. Les vers les plus connus de la classe des Turbellaria (vers plats qui ne sont pas exclusivement parasites) sont des vers plats, libres, nageurs ou rampants, dont l'épaisseur du corps peut être inférieure à un millimètre. Ils sont bilatéralement symétriques et appartiennent à la première catégorie d'acoelomates (ils ne possèdent pas de cavité générale : ni coelom ni pseudocoelom), il semble que l'absence de coelom soit due à une régression de celui-ci. La seule trace qui reste visible est leur mésenchyme. Le tube digestif a une ouverture (bouche). Ils ont aussi des organes génitaux complexes et peuvent se reproduire de façon sexuée (les planaires sont hermaphrodites, la fécondation croisée est le mode de reproduction) ou par scissiparité. Leur corps est extrêmement fragile ; ils sont capables de régénérer leurs parties amputées, y compris la tête, qui contient un réseau organisé de neurones. Ce sont des organismes complexes, capables de mémoriser. Les éléments de leur mémoire restent inchangés après décapitation et régénération de la tête¹⁹



Figure 84. Pseudobiceros bedfordi, un ver plat turbellarié.

Source : <https://fr.wikipedia.org/wiki/Platyhelminthes>

Les annélides (Vers de terre, sangsues)

- Les annélides sont des animaux protostomiens vermiformes et métamérisés, autrement dit des « vers ». Ils vivent principalement dans l'eau (eau de mer comme la gravette ou eau douce comme la sangsue) bien que certaines espèces comme les vers de terre vivent dans le sol. Les trois principales classes sont :
- Les polychètes qui ont un développement post-embryonnaire indirect avec larves (trochophore) et métamorphose, et dont le corps est recouvert de nombreuses soies (par exemple les arénicoles) ;
- Les oligochètes, présentant des soies moins abondantes (par exemple, le ver de terre) ; et,
- ¶ Les achètes, dépourvus de poils (par exemple les sangsues).

Les oligochètes et les Achètes peuvent être regroupés dans la catégorie des Clitellates qui ont un développement post-embryonnaire direct. Certains annélides polychètes (syllidae) sont capables d'effectuer une reproduction asexuée en se séparant en deux et en régénérant les parties manquantes. De nombreux annélides Clitellates sont hermaphrodites (vers de terre, sangsues). Certains annélides dans la zone de balancement des marées ont une vie tubulaire : dans des tubes de calcaire (spirorbe, Pomatoceros) ou des membranes (spirographe, sabelle), parfois recouverts de grains de sable agglomérés (*Lanice conchilega*). D'autres comme la marina d'*Arenicola* dont l'hémoglobine pourrait être utilisée comme substitut du sang humain, creusent des tunnels dans le sable²⁰



Figure 85. Ver de terre (*Oligochaeta, Lumbricina*) (à gauche) et sangsue (*Haemopsis sanguisuga*), de l'Ordre des Arhynchobdellida (à droite).

Source : <https://fr.wikipedia.org/wiki/Annelida>

Les Cnidaires (méduses et polypes)

Les cnidaires, ou branche des Cnidaria, sont des animaux relativement simples, spécifiques au milieu aquatique (marin 99%, eau douce 1%). Le nom vient du grec ancien κνίδη (knidē, "ortie, urticant"), en référence aux cellules urticantes, caractéristiques de ces animaux (les cnidocytes ou cnidoblastes), le nom vernaculaire d'"orties de mer" étant donné par Aristote qui regroupe les Acalephes (méduses) et les Coralliaires. Le terme coelentérés (Coelenterata ou Coelentera) désignait autrefois ce groupe mais inclue également la branche voisine des cténophores. Les cnidaires sont bien représentés dans les fossiles : on les trouve même dans le Cambrien et peut-être même dans la faune d'Ediacara. Les cnidaires existent sous deux formes : les formes fixes ou polypes (corail, anémone de mer) et les formes libres et mobiles (méduses). Il y a plus de 10 000 espèces connues²¹.

20 <https://fr.wikipedia.org/wiki/Annelida>

21 <https://fr.wikipedia.org/wiki/Cnidaria>



Figure 86. *Chrysaora quinquecirrha* (à gauche) et *Arachnanthus nocturnus* (cérianthe *Penicilaria*) (à droite).

Source : <https://fr.wikipedia.org/wiki/Cnidaria>

Les échinodermes (oursins, étoiles de mer)

Les échinodermes (Echinodermata) forment une branche des animaux marins benthiques présents à toutes les profondeurs océaniques, et dont les premières traces fossiles remontent au Cambrien. Ils comprennent actuellement cinq classes : étoiles de mer (Astérides), oursins (Echinides), concombres de mer (Holothuries), crinoïdes et ophiures (Figure 87). Plusieurs milliers d'espèces d'échinodermes éteintes ont été recensés par les paléontologues ; leur squelette calcifié a généralement permis une bonne fossilisation. Les représentants de ce groupe sont originaux et possèdent un certain nombre de caractéristiques uniques parmi les animaux. Les principales sont une symétrie générale pentaradiée (symétrie centrale d'ordre 5, bien qu'elles restent bilatérales), l'existence d'un squelette constitué de plaques de calcite percées de nombreux canaux (structure en stéréome) et la présence d'un système aquifère. Ils sont très proches du groupe des accords au sein des deutérostomiens²².



Figure 87. Différents échinodermes : crinoïdes, étoiles de mer, étoiles de mer, oursins, concombres de mer.

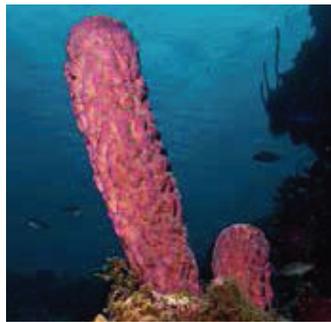
Source : <https://fr.wikipedia.org/wiki/Echinodermata>

²² <https://fr.wikipedia.org/wiki/Echinodermata>

Le Porifera (éponges)

Les éponges (Porifera) sont des animaux qui forment la branche basale des métazoaires. Ils sont définis comme des métazoaires sessiles. Les pores inhalants et exhalants sont reliés à une chambre contenant des choanocytes, qui sont des cellules flagellantes caractéristiques des éponges. Les choanocytes sont des cellules hétérotrophes. Le corps des éponges est une masse non vivante entre deux couches de cellules : le pinacoderme qui se trouve à l'extérieur et le choanoderme à l'intérieur. Leur système nerveux est très primitif et diffus.

Dans l'histoire de la biologie, ils ont été considérés comme une plante pendant longtemps. La distribution géographique des éponges est très large, car elles ont colonisé les eaux marines, douces et saumâtres, des faibles profondeurs à plus de 5 000 m de profondeur, sous tous les climats. Ils ont un rôle important dans la filtration de l'eau.



Les éponges sont exploitées par l'homme pour leur capacité à absorber les liquides. Le squelette des démosponges est utilisé comme un objet pour l'hygiène, en chirurgie, pour le tannage des cuirs et de la céramique. Il a été récemment démontré qu'ils contiennent une diversité exceptionnelle d'endosymbiotes microbiens ou microalgues²³.

Figure 88. *Aplysina archeri*.

Source : <https://www.google.com/#q=Porifera>

Reproduction et conservation de la faune sauvage et du pastoralisme

Reproduction naturelle de la faune

L'accouplement est la relation sexuelle entre un mâle et une femelle de la même espèce, permettant la reproduction sexuée. Le terme hermaphrodite désigne un être vivant qui possède à la fois un système reproductif mâle et un système reproductif femelle. L'étape caractéristique de la reproduction sexuée est la fécondation : la fusion d'un gamète mâle, ou spermatozoïde, et d'un gamète femelle, ou ovule, aboutissant à une cellule-œuf = zygote. L'union du noyau du spermatozoïde avec le noyau de l'ovule réunit au hasard des chromosomes d'origine paternelle et maternelle.

La multiplication et l'organisation des cellules issues de la cellule œuf (ou du zygote) est le développement embryonnaire ou embryogenèse. Dans les éponges, les cnidaires, les caryens et les mésozoaires, l'animal reste au stade de deux couches. Chez la plupart des animaux, l'étape suivante du développement embryonnaire est la formation d'une troisième couche, le mésoderme ou mésoblaste. Les animaux à trois couches sont appelés triploblastiques.

Les vivipares sont des animaux qui donnent naissance à des petits vivants. C'est le cas de la plupart des mammifères, de certains reptiles et de certains poissons cartilagineux. L'oviparité est le fait pour un animal de se reproduire en pondant des œufs ; les œufs éclosent et donnent de nouveaux individus. C'est le cas de nombreux vertébrés : les oiseaux, la plupart des reptiles et des poissons, et les amphibiens.

Reproduction assistée et conservation de la faune

Les techniques de reproduction assistée sont un formidable moyen d'améliorer génétiquement une population sauvage. Elles sont basées sur une bonne planification des couplages à distance ; la consanguinité est à éviter car elle est source de régression biologique. Il est essentiel d'encourager la reproduction pour soutenir la conservation des espèces menacées. Cette approche originale vise à apporter un soutien concret et précieux aux stratégies de conservation des espèces.

La perte de variabilité génétique est aujourd'hui l'un des principaux facteurs de déclin des espèces animales, surtout lorsque les populations diminuent et se fragmentent en raison de l'expansion des activités humaines. La consanguinité résultant de cet amincissement génétique induit de nombreux effets délétères : diminution de l'adaptation à l'environnement, augmentation de la sensibilité aux maladies infectieuses, diminution de la fertilité et augmentation des malformations congénitales. C'est pourquoi l'UICN mentionne, parmi les stratégies de conservation à développer, l'aide à la reproduction, et en particulier l'insémination artificielle. Ce dernier a un rôle vital à jouer lorsque de nombreuses espèces sont très fragmentées. Elles ne sont plus constituées de petites sous-populations dispersées sans aucune chance de se rencontrer pour la reproduction naturelle. Les causes de cette fragmentation sont multiples mais malheureusement souvent irréversibles : déclin de l'espèce, réduction des effectifs, fragmentation de l'habitat, expansion des terres agricoles, urbanisation, mise en place de clôtures empêchant ou limitant la recherche de partenaires sexuels.

Par conséquent, la reproduction assistée devient très utile pour restaurer les échanges génétiques entre des populations éloignées et réduire le risque de dépression consanguine. Cette technique permet de maintenir le pool génétique de petites populations, en inséminant des femelles avec des semences de mâles génétiquement différents pour infuser de nouveaux gènes dans des populations affaiblies et en déclin. Il est moins dangereux, moins coûteux et plus pratique de transporter et d'utiliser des semences que de transporter et d'introduire des animaux vivants (Cresam, 2007).

Le pastoralisme et la faune

Il est bien connu dans le domaine de la conservation de la nature que la coexistence du bétail avec une grande faune sauvage entraîne une réduction de la population de la faune. Il existe une concurrence entre les deux qui exploitent des niches écologiques similaires et présentent le même comportement au pâturage. Le bétail domestique peut affecter la faune avec des maladies contagieuses et vice versa. Dans les relations entre le bétail et la faune sauvage, la faune sauvage constitue parfois une source de risque épidémiologique. En Tanzanie, les gnous sont soupçonnés d'être à l'origine de maladies transmises par les tiques, qui deviennent plus dangereuses en cas de cohabitation avec des troupeaux de bovins (Homewood et Rodgers, 1984).

Sur la base du fait que l'écologie du pastoralisme et celle de la faune sont imbriquées et historiquement compatibles, des plans de développement intégrant la conservation de la faune et le développement socio-économique des pasteurs ont été mis en œuvre, par exemple dans les zones humides d'Amboseli (Western, 1982).



Activités éducatives (exercices et études de cas)

- A partir des informations présentées dans le cours et d'autres sources de la littérature, faites un résumé.
- Analysez et commentez l'étude des animaux en termes de diversité, structure, comportement, reproduction, développement, origine, distribution et relations des animaux avec leur environnement.
- Décrivez brièvement les différentes disciplines qu'exige la zoologie.
- Comment analysez-vous les liens entre la conservation et le pastoralisme ?
- Quels sont les effets positifs et négatifs de la cohabitation entre le bétail et la faune sauvage ?
- Quels sont les effets du pastoralisme sur la flore et la faune ?
- Présentez une étude de cas sur le développement de l'élevage autour d'une zone protégée.
- Quelles stratégies peuvent être mises en œuvre pour réconcilier le pastoralisme et la conservation ?

5.2 Ecologie appliquée



Objectifs

A la fin de la session, l'apprenant sera en mesure de

1. Décrire les problèmes liés à la pollution et leurs implications écologiques
2. Expliquer le mécanisme de la déforestation et de l'érosion du sol.

Introduction générale

La destruction des forêts, l'érosion des sols, la désertification, l'épuisement des pêcheries maritimes, la rareté des matières premières minérales, la crise énergétique et la pollution de l'environnement sont autant de preuves que la civilisation humaine a une influence de plus en plus forte et négative sur la biosphère (Romade, 1995). La dégradation de la biosphère menace non seulement la richesse esthétique de la terre, les éléments rares de la flore et de la faune, mais aussi la survie de l'homme.

En réponse à ces défis, une prise de conscience internationale a conduit à la création de l'UICN et à la publication du rapport Brundtland sous la direction des Nations Unies. Il est destiné à attirer l'attention des chefs d'État du monde entier sur les besoins urgents de mettre en œuvre une politique active de conservation de la nature et de ses ressources (Cresam, 2007).

Problèmes de pollution et implications écologiques

La pollution de l'air

Le développement de l'industrie et du trafic s'accompagne du rejet dans l'atmosphère de quantités croissantes de fumée, de gaz toxiques et d'autres polluants. L'augmentation de la production d'énergie, l'industrie métallurgique, les cimenteries, le trafic routier, l'incinération des déchets, la fermentation des matières organiques sont impliqués dans la pollution de l'air (Ramade, 1995).



Figure 89. Feu de brousse en Guinée

En raison du taux relativement faible de développement industriel en Afrique, la pollution atmosphérique n'est pas aussi grave ou répandue que dans d'autres régions du monde. Cependant, dans les villes les plus peuplées du continent, l'exposition continue à l'air pollué par un trafic routier congestionné représente un risque réel pour la santé. Dans les zones rurales, la pollution résultant de la combustion de la biomasse libère un grand nombre de particules nocives dans l'atmosphère, ce qui contribue à l'augmentation et au développement des problèmes respiratoires et des allergies (FNE, 2008).



Figure 90. La pollution de l'air à Cotonou

Encadré 16. Effet de la pollution atmosphérique sur les écosystèmes forestiers

Les dépôts d'azote sous forme de nitrate ou d'ammonium résultant de la pollution atmosphérique sont nuisibles aux écosystèmes forestiers.

Une accumulation excessive d'azote dans les sols et la végétation peut avoir des effets toxiques, nocifs pour les plantes, les sols et les interactions microbiennes. Cette « saturation en azote » peut entraîner une perte de fertilité, un déclin de la production primaire et même la mort des arbres (Aber et al., 1998).

Les apports d'azote sous forme de HNO_3 et de NH_4^+ libèrent du H^+ qui provoque l'acidification des sols, en éliminant les nutriments tels que le calcium et le magnésium, et en mobilisant l'aluminium qui est toxique. Il en va de même pour le dépôt de H_2SO_4

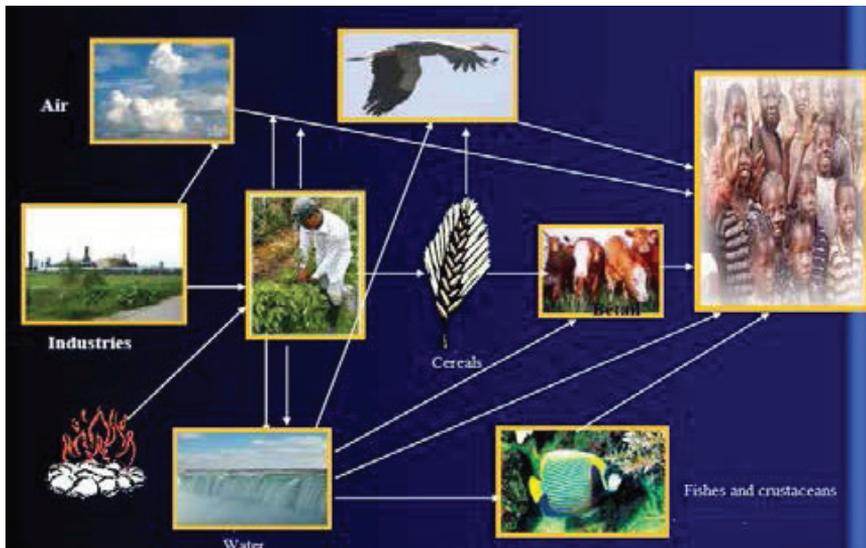


Figure 91. Pollution de l'air.

Source : <http://slideplayer.com/slide/3810987/>

Pollution du sol

L'intensification de l'agriculture et l'utilisation croissante de substances artificielles (engrais chimiques, pesticides, etc.) entraînent une contamination des sols cultivés. La pollution chimique accompagnée de leur surcharge locale en produits organiques excessivement fermentescibles compromet inéluctablement la fertilité des sols à long terme. Les pratiques actuelles de sur-fertilisation avec des engrais minéraux, combinées au mauvais recyclage de la matière organique dans les sols cultivés, constituent une menace sérieuse pour la fertilité des sols à long terme. Cette menace résulte non seulement de l'accumulation continue de métaux et de métalloïdes toxiques sous forme d'impuretés dans les engrais chimiques, mais aussi des modifications de la structure des sols.

Encadré 17. Effets de la pollution des sols

- La pollution du milieu terrestre par les pesticides entraînera diverses perturbations écologiques résultant de la contamination des parties aériennes des plantes et du sol. Ces perturbations peuvent être :
 - les bouleversements biocénotiques ou la rupture des équilibres biologiques;
 - les changements dans les écosystèmes;
 - les changements dans la couverture végétale des agroécosystèmes;
 - la mortalité de certaines espèces ; et
 - les diminutions du potentiel biotique.

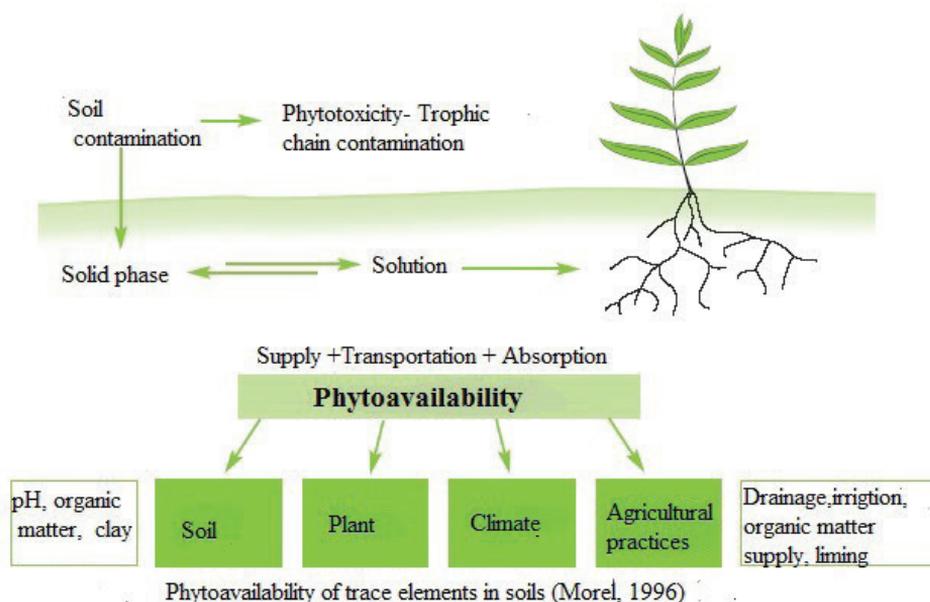


Figure 92. La pollution du sol.

Source : <https://basooma.wordpress.com/design-for-social-change/soil-pollution-pictures/>

Encadré 18. Effets de la pollution des eaux continentales et océaniques

Le rejet de polluants organiques dans les cours d'eau provoque une perturbation de l'écosystème, qui se traduit par la formation d'une zone de dégradation (mélange de l'eau et de l'effluent), d'une zone de décomposition (les champignons et les bactéries se multiplient pour décomposer la matière organique) et d'une zone septique (formation de composés réducteurs après consommation de tout l'oxygène).

L'eutrophisation des lacs résulte d'une augmentation de la fertilité des eaux du lac par l'ajout de nutriments, notamment le phosphate et le nitrate, qui favorisent la prolifération du phytoplancton et des plantes aquatiques. Peu à peu, ce processus accélère la sédimentation : le lac devient plus petit et finit par disparaître (Romade, 1995).

Le phytoplancton et les macrophytes sont affectés de manière différente par la pollution de l'eau selon le contaminant. De nombreux pesticides, en particulier tous les herbicides, sont très toxiques pour le phytoplancton.

Encadré 19. Polluants

Les principaux polluants sont gazeux (les polluants atmosphériques, le dioxyde de soufre (les pluies acides), l'oxyde d'azote, CO₂, CO), solides (les particules/aérosols, les hydrocarbures, les aldéhydes, SH, le plomb, les déchets, les métaux lourds, les nitrites, les pesticides, les matières organiques) et liquides (les déchets domestiques et industriels -l'eau).

Les principales causes de la pollution sont la production d'énergie, les activités industrielles, la circulation, l'agriculture et la croissance démographique.

Les types de pollution sont nombreux : la pollution physique (mécanique, thermique, rayonnement radioactif, bruit et vibrations à basse fréquence) ; la pollution chimique (dérivés gazeux du carbone et des hydrocarbures liquides, les détergents, les plastiques, les pesticides et autres composés organiques synthétiques, les dérivés du soufre, les dérivés de l'azote, les métaux lourds, les fluorures, les particules solides, les matières organiques fermentescibles) ; la pollution biologique (les bactéries, les virus, les zooparasites, l'introduction intempestive d'espèces animales ou végétales) ; et les nuisances esthétiques (l'urbanisation sauvage, l'implantation d'industries dans les biotopes).

Impacts de la pollution des eaux terrestres et océaniques.

La pollution biologique de l'eau résulte d'une forte contamination bactériologique. L'utilisation des cours d'eau comme moyen de dilution des effluents urbains affecte la santé publique. La pollution par la matière organique entraîne la multiplication de nombreuses espèces de germes pathogènes. La pollution des eaux minérales résulte du rejet dans les effluents urbains de divers composés tels que les nitrates, les phosphates et autres sels utilisés en agriculture, et de divers résidus provenant des industries. L'eau peut également être polluée par des substances organiques synthétiques. La production et l'utilisation de produits chimiques dans l'agriculture constituent une menace sérieuse pour l'hydrosphère (Ramade, 1995). Les plastiques sont un polluant très répandu dans les rivières et l'environnement marin en Afrique, voir Encadrés 18 et 19 ci-dessus.

Déforestation

La déforestation est la forme la plus évidente de conversion des terres en Afrique. Les forêts et les zones boisées produisent de nombreux biens et services écosystémiques (matériaux de construction, nourriture, énergie, médicaments, protection des rivières, protection des sols, habitat, pâturage, qualité de l'eau, régulation des débits fluviaux) qui contribuent au développement économique et social (PNUE, 2008). Au niveau international, les forêts et les zones boisées africaines sont reconnues pour leur rôle dans la régulation du climat et le maintien de la biodiversité (PNUE, 2006c). L'exploitation forestière, la conversion des terres à l'agriculture, le surpâturage, les incendies de forêt, l'exploitation du bois de chauffage et du charbon, l'exploitation minière, l'urbanisation, la mise en œuvre de projets d'infrastructure et les guerres civiles sont les principales causes de la déforestation (PNUE, 2008).

En Afrique, de nombreux facteurs contribuent à la dégradation de biomes riches et divers. La pratique de l'agriculture itinérante est une cause majeure de la déforestation en Afrique. La réduction des périodes de jachère entraîne l'épuisement des sols et l'accélération de l'érosion. Les cultures industrielles (coton, palmier, caoutchouc, café, cacao) dévastent les écosystèmes forestiers. Par exemple, au Ghana, la culture du cacao et d'autres plantes industrielles a réduit la superficie forestière de 85 % en une cinquantaine d'années (Ramade, 1995). En Afrique de l'Est, l'expansion des plantations de thé, de café, d'ananas et d'autres cultures d'exportation s'est faite au détriment des vieilles forêts tropicales de feuillus.

La conversion des forêts en terres agricoles est nécessaire pour la production alimentaire, mais les impacts de la déforestation telle qu'elle est pratiquée menacent les écosystèmes et entraînent la perte d'habitats naturels (PNUE, 2008). Le cycle global du carbone est également perturbé : lorsqu'un arbre est coupé, le carbone est libéré dans l'atmosphère (par combustion ou décomposition), sous forme de CO₂ et contribue au réchauffement de la planète (Willcocks 2002).

Encadré 20. Effet de la déforestation

- Modifications de l'écosystème et perte d'habitat.
- Perturbation du cycle global du carbone.
- Dégradation des terres agricoles et changement de la productivité.
- Changement climatique
- Résurgence des maladies

Érosion du sol

L'érosion est un phénomène naturel, causé par le vent et l'eau, et qui s'exprime sur toutes les surfaces terrestres. L'érosion entraîne une redistribution des particules de sol. Tous les sols sont soumis à une érosion qui peut avoir des origines diverses. En agriculture, l'érosion du sol désigne l'amincissement de la couche arable d'un champ sous l'effet des forces érosives naturelles de l'eau et du vent, ou sous l'effet des activités agricoles, comme le labour (Ritter, 2015). D'autres causes qui accélèrent le phénomène d'érosion sont la compaction du sol, l'appauvrissement en matière organique, la dégradation de la structure, le mauvais drainage interne, les problèmes de salinisation et d'acidification.

L'érosion hydrique est un mécanisme naturel qui transporte les particules de sol des zones de haute altitude vers les zones plus basses où elles vont se sédimer en fonction de la vitesse d'écoulement et de la densité de l'eau (Villeneuve, 1998). L'érosion hydrique est causée par le mouvement de l'eau. Son ampleur dépend de l'intensité des pluies et du ruissellement, de l'érodabilité du sol, de la pente et de sa longueur, des cultures et de la végétation ainsi que des pratiques culturales.

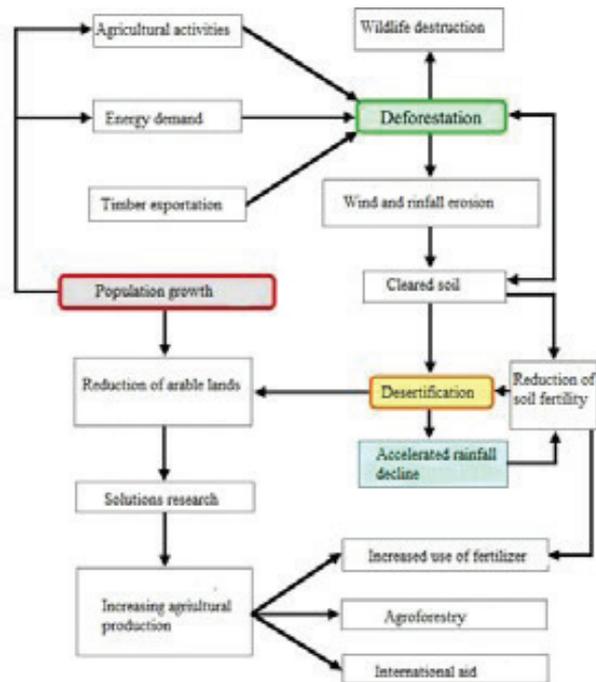


Figure 93. Diagramme des sources de déforestation

Le risque d'érosion est d'autant plus élevé que la durée des précipitations est longue. L'impact des gouttes de pluie sur la surface du sol peut briser les agrégats et disperser les particules du sol. Les particules les plus légères, comprenant de très fines particules de sable, de limon, d'argile et de matière organique, sont facilement emportées par les éclaboussures et le ruissellement (Ritter, 2015). L'érodabilité d'un sol est une estimation basée sur ses caractéristiques physiques et sur la vulnérabilité du sol à l'érosion. L'érodabilité est influencée par la texture, la structure, la teneur en matière organique et la perméabilité. L'érosion hydrique augmente avec la longueur de la pente en raison de l'augmentation du ruissellement. À mesure que l'écoulement de l'eau s'accélère, le transport des sédiments augmente, ce qui entraîne des risques accrus d'érosion.

Le risque d'érosion augmente si le sol n'est pas suffisamment recouvert par la végétation et/ou une couche de résidus de culture. Les résidus et la végétation protègent le sol contre l'impact des gouttes de pluie et des éclaboussures d'eau. Ils ont également tendance à réduire le débit de l'eau et à favoriser l'infiltration dans le sol.

L'érosion hydrique est influencée par les pratiques culturales, notamment la profondeur du labour, sa direction, le moment du labourage, le type de matériaux agricoles utilisés et le nombre de fois que le sol est soumis à des opérations agricoles.

Encadré 21. Formes d'érosion hydrique

L'érosion en nappe : elle se produit généralement de manière égale sur une pente uniforme et passe inaperçue jusqu'à ce que la terre arable ait été enlevée.

L'érosion en rigole : se produit lorsque les eaux de ruissellement se rassemblent et forment des filets ou des gouttières.

L'érosion par ravinement : stade avancé de l'érosion en ravin caractérisé par une indentation profonde du sol avec formation d'une dépression.

L'érosion des berges : usure des berges d'un ruisseau ou d'une rivière.

L'érosion éolienne. Dans des conditions favorables, l'érosion éolienne peut entraîner des pertes considérables de terres et de sols. Il existe trois types d'érosion éolienne : la suspension (soufflage de minuscules particules dans l'air où elles peuvent être transportées sur de longues distances), la saltation (soulèvement et chute répétés de particules légèrement plus grosses) et la reptation (mouvement de particules trop grosses pour être soulevées au sol). Le type varie en fonction de la taille des particules et de la puissance du vent.

La vitesse et l'étendue de l'érosion éolienne dépendent de l'érodabilité du sol, de la rugosité de la surface du sol, du climat et de la couverture végétale. L'érodabilité du sol est définie comme le processus naturel par lequel le vent, l'eau en mouvement, la glace et les forces gravitationnelles déplacent les matières solides et particulaires du sol. Les surfaces lisses ont peu de résistance au vent par rapport aux terrains rugueux. La vitesse du vent et la durée de l'épisode venteux ont un effet direct sur l'étendue de l'érosion du sol. Les niveaux d'humidité sont très faibles à la surface des sols excessivement drainés ou pendant les périodes de sécheresse, ce qui provoque le détachement et l'envol des particules. En l'absence de couverture végétale, empêchant le vent, ce dernier déplace les particules du sol sur de longues distances, ce qui augmente l'érosion.

Encadré 22. Effets de l'érosion

- Appauvrissement des nutriments du sol
- Baisse de la productivité des terres et pollution des cours d'eau, des zones humides et des lacs
- Perte de la couche arable et nuisance à sa qualité, sa structure, sa stabilité et sa texture
- Ensablement des cours d'eau, envasement des réservoirs et dommages aux habitats aquatiques
- Dégradation de la qualité de l'eau
- Contamination et pollution des sources d'eau
- Dommages aux cultures
- Diminution de la capacité de rétention d'eau du sol
- Dégradation de la santé humaine
- Perte permanente de fertilité et déclin de la biodiversité des sols
- Glissement de terrain



Activités éducatives (exercices et études de cas)

- A partir des informations de base présentées dans le cours et d'autres de la littérature, faites un résumé.
- Quels sont les problèmes de pollution et leurs implications environnementales ?
- Identifiez les sources de pollution pour différents environnements.
- Effectuez une analyse systémique de la pollution de l'air, de l'eau et du sol.
- Analysez et expliquez les mécanismes de la déforestation et leurs effets sur d'autres écosystèmes.
- Préparez une étude de cas sur l'état des ressources forestières dans un pays africain.
- Préparez une fiche technique sur le phénomène de l'érosion.
- Analysez et expliquez les effets des différents types d'érosion sur les différents écosystèmes.

5.3 Pédologie



Objectif

À la fin de la session, l'apprenant sera en mesure de

Décrire la genèse et l'évolution du sol, les questions de fertilité du sol et la gestion de la fertilité à long terme.

Introduction générale

Un sol est un film d'altération recouvrant une roche, composé de matières minérales et organiques (humus). Il naît de la roche et évolue ensuite sous l'influence de facteurs environnementaux, principalement le climat et la végétation. La pédologie est l'étude des sols (Beauchamp, 2008). L'inventaire des sols permet de générer des connaissances à leur sujet. Il permet de caractériser les sols du point de vue de leurs propriétés biologiques, physiques et chimiques, en montrant leur importance relative et leur répartition sur un territoire.

En Afrique, la diversité des roches mères et les contrastes dans le relief et les influences climatiques donnent des sols relativement variés, divisés en de nombreuses sous-classes selon leurs propriétés physiques, chimiques et biologiques. En Afrique où les sols sont généralement fertiles, ils sont souvent dégradés par les actions humaines sur la végétation (feux de brousse, déforestation, raccourcissement de la période de jachère) et sur les sols (pollution, extractions), et sous l'influence des pluies érosives.

La préservation des ressources en sols en Afrique passe d'abord par l'amélioration des connaissances sur l'état et l'évolution des sols, en particulier par l'établissement d'un inventaire, d'un atlas de planification des ressources en terres et la mise en place d'une base de données harmonisée sur les paramètres physico-chimiques et biologiques des sols. Par la suite, la capitalisation de ces connaissances permettra une meilleure gestion des ressources en sols, la réhabilitation des terres dégradées, la restauration de la fertilité des sols et la gestion des terres agricoles.

Pédogenèse

Structure et évolution des sols. Dans un climat tempéré, lorsqu'une roche est visible sur une surface, elle est progressivement altérée et colonisée par la végétation : les plantes, les plantes herbacées puis les arbres ; le sol se forme. Un horizon d'humus est d'abord établi sur la roche altérée (profil AC, jeune sol) et ensuite un horizon de type B (profil ABC). La profondeur augmente et le profil du sol évolue jusqu'à atteindre un état d'équilibre avec le climat et la végétation. Les matériaux circulent dans le sol dans le sens descendant, par infiltration des solutions, et dans le sens ascendant, par remontée capillaire et remontée biologique (vers de terre, termites en climat tropical, racines) (Beauchamp, 2008). La texture du sol est définie par la taille des particules qui le composent, gravier, sable, limon, argile. La composition minéralogique des particules est également liée à leur taille (les particules grossières sont principalement à base de quartz, les fines à base de silicates philo). La figure 94 montre la composition granulométrique en trois composantes, la figure 95 montre la nature minéralogique et la taille des particules de sol, et la figure 96 montre le taux de tendance de deux types de sol sous le climat atlantique.

La structure est l'organisation du sol. La structure est rendue possible par des colloïdes : argiles, substances d'hydroxydes humiques. Les argiles favorisent la fragmentation du sol en produisant des fentes de retrait lors de la dessiccation. Ils peuvent enrober d'autres particules et boucher les pores. Ils peuvent également aller chercher des composés organiques par absorption sur leurs couches via les oxyhydroxydes d'aluminium et de fer qui forment un revêtement de film. Ces complexes organominéraux (ou argilo-humiques) sont agglomérés en agrégats incorporant des filaments mycéliens et des bactéries

polysaccharidiques (Beauchamp, 2008). La figure 97 montre la fixation des ions sur le complexe argilo-humique.

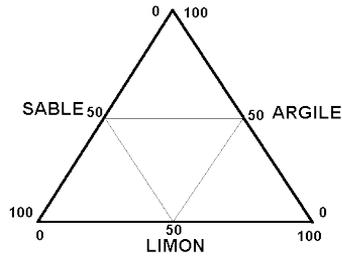


Figure 94. Composition granulométrique.

Source : Beauchamp (2008)

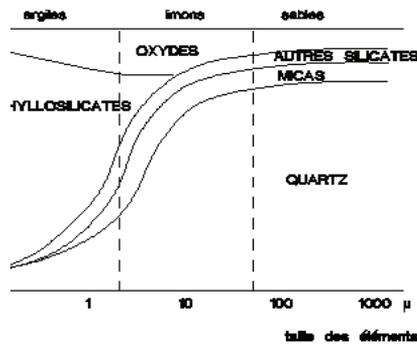


Figure 95. Nature minéralogique et taille des particules du sol.

Source : Beauchamp (2008)

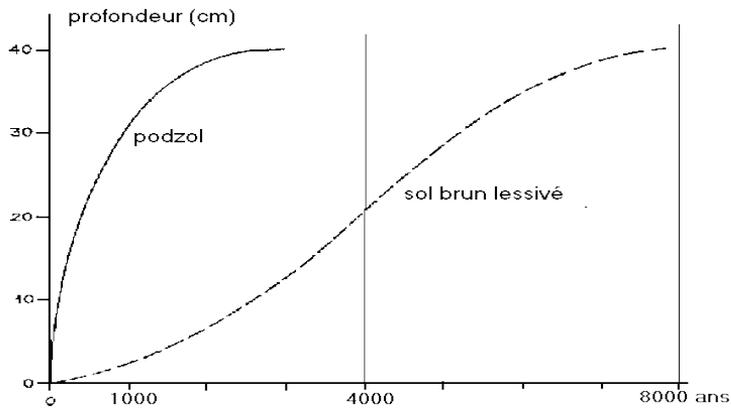


Figure 96. Taux d'évolution de deux types de sols sous le climat atlantique.

Source : Duchaufour cité par Beauchamp (2008)

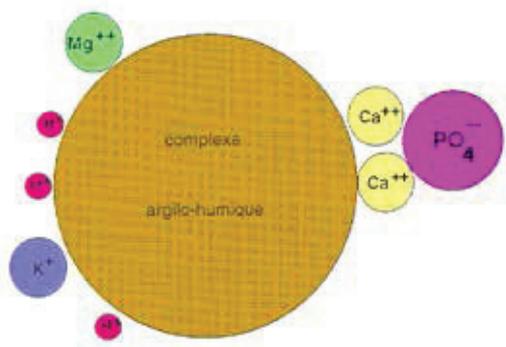


Figure 97. Fixation des ions sur le complexe argilo-humique.

Source : Beauchamp (2008)

Il existe 3 principaux types de structures : *particulaire* (sol très meuble) ; *massive* (éléments liés au ciment) ; et, *fragmentaire* : en agrégat (mn), en morceaux (cm) ou polyédrique, très favorable aux cultures.

La végétation fournit l'humus et assure la circulation ascendante de la matière ; elle protège ensuite la roche de l'érosion. La destruction de la végétation entraîne la destruction des sols bien établis ou l'évolution régressive des sols. Les cycles d'évolution-régression des sols prennent le relais à des intervalles de temps courts (cataclysmes, action humaine) ou longs (climat). Le rôle déterminant du climat dans l'altération des roches et le développement des sols a conduit à la formulation de la théorie de la bio-rhexistase d'Erhart. Dans les climats humides, les conditions favorisent l'altération des roches, le développement de la végétation et la formation des sols ; la destruction des roches se limite à des phénomènes chimiques qui libèrent essentiellement des ions solubles : cette période favorable à la vie est la biostase. En période sèche, les roches exposées sont soumises à une désagrégation mécanique qui produit des matériaux détritiques grossiers : c'est la rhexistase (Beauchamp, 2008).

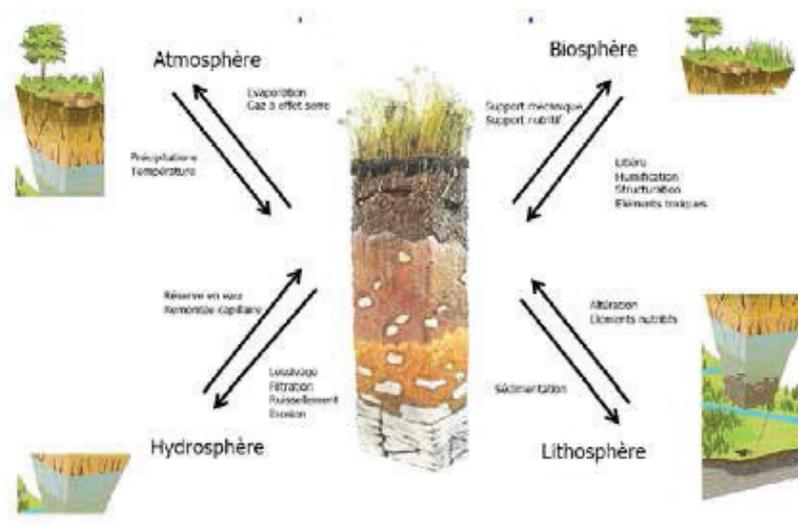


Figure 98. Processus de formation du sol.

Source : Duchaufour (2001)

Fertilité du sol

Gestion de la fertilité des sols. Sept pour cent des terres agricoles d'Afrique nécessitent une gestion plus attentive mais ont un fort potentiel agricole. La majorité de ces régions possède l'un des quatre principaux types de sols. De grandes concentrations de tchernoziom brillant sont présentes en Côte d'Ivoire, dans le sud du Ghana et en Tanzanie. En République démocratique du Congo et au Nigeria, on trouve de vastes zones d'andosols humiques. La Zambie abrite une vaste région de tchernoziom calcique, tandis que le Nord du Maroc possède de vastes zones de dépôt d'andosols (PNUE, 2008). De nombreuses pratiques traditionnelles et modernes peuvent améliorer la fertilité des sols et l'adaptation au changement climatique. L'amélioration de la fertilité des sols peut être envisagée par zone agroécologique (tableau 8 ci-dessous).

Quelques exemples d'approches d'amélioration de la fertilité des sols sont présentés ci-dessous pour certaines zones agroécologiques (FAO, 2003).

Les zones humides. De bons rendements et des systèmes durables peuvent être obtenus dans les zones humides tout en conservant :

- un niveau satisfaisant de matière organique dans le sol pour atténuer les problèmes d'acidité, augmenter l'activité des microorganismes du sol et maintenir une structure de sol appropriée;
- un niveau suffisant d'éléments nutritifs dans le sol pour permettre un rendement économique des cultures ; et
- une couverture végétale pour éviter l'érosion.

Hautes terres sub-humides d'Afrique de l'Est. Ici, le maintien et l'amélioration de la fertilité du sol dépendront de :

- l'utilisation d'engrais minéraux et de chaux ;
- la culture d'engrais verts et de plantes de couverture ; et,
- l'utilisation de l'agroforesterie et de la gestion intégrée d'éléments nutritifs par la collecte de fumier ou d'autres sources de matière organique.

Zone semi-aride de l'Afrique orientale et australe. Le développement des techniques de collecte d'eau et de conservation des sols et de l'eau pour une utilisation maximale des précipitations limitées constitue la seule option réelle pour augmenter la production de cultures vivrières dans ces régions.

Tableau 8. Caractéristiques des principales zones agro-écologiques en Afrique subsaharienne

Domaines	Projections démographiques (en millions)			Principales caractéristiques climatiques		Principaux types de sol	Végétation dominante	Systèmes de production
	2000	2010	2025	LGP*	Pluie**			
Régions humides et subhumides								
Afrique occidentale	215.9	283.9		> 180	> 1000	Ferralsols et Luvisols	Mosaïque de forêt tropicale humide et forêt-savane	Agriculture itinérante et semi-permanente à faible niveau d'intrants. Cultures d'arbustes et de tubercules vivaces
Afrique centrale	64.8	83.2		> 270	> 1500	Ferralsols et Acrisols		Culture itinérante
Régions de montagne subhumides								
Afrique orientale	149		281	180-270	900-1500	Nitrisols, Ferralsols, Andosols	Forêt et prairie de montagne	Cultures permanentes et semi-permanentes avec cultures mixtes et élevage.
Afrique du Sud subhumide et semi-aride								
Subhumide	99		199	120-270	700-1500	Ferralsols, Luvisols, Cambisols	Forêt sèche - mosaïque de savane et de prairie	Culture itinérante, cultures mixtes semi-permanentes.
Sec à Semi-sec	20		41	75-120	250-700	Luvisols et Arenosols	Mosaïque de forêt sèche - savane	Culture itinérante, cultures mixtes semi-permanentes, pastoralisme.
Afrique soudano-sahélienne								
Sec à Semi-sec	102.7***		127.8***	75-120	250-700	Arenosols	Bruant et arbustes à graminées annuels	Nomadisme avec production mixte complémentaire, pastoralisme.
Semi-aride à humide				120-180	700-1300	Luvisols et Arenosols	Savane avec des arbres à feuilles caduques et des herbes vivaces	Nomadisme partiel, culture itinérante et production mixte semi-permanente.

Source : FAO, 1986. L'agriculture africaine : les 25 prochaines années (adaptation)

* Longueur de la période de croissance ; **Précipitation en millimètres par an ; *** Non séparé entre semi-aride humide et semi-aride sec.

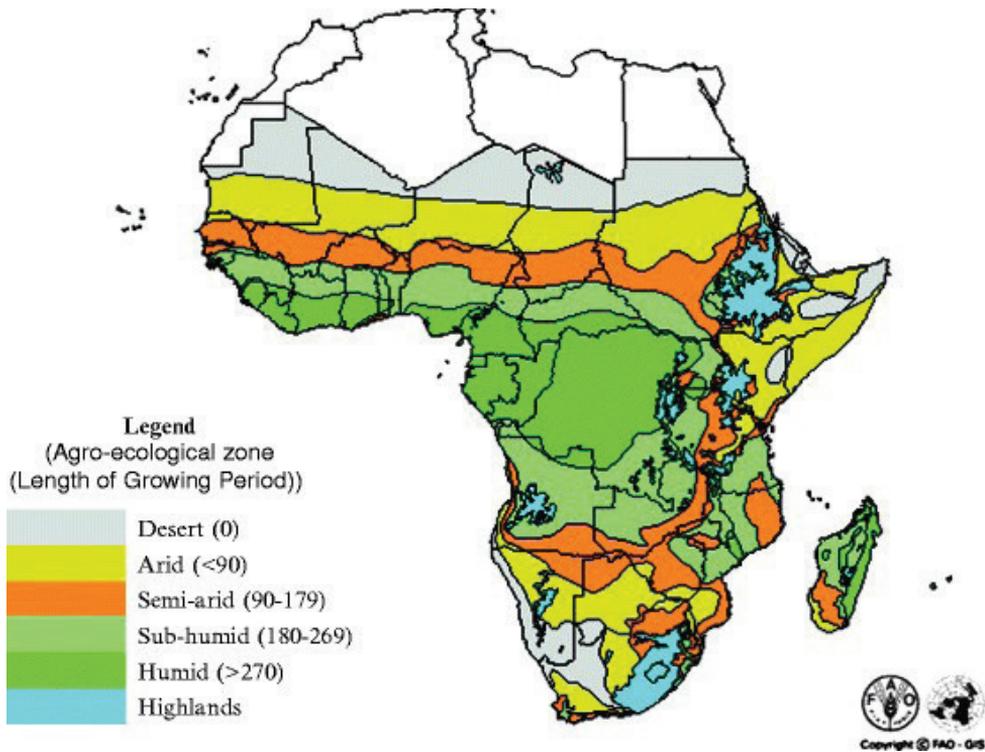


Figure 99. Principales zones agro-écologiques en Afrique subsaharienne.

Source : https://www.researchgate.net/figure/278687988_fig3_Figure-2-2-Major-agro-ecological-zones-based-on-the-length-of-the-growing-period



Activités éducatives (exercices et études de cas)

- A partir des informations de base présentées dans le cours et d'autres de la littérature, rédigez un résumé exécutif par groupes de 4-5 sur la fertilité du sol, la formation des horizons du sol, la formation et l'évolution du sol en Afrique.
- Préparez et présentez une étude de cas sur les bonnes pratiques de gestion de la fertilité des sols dans un pays africain.

5.4 Hydrologie



Objectifs

À la fin de la session, l'apprenant sera en mesure de

- Décrire le cycle hydrologique et son importance relative.
- Analyser les principaux réservoirs d'eau, leurs caractéristiques et l'utilisation résultant de sa distribution ; et
- Calculer un bilan hydrique.

Introduction générale

Dans de nombreuses régions du monde, la disponibilité et la qualité de l'eau sont de plus en plus menacées par la surexploitation, la mauvaise utilisation et la pollution, ce qui conduit à une prise de conscience croissante du fait que ces deux aspects sont fortement influencés par les forêts (FAO, 2007). De plus, le changement climatique modifie le rôle des forêts dans la régulation des flux d'eau et leur influence sur la disponibilité de l'eau (Bergkamp et al., 2003). La relation entre les forêts et l'eau est donc essentielle et mérite une attention particulière.

Les bassins versants forestiers fournissent une forte proportion de l'eau utilisée à des fins domestiques, agricoles, industrielles et écologiques dans les zones en amont et en aval (FAO, 2007). Les gestionnaires des terres, des forêts et des ressources en eau ont la lourde tâche de maximiser le large éventail d'avantages multisectoriels que procurent les forêts sans affecter les ressources en eau et les fonctions des écosystèmes (FAO, 2007). Pour relever ce défi, il est urgent d'améliorer la compréhension des interactions entre les forêts/arbres et l'eau, de sensibiliser et de renforcer les capacités en hydrologie forestière, et d'intégrer ces connaissances et résultats de recherche dans les politiques (FAO, 2007).

Définition des composantes du cycle hydrologique

Le cycle hydrologique est un concept qui englobe les phénomènes de mouvement et de renouvellement de l'eau sur terre (Musy, 2005). Les composantes du cycle hydrologique sont : les précipitations, l'évaporation, la transpiration (des plantes), l'interception, le ruissellement, l'infiltration, la percolation, le stockage et les flux souterrains (Musy, 2005).

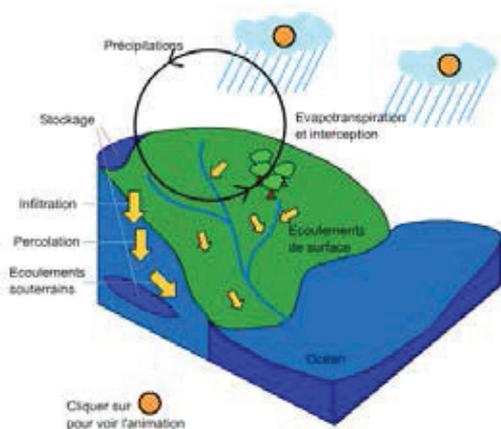


Figure 100. Le cycle de l'eau.

Source : <http://www.physicalgeography.net/fundamentals/8m.html>

- **Les précipitations** sont toutes les eaux qui tombent sur la surface de la terre, à la fois sous forme liquide (bruiue, pluie) et solide (neige, grésil, grêle) et les précipitations occultes ou sous forme de légers dépôts (rosée, givre blanc, gel).
- **L'évaporation** est définie comme le passage physique de l'état liquide à l'état gazeux. Les plans d'eau et la couverture végétale sont les principales sources de vapeur d'eau. La sublimation est le passage direct de l'eau sous forme solide (glace) à la vapeur. Le principal facteur régissant l'évaporation est le rayonnement solaire.
- **L'évapotranspiration** englobe l'évaporation et la transpiration des plantes. L'évapotranspiration réelle est la somme des quantités de vapeur d'eau qui s'échappent par le sol et les plantes lorsque le sol est à une certaine humidité et les plantes à un stade de développement physiologique et sanitaire spécifique. L'évapotranspiration de référence (anciennement potentielle) est la quantité maximale d'eau qui peut être perdue dans la phase d'évaporation, sous un climat donné ; par un couvert végétal continu spécifié (herbe) bien alimenté en eau et pour une plante à croissance saine. Elle comprend donc l'évaporation de l'eau du sol et la transpiration du couvert végétal pendant la période considérée pour un terrain donné.
- **Interception et stockage dans les dépressions.** La pluie (ou dans certains cas la neige) peut être retenue par la végétation, puis redistribuée en une partie qui atteint le sol et une autre qui s'évapore. La partie qui n'atteint jamais le sol forme l'interception. L'eau de stockage est définie comme l'eau retenue dans les creux et les dépressions du sol pendant et après une pluie battante.

Encadré 23. Rétention de l'eau par la couverture végétale

La quantité d'eau qui peut être interceptée varie considérablement. Si la végétation a une grande surface basale ou foliaire, un degré de couverture important, la rétention d'eau peut atteindre jusqu'à 30% des précipitations totales pour une forêt mixte, 25% pour les prairies et 15% pour les cultures (Musy, 2005).

L'effet respectif de l'interception et du stockage dans les dépressions est très variable et diminue pendant la pluie battante. Elle entraîne généralement un retard dans le démarrage et la réponse hydrologique qui peut être perçue à la sortie du bassin (Musy, 2005).

- **L'infiltration et la percolation** désignent le mouvement de l'eau qui pénètre les couches superficielles du sol et l'écoulement de cette eau dans le sol et le sous-sol, sous l'action de la gravité et des effets de la pression. La percolation représente une infiltration profonde dans le sol vers la nappe phréatique. La capacité d'infiltration ou l'infiltrabilité est la quantité maximale d'eau qui peut s'infiltrer par unité de temps dans le sol dans des conditions données. L'infiltration est nécessaire pour renouveler la réserve d'eau du sol, alimenter les nappes phréatiques et reconstituer les aquifères. De plus, en absorbant une partie de l'eau de pluie, l'infiltration peut réduire les débits de ruissellement.
- **Écoulement.** On distingue les écoulements rapides des écoulements souterrains plus lents. Les écoulements « rapides » et, contrairement aux écoulements souterrains dits « lents » représentent la partie infiltrée de l'eau de pluie qui se déplace lentement à travers les aquifères vers les sorties. Les écoulements qui gagnent rapidement les sorties pour créer des inondations sont subdivisés en écoulements de surface (mouvement de l'eau à la surface du sol) et en écoulements souterrains (mouvement de l'eau dans les premiers horizons du sol). L'écoulement souterrain fait référence au mouvement de l'eau dans le sol.

Grands réservoirs d'eau : distribution et utilisation

Les réserves d'eau de surface. La rétention en surface comprend toute l'eau accumulée sur le sol ou au-dessus du sol (Musy, 2005). Elle comprend l'eau interceptée par la couverture végétale, l'évaporation pendant les précipitations et le stockage dans les dépressions du sol, c'est-à-dire le volume d'eau stocké dans les petites dépressions du sol jusqu'à leur niveau de déversement. Elle ne comprend pas la rétention de surface, c'est-à-dire la partie de la pluie qui reste à la surface du sol pendant les précipitations et qui s'égoutte ou s'infiltre lorsque la pluie a cessé. Toute l'eau recueillie dans les dépressions de surface, des plus petites, en raison de la rugosité du sol, aux plus grandes plaines inondées, lacs, marais, étangs, etc., est appelée réserve d'eau de surface.

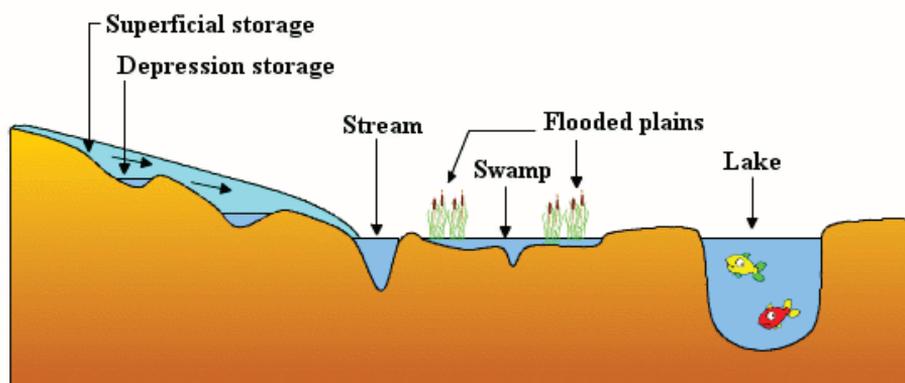


Figure 101. Stockage des eaux de surface.

Source : Musy (2005)

Selon l'échelle temporelle (précipitations, saison, année, etc.) et spatiale (type de dépression), on distingue : de petites dépressions de surface qui se remplissent dès que l'intensité des précipitations dépasse la capacité d'absorption du sol. Lors de fortes pluies, ces dépressions sont remplies et le surplus va dans le ruissellement de surface. Le volume total d'eau qui peut être retenu dans ces dépressions de surface est appelé capacité de rétention en surface. Les lacs, les étangs ou les plaines inondables sont des réservoirs d'eau de surface naturels ou artificiels d'un volume et d'une superficie considérables. Ils interviennent directement dans l'équilibre hydrique par les échanges d'eau avec le sol (relations eaux de surface-eaux souterraines) en favorisant l'évaporation de leur surface ou en retardant le débit des rivières par le laminage.

Les réserves d'eau souterraine sont liées à l'eau qui pénètre dans le sol et y reste pendant une courte période ou de nombreuses années (Musy, 2005). Les contraintes de circulation de l'eau dans l'épaisseur du sol et du sous-sol permettent de distinguer l'eau du sol et l'eau des réservoirs souterrains.

L'eau du sol est assimilée à l'eau présente dans la zone non saturée²⁴. L'évolution de la quantité (volume) et de la qualité (composition de l'eau) résulte d'une dynamique de transfert liée aux propriétés de l'eau et aux caractéristiques du sol. La zone d'eau du sol est le site des racines des plantes et constitue une limite supérieure importante des aquifères (alimentation, évaporation). C'est aussi le point de transit des matériaux et substances.

Ces processus font partie du continuum atmosphère – sol - plante.

²⁴ La zone non saturée, un système triphasé (solide, liquide, gazeux) où seule une petite partie de l'espace lacunaire est remplie d'eau, le reste étant rempli d'air et de sol (Musy, 2005)

L'eau du sous-sol. L'eau du sous-sol correspond à l'eau souterraine. L'infiltration renouvelle l'eau dans le sous-sol et les réservoirs souterrains et maintient, par son circuit dans les aquifères, le débit de l'écoulement souterrain (débit de base). Elle alimente les sources et les ruisseaux

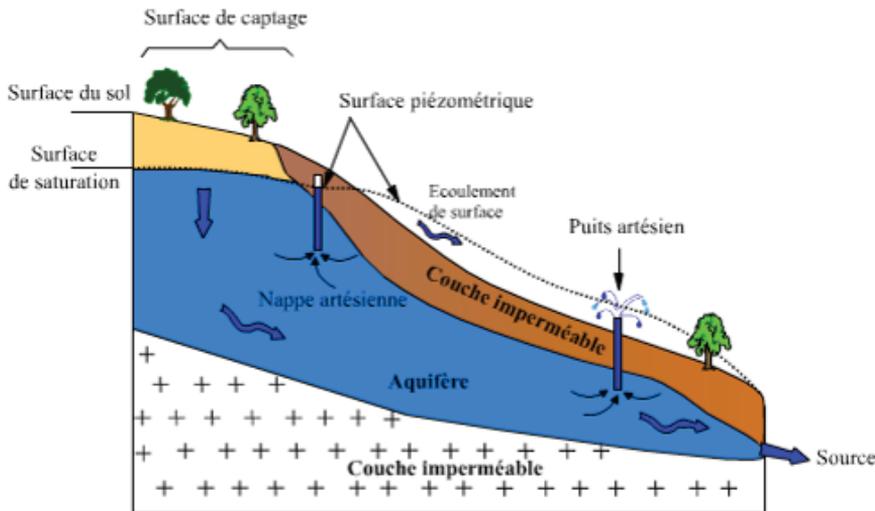


Figure 102. L'eau souterraine.

Source : Champoux et Toutan, cité par Musy (2005).

Le niveau des eaux souterraines est influencé par le régime de percolation de l'eau de pluie ou d'irrigation à travers la zone non saturée.

Encadré 24. Calcul de la réserve d'eau souterraine

Afin d'évaluer le volume d'eau souterraine, une estimation du niveau d'imperméabilité est faite par une étude géologique appropriée, ou par la détermination du coefficient de stockage de la roche, ou par des mesures des niveaux piézométriques.

La réserve exploitable d'eau souterraine d'un aquifère libre ou captif est donnée par la différence du niveau piézométrique actuel avec le niveau auquel il est convenu de replier l'eau souterraine, multipliée ensuite par sa surface moyenne et son coefficient de stockage.

Distribution/répartition et utilisation des ressources en eau

La distribution de l'eau peut être réalisée par : i) une distribution quantitative et qualitative de l'eau à l'échelle globale, et en relation avec les différentes composantes du cycle hydrologique, ii) une distribution spatiale du bilan hydrique sur les continents.

A l'échelle mondiale. Les océans occupent une superficie à peu près égale à 70 % de la surface du globe et représentent 97 % de la masse totale de l'eau de la biosphère. La répartition quantitative de l'eau sur terre montre que l'eau douce ne représente qu'environ 3 % du volume total des eaux du globe.

Elle se trouve à 99 % dans les calottes glaciaires polaires, les glaciers et les eaux souterraines de grande profondeur qui représentent des réserves d'eau douce difficiles à atteindre. Le tableau 9 présente quelques quantités indicatives de réserves d'eau (d'après Gleick, 1993).

Les eaux souterraines constituent la deuxième plus grande réserve en eau douce au monde après les eaux glaciaires. Elle est bien supérieure aux eaux de surface continentales. Sa contribution à l'eau potable est très importante, de sorte que dans certaines régions du monde, les populations utilisent exclusivement les eaux souterraines par le biais de puits et de forages, comme c'est le cas dans la majorité des zones semi-arides et arides d'Afrique. Dans d'autres pays africains, l'eau de surface est la source d'eau potable, en particulier dans les zones rurales. Cependant, les eaux de surface continentales (lacs d'eau douce, rivières, etc.) sont de plus en plus polluées par les activités anthropiques. L'encadré 25 présente un processus d'inversion des tendances de la dégradation des terres et de l'eau en Afrique.

Tableau 9. Quantités indicatives des réserves d'eau

Réservoir	Fraction du total des réserves [%].	Fraction des réserves d'eau douce [%].
Les eaux de l'océan	96.5379	
Total des eaux souterraines	1.6883	
Nappes d'eau douce	0.7597	30.0606
Eau du sol	0.0012	0.0471
Glaciers et couverture de neige permanente	1.7362	68.6972
Antarctique	1.5585	61.6628
Groenland	0.1688	6.6801
Arctique	0.0060	0.2384
Régions montagneuses	0.0029	0.1159
Pergélisol	0.0216	0.8564
Réserves d'eau dans les lacs	0.0127	
Eau fraîche	0.0066	0.2598
Eau salée	0.0062	
Marais	0.0008	0.0327
Rivières	0.0002	0.0061
Eau biologique	0.0001	0.0032
Eau atmosphérique	0.0009	0.0368
Total des réserves	100	
Réserves d'eau douce	2.53	100

Encadré 25. Exemple d'outils pour la gestion transfrontalière des ressources en eau en Afrique

Processus d'analyse diagnostique transfrontalière (ADT) : identification et hiérarchisation des problèmes transfrontaliers, évaluation des impacts environnementaux et des conséquences socio-économiques, analyse des chaînes causales (causes immédiates, sous-adjacentes et profondes), analyse de la gouvernance.

Formulation du Programme d'actions stratégiques (PAS) : formulation basée sur une vision à long terme (objectifs de qualité de l'écosystème), évaluation des options en réponse aux problèmes identifiés dans l'ADT, système de partenariats et mise en œuvre des actions de l'option choisie.

Au niveau continental, les principaux éléments de la distribution de l'eau sont donnés dans le tableau 10. Le pourcentage des précipitations de ruissellement est plus élevé dans l'hémisphère Nord (~ 40 %) en comparaison à l'hémisphère Sud (Australie : ~ 35 %, Afrique : ~ 20 % et à l'Amérique du Sud : ~ 10 %).

Tableau 10. Principaux éléments de la distribution mondiale de l'eau

Continents	Précipitations (mm)	Évaporation (mm)	Ruissellement (mm)
Europe	790	507	283
Afrique	740	587	153
Asie	740	416	324
Amérique du Nord	756	418	339
Continent sud-américain	1600	910	685
Australie et Océanie	797	511	280
Antarctique	165	0	165
Moyenne pour tous les continents	800	485	315

Encadré 26. Exemple de réserves d'eau en Afrique

Les bassins fluviaux nationaux et transfrontaliers (bassin du Nil, Niger, Sénégal, Gambie, Zambèze, Volta, Orange, Juba-Shibeli,) ; les lacs principaux (Victoria, Tchad, Tanganyika, et les réservoirs de barrages hydroélectriques) ; les cours d'eau et les zones humides (rivières,) ; les systèmes aquifères transfrontaliers (PNUE, 2008)

Système de drainage de l'eau

Les figures suivantes illustrent le système de drainage.

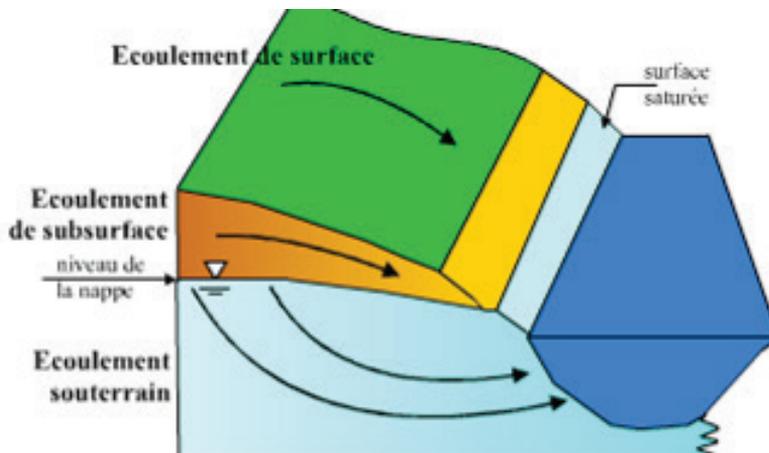


Figure 103. Différents types d'écoulement. Source : Musy (2005)

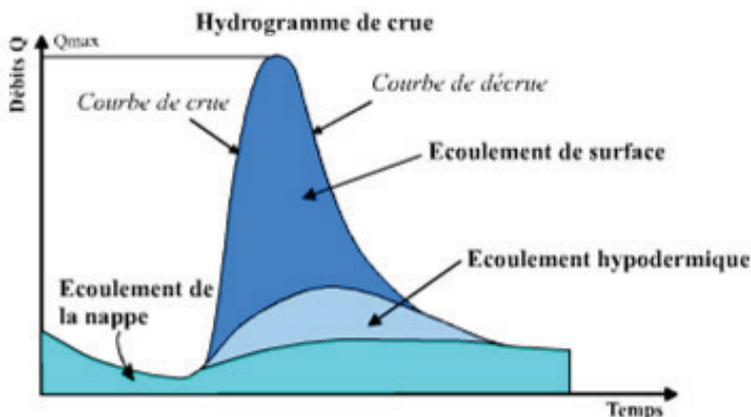


Figure 104. Répartition des différentes phases d'un hydrogramme de crue.

Source : Musy (2005)

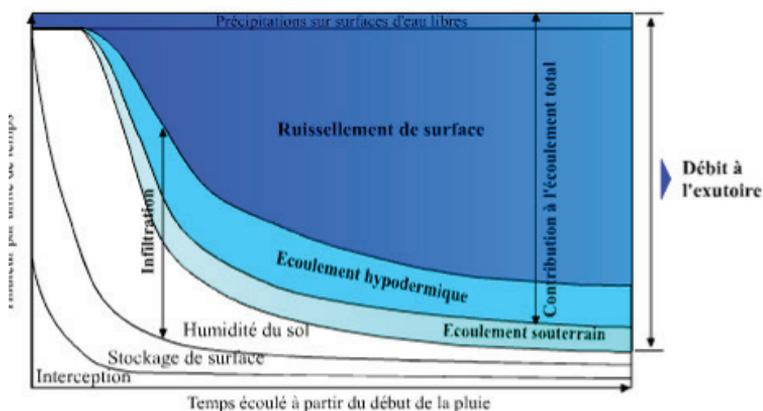


Figure 105. Répartition de la hauteur des précipitations lors d'averses d'intensité constante. Source : Remanieras cité par Musy (2005).

Les écoulements lents d'eau représentent la partie infiltrée des eaux de pluie qui transitent lentement à travers la nappe phréatique vers les exutoires. Les écoulements qui atteignent rapidement les exutoires pour provoquer des inondations sont subdivisés en écoulement de surface et en écoulement souterrain. L'écoulement de surface ou le ruissellement de l'eau se produit lorsque l'excès d'eaux pluviales, d'eaux de fonte ou d'autres sources s'écoulent à la surface de la Terre. L'écoulement souterrain ou hypodermique inclue la contribution des horizons superficiels partiellement ou totalement saturés d'eau ou des aquifères perchés temporairement au-dessus des horizons argileux. Il y a aussi l'écoulement de l'eau dû à la fonte de la neige.



Activités éducatives (exercices et études de cas)

- À partir des informations de base présentées dans le cours et d'autres questions tirées de la littérature, rédigez un résumé analytique par groupes de 4-5.
- Sur le fonctionnement du cycle hydrologique, les différents types de stocks d'eau et leur utilisation.
- Analysez l'impact du changement climatique sur le cycle hydrologique.
- Quel est le rôle des forêts dans la régulation du cycle hydrologique ?
- Préparez et présentez une étude de cas sur la délimitation et la description des caractéristiques morphologiques d'un bassin versant en Afrique.

5.5 Description des écosystèmes



Objectif

A la fin de la session, l'apprenant sera en mesure de

- Décrire les écosystèmes terrestres et aquatiques.

5.5.1 Écosystèmes terrestres

Les écosystèmes terrestres comprennent la forêt tropicale dense, la savane, la steppe, les forêts denses sèches, les forêts semi-humides et les forêts galeries. Les écosystèmes terrestres sont formés par des espèces animales et végétales qui interagissent avec leur environnement physique et chimique. Il n'est pas facile de donner des contours précis de ces différentes unités. Les subdivisions sont souvent faites sur la base d'associations de plantes mais aussi de composantes animales (M'Bongo, 1996).

La forêt tropicale. En Afrique, par exemple, la forêt tropicale dense fait partie intégrante du bassin du Congo, le plus diversifié en espèces animales et végétales de toute l'Afrique. Cet écosystème est considéré comme l'un des « points chauds » de la biodiversité mondiale.

Les savanes. La principale caractéristique de cet écosystème est la présence d'une strate herbacée. En raison de son étendue et de ses caractéristiques qui diffèrent, dans plusieurs régions d'Afrique, elle abrite une faune riche et variée.

Les steppes. Cet écosystème correspond à la zone soudano-sahélienne. Les steppes sont caractérisées essentiellement par la disparition des espèces communes à la savane. C'est une zone de prédilection pour les grands mammifères, les oiseaux et les reptiles.

Les **forêts décidues.** Elles se trouvent à la fois dans le domaine médio-soudanien et dans le domaine soudano-sahélien- et sont formées de plusieurs « volets » forestiers. Cet écosystème contient les mêmes espèces animales que les savanes.

Les Forêts semi-décidues et forêts galeries. Ces deux écosystèmes ont de nombreuses caractéristiques similaires. Les forêts denses semi-humides sont courantes dans les régions soudano-guinéennes. Les forêts galeries se trouvent principalement le long des rivières. La forêt dense semi-humide constitue la zone de transition entre la forêt dense humide et la forêt dense sèche. Ce qui permet ainsi d'abriter une richesse biologique remarquable. On y trouve à la fois des espèces de forêt et de savane.

5.5.2 Écosystèmes aquatiques

Les écosystèmes aquatiques sont composés d'écosystèmes marins (océans, mers), d'écosystèmes lotiques (rivières, fleuves) et d'écosystèmes lenticques (lacs, étangs).

Écosystèmes aquatiques marins. Ces écosystèmes sont très divers. Comme pour les lacs, l'exposition de la surface au rayonnement solaire entraîne une zonation verticale de la masse d'eau. On peut la distinguer jusqu'à 200 mètres (eau claire) dans une zone photique (ou système phytal) dans laquelle la photosynthèse est possible, et dans une zone aphotique (ou aphytale). De même, une stratification thermique de la colonne d'eau séparant successivement la zone superficielle, la zone thermocline et la zone profonde est observée²⁵.

Les écosystèmes lotiques sont caractérisés par des eaux courantes, la plupart du temps permanentes. Ils correspondent à des torrents, des rivières et des ruisseaux. Dans le même système lotique, l'on distingue trois zones écologiques : le créneau ou zone des sources, le rhithron ou fleuve supérieur, le

25 Les écosystèmes aquatiques : http://www.eau-seine-normandie.fr/fileadmin/mediatheque/Enseignant/Outils_Pedagogiques/Profes

plus proche des sources, et le potamon qui comprend les cours moyen et inférieur, une partie des cours d'eau de basse altitude.

Les écosystèmes lentiques présentent de l'eau stagnante emprisonnée dans les dépressions du sol. Les lacs sont généralement permanents et donc régulièrement renouvelés. Leur profondeur va de quelques mètres à plus de 1500 m. Plus ou moins étendus ou profonds, leur origine est diverse (lacs de fossé d'effondrement, lacs volcaniques, lacs d'origine glaciaire, lacs fluviaux).

Les étangs sont souvent des couches d'eau superficielles dont la surface et la profondeur sont limitées. Le bilan hydrique des systèmes lentiques dépend de la taille de la masse d'eau initialement stockée, des apports externes (précipitations, ruissellement, eaux souterraines), des pertes par évaporation et par infiltration. Les lacs et les étangs de barrage sont des plans d'eau d'origine humaine dont la profondeur et le renouvellement sont contrôlés.

Activités éducatives (exercices et études de cas)

Sur la base des informations de base présentées dans le cours et dans d'autres documents, préparez en groupe de 4-5 une fiche technique facultative sur les écosystèmes terrestres ou aquatiques.

5.6 L'organisation de l'écosystème



Objectifs

A la fin de la session, l'apprenant sera en mesure de

Décrire la composition, la structure et le niveau d'organisation d'un écosystème.

Introduction générale

Un écosystème est un système fonctionnel qui comprend une communauté d'êtres vivants et leur environnement. Il s'agit d'une unité relativement stable et intégrée qui repose sur des organismes photosynthétiques. Un écosystème est considéré comme une sorte d'entité collective, composée d'individus transitoires, dont certains peuvent vivre jusqu'à plusieurs milliers d'années (par exemple les grands arbres), tandis que certains microorganismes ne peuvent vivre que quelques heures, voire quelques minutes²⁶.

Composition

La biocénose est l'ensemble des organismes qui vivent ensemble (zoocénose, phytocénose, microbiocénose, myocénose)²⁷. La phytocénose comprend les arbres, les plantes herbacées et la zoocénose se compose d'animaux. La biocénose est composée de trois catégories d'organismes vivants : les producteurs, les consommateurs et les décomposeurs.

Le biotope (écotope) est le fragment de la biosphère qui fournit à la biocénose l'environnement abiotique nécessaire. Il est également défini comme l'ensemble des facteurs écologiques abiotiques (substrat, sol, climat) qui caractérisent le milieu où vit une biocénose spécifique. Le biotope est défini par les caractéristiques et les qualités de cinq éléments essentiels à la vie : l'eau, le sol, l'air, la lumière, la température²⁸.

Le biotope est caractérisé par un certain nombre de facteurs essentiellement abiotiques (indépendants des êtres vivants), parmi lesquels on distingue des facteurs physiques et d'autres chimiques²⁹. Les facteurs physiques comprennent les facteurs climatiques (précipitations, température, lumière, vent, humidité relative), les facteurs géographiques et les facteurs édaphiques, tandis que la teneur en oxygène, la teneur en minéraux et le pH sont les principaux facteurs chimiques. De plus, certains de ces facteurs sont périodiques (comme la lumière, la température, les précipitations), d'autres ne le sont pas (comme les orages, les cyclones, les incendies, etc.).

Structure

L'écosystème est composé de deux éléments : un biotope et une biocénose.

Taille des écosystèmes. Compte tenu du critère de taille, il existe trois types d'écosystèmes :

- un micro-écosystème : par exemple, une souche d'arbre ;
- un méso-écosystème : par exemple, une forêt ou une prairie
- un macro-écosystème : océan, savane, désert, etc. Si nous considérons les biocénoses, nous avons:
- La synusie qui correspond au micro-écosystème : biocénose temporaire et indépendante ;
- La communauté qui correspond au méso-écosystème : c'est une biocénose durable et autonome ; et

26 Notion d'écosystème (cours) : http://www.uvt.rnu.tn/resources-uvt/cours/ecosystemes/lecon1/co/Contenu_04.html

27 Cours d'écologie générale de l'université Badji Mokhtar Annaba, plate forme Elerning: Site : <http://elearning.univ-annaba.dz/course/view.php?id=330>

28 Cours d'écologie générale de l'université Badji Mokhtar Annaba, plate forme Elerning : Site : <http://elearning.univ-annaba.dz/course/view.php?id=330>

29 Notion d'écosystème (cours) : http://www.uvt.rnu.tn/resources-uvt/cours/ecosystemes/lecon1/co/Contenu_04.html

- Le biome qui est la communauté d'êtres vivants spécifique à un macro-écosystème.

La productivité est la quantité de matière organique produite par l'écosystème, en relation avec le flux d'énergie, d'eau, d'éléments minéraux, de CO₂, etc.

Une étendue. Dans la nature, les limites de l'écosystème sont difficiles à identifier car il existe un gradient entre deux écosystèmes voisins, d'où un effet de périphérie ou d'écotone. Les écotones sont particulièrement riches en faune dont les espèces ne se mélangent pas.

Les types d'écosystèmes actuels ne sont pas les écosystèmes d'origine car ils ont été modifiés par l'homme, notamment en ce qui concerne la biocénose :

- La biocénose originale : très rare, par exemple les forêts vierges ;
- La biocénose potentielle : une biocénose devient originale ou presque originale, si toute action de l'homme cesse, elle trouverait une espèce d'équilibre ou climax ; et,
- La biocénose réelle : c'est celle qui existe dans son état actuel.

Niveau d'organisation

Le monde vivant est structuré selon des niveaux organisationnels de complexité croissante (molécules, organites, cellules, tissus, organes, individus, populations, communautés)³⁰. Les niveaux utilisés dans les études écologiques sont l'individu, la population et la communauté.

Individu : ce niveau englobe tous les organismes individuels, des organismes unicellulaires aux arbres et aux grands mammifères. À ce niveau, les études sont dites autoécologiques, par opposition à celles des niveaux supérieurs, dites synécologiques.

La population est l'ensemble des individus d'une même espèce, vivant sur une surface donnée. Le développement d'une population et son évolution sont contrôlés par l'environnement.

La communauté est le groupe de populations rassemblées dans un même espace et qui présente une certaine homogénéité par rapport aux critères retenus pour la distinguer. La notion de communauté peut signifier :

- Les populations de plantes qui sont un groupe de plantes ou phytocénose ;
- Les populations animales ou zoocénose ;
- Les micro-organismes du sol ou micro-biocénose ; et
- Elle peut aussi faire référence à tous les organismes ou à la biocénose.

L'environnement dans son sens écologique le plus large est constitué au niveau mondial par la biosphère, qui est définie comme la région de la planète qui contient tous les êtres vivants et dans laquelle la vie est possible en permanence. En effet, toute la surface du globe terrestre n'est pas favorable aux organismes de manière égale. Il y a des régions, comme les calottes glaciaires polaires et les hautes montagnes, où la vie est presque impossible.

La biosphère peut être subdivisée en trois compartiments de types physiques différents :

- la lithosphère : limitée aux couches les plus superficielles de la croûte terrestre. C'est le milieu solide constitué de tous les continents émergents ;
- l'hydrosphère : ou l'océan mondial, c'est un liquide moyen qui couvre les 7/10 de la surface du globe ; et
- l'atmosphère : couche gazeuse homogène qui constitue la zone la plus périphérique de notre planète et qui enveloppe les deux milieux précédents.



Activités éducatives (exercices et études de cas)

En se fondant sur les informations de base présentées dans le cours et dans d'autres documents, préparez en groupe de 4-5 un résumé analytique sur la structure et l'organisation d'un écosystème forestier.

30 Notion d'écosystème (cours) : http://www.uvt.rnu.tn/resources-vt/cours/ecosystemes/lecon1/co/Contenu_04.html

5.7 Fonctionnement de l'écosystème



Objectif

À la fin de la session, l'apprenant sera en mesure de :

Analyser les interactions, la chaîne trophique, la dynamique et la résilience des écosystèmes forestiers

Introduction générale

Un écosystème est un paysage constitué d'une mosaïque de compartiments fixes qui ont chacun leurs propres caractéristiques écologiques, composés de communautés végétales et animales ayant des fonctions spécifiques. Ce paysage répond à une logique dynamique d'ordre temporel. Ces phénomènes induisent des changements dans la dynamique démographique des populations végétales. Ils provoquent également la transformation progressive d'une communauté végétale à une autre, ainsi que des changements dans les conditions microclimatiques et édaphiques³¹.

La compréhension de la typologie et du fonctionnement des écosystèmes forestiers est utile aux techniciens forestiers pour identifier les principaux types d'écosystèmes d'une région naturelle, l'exactitude des données fonctionnelles fondamentales et le potentiel d'espèces exploitables.

Chaîne alimentaire

Un écosystème est une unité intégrée (avec ses diverses composantes abiotiques et biotiques) qui fonctionne, malgré la concurrence des grands organismes pour les ressources. Tout être vivant, même le plus petit (bactéries, champignons, etc.), constitue une source de nourriture pour un autre organisme vivant, c'est ce qu'on appelle la chaîne alimentaire et qui consiste en un transfert de matière et d'énergie d'un niveau trophique à un autre³².

L'énergie solaire est la source essentielle de la matière sur terre. Environ 30 % de l'énergie solaire est immédiatement réfléchi dans l'espace sous forme de lumière et environ 20 % est absorbée par l'atmosphère terrestre. La majeure partie des 50 % restants est absorbée par la terre elle-même et transformée en chaleur.

Les plantes vertes et autres organismes photosynthétiques captent moins de 1 % de l'énergie solaire. Ils transforment cette énergie en énergie chimique, électrique et mécanique utilisée par les mêmes organismes (appelés autotrophes) et par tous les autres êtres vivants, appelés hétérotrophes, assurant ainsi leur nutrition, leur survie et diverses activités. Ce flux d'énergie est l'essence de la vie. L'énergie captée par les plantes vertes est ainsi transférée de façon très organisée à travers les différents niveaux de la chaîne alimentaire avant de se dissiper. La distribution de l'énergie au niveau des producteurs et des consommateurs peut également être schématisée.

31 Dynamique des écosystèmes : <http://www.ecosociosystemes.fr/dynamique.html>

32 Notion d'écosystème (cours) : http://www.uvt.rnu.tn/resources-uvt/cours/ecosystemes/lecon1/co/Contenu_04.html

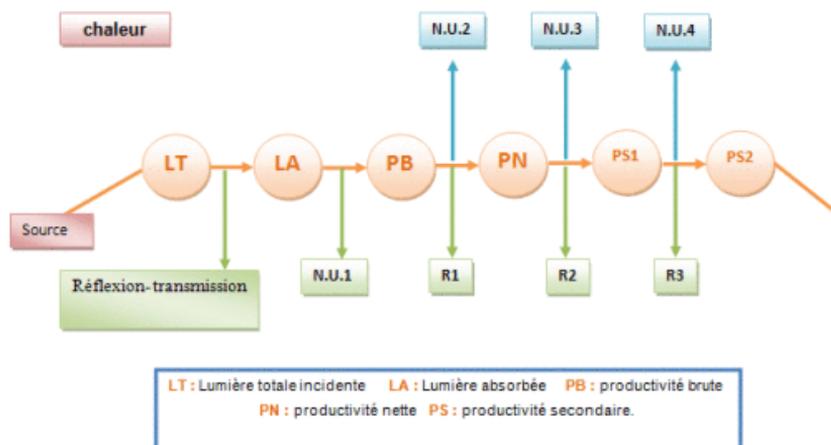


Figure 106. Distribution de l'énergie au niveau du producteur et du consommateur.

Source: http://www.uvt.rnu.tn/resources-uvt/cours/écosystèmes/lecon1/co/Contenu_04.html

Toute l'énergie non utilisée est absorbée par la décomposition ; l'énergie de respiration (R1, R2, R3) sera perdue. La quantité d'énergie disponible diminue donc tout au long de la chaîne alimentaire. La plante n'absorbe que 1 à 5 % de l'énergie reçue. Les herbivores utilisent en moyenne 1 % de l'énergie fixée par la nourriture qu'ils ont consommée : $PS1/PB = 1 \%$. Pour les carnivores, le rendement est plus élevé : $PS2/PS1 = 10 \%$.

Les producteurs sont l'ensemble des plantes chlorophylliennes qui vont fixer l'énergie de la lumière du soleil (photosynthèse). Il y a en moyenne 1 à 5 % de l'énergie solaire qui est captée par les plantes.

Les consommateurs sont tous les végétaux et les animaux qui consomment de la matière organique des producteurs pour obtenir l'énergie nécessaire à leur métabolisme. Cette production d'énergie provient essentiellement de la dégradation oxydative (respiration) de la matière organique (catabolisme). Ensuite, il y a l'édification de la propre matière (organique) de ces consommateurs (anabolisme). Il existe plusieurs catégories de consommateurs selon le régime alimentaire :

- *les herbivores* : ce sont les consommateurs de plantes (par exemple, les cétacés consomment du phytoplancton ; les algues sont consommées par les gastéropodes, les tortues de mer, etc. ; les lichens sont la nourriture des gastéropodes terrestres et des myriapodes ; etc) ; dans le cas des plantes plus grandes, tous les organes peuvent être consommés (herbes et feuilles des arbres par les vertébrés et les insectes, fruits et graines par les oiseaux et autres vertébrés, etc.)
- *saprophages* : consomment des plantes et des animaux morts, leur rôle est de recycler la matière organique avant qu'elle ne soit déminéralisée par les décomposeurs ; il existe plusieurs types de saprophages :
- *Les détritivores* : qui consomment des débris végétaux et animaux ;
- *Les coprophages* : qui se nourrissent des excréments de divers animaux et sont principalement des insectes ;
- *Les nécrophages* : qui se nourrissent de cadavres et sont des oiseaux et des insectes (charognards) ; et
- *Les carnivores* : qui se nourrissent d'autres animaux dont ils vont digérer la matière organique ; ils sont aussi appelés prédateurs et se répartissent en trois catégories :
- *Les prédateurs de premier ordre* : qui mangent les herbivores (chacal, lion, etc.) ;
- *Les prédateurs de deuxième ordre* : qui mangent les prédateurs du premier ordre (serpents, etc.)
- *Les prédateurs de troisième ordre* : (rapaces qui mangent des serpents, etc.).

Il y a donc un transfert d'énergie d'un niveau trophique à un autre :

Photosynthèse → matière organique végétale → matière organique herbivore → matière organique carnivore I → matière organique carnivore II → matière organique carnivore III, etc.

La chaîne trophique ne s'étendra pas indéfiniment. En principe, elle s'arrêtera au niveau du carnivore III car il y a perte d'énergie d'un niveau à l'autre.

Les décomposeurs sont principalement des bactéries et des champignons. Ils se nourrissent de matières organiques mortes (cadavres, litière, etc.). Leur rôle est de décomposer la matière organique ou de la minéraliser (en CO_2 , NH_3 , H_2S , etc.). Ces éléments minéraux seront absorbés par d'autres bactéries : par exemple les bactéries nitrifiantes → nitrates ; bactéries sulfurisantes → sulfates ; etc.

Les nitrates et les sulfates sont mieux assimilés par les plantes. Le processus de décomposition est aussi important que celui de la production dans un écosystème donné. La quantité de matière organique qui retourne au sol dans les écosystèmes terrestres, sous forme de feuilles, de racines ou de bois mort, peut varier de quelques tonnes à quelques dizaines de tonnes par ha chaque année. Un grand nombre d'espèces agissent sur ce matériau pour le recycler, le fractionner, le transformer, le décomposer et le minéraliser. Elle redevient disponible pour les producteurs et utilisable pour la synthèse de nouvelles molécules organiques. En conclusion, les décomposeurs jouent un rôle essentiel dans le cycle biogéochimique.

Dynamique de l'écosystème

La dynamique des écosystèmes forestiers est caractérisée par des cycles qui peuvent être appréhendés à des échelles temporelles et spatiales très différentes. Ainsi, un cycle interglaciaire s'étend sur plusieurs dizaines de milliers d'années et concerne un continent ; il s'observe par la lente relocalisation de la forêt puis sa disparition au profit d'une steppe, d'une toundra ou de glaciers. Les changements de température et, plus généralement, de climat sont le moteur de ces processus³³.

Cycles sylvigénétiques. Une forêt vierge (non exploitée par l'homme) présente des cycles dits sylvigénétiques qui caractérisent la dynamique interne des milieux forestiers. A l'échelle d'une forêt, l'ensemble des semis qui se développent est une unité de régénération. La dynamique est liée à la compétition inter-individuelle (croissance en diamètre et en hauteur, élimination de certains individus, établissement progressif des futurs statuts des arbres : dominant et dominé).

A l'échelle de l'espace vital d'un arbre, de nombreux changements sont observés au cours de sa croissance. Les phénomènes dynamiques (variations de l'humus, tapis d'herbe) sont liés au développement du modèle architectural de l'espèce, contrecarré par les effets de compétition des individus voisins (réitérations multiples).

Quelle que soit l'échelle étudiée, les essences forestières ont un certain nombre d'invariants responsables de logiques dynamiques identiques. Deux de ces invariants sont liés : 1) aux stratégies adaptatives des espèces (et aux groupes fonctionnels d'espèces qui en résultent), et 2) au potentiel des semences.

La dynamique des forêts sauvages. Dans le cas d'une forêt aménagée, la pérennité de l'état boisé est assurée par le forestier qui opère la régénération (naturelle ou artificielle par plantations)³⁴.

Pour étudier cette dynamique cyclique, il faut s'intéresser aux forêts naturelles (peu modifiées par l'homme et conservant donc tous les caractères primitifs) ou sub-naturelles (abandonnées par l'homme depuis longtemps ou peu influencées par lui).

33 Dynamique des écosystèmes : <http://www.ecosociosystemes.fr/dynamique.html>

34 Dynamique des écosystèmes : <http://www.ecosociosystemes.fr/dynamique.html>

Les forêts tropicales ou équatoriales (forêts primaires non détruites par opposition aux forêts secondaires reconstituées après déforestation) sont le siège d'un processus fondamental : la régénération ; toute surface boisée est soumise à deux phases qui s'alternent dans la discontinuité de l'espace et du temps :

- *La phase de croissance* avec prédominance de phénomènes lents (croissance, maturation, vieillissement sans changements significatifs dans l'écosystème) ; et,
- *La phase de court rajeunissement* qui commence par une rupture plus ou moins brutale, comme un chablis ou simplement la mort d'un arbre, créant ainsi un vide.

Selon la taille de la trouée, l'état préexistant, les espèces présentes (à l'état adulte, recrue végétative, potentiel de graines), le peuplement du futur sera reconstitué par cicatrisation avec les arbres proches de la trouée, de la recrue (germination des graines présentes dans le sol ou apportées).

Une ouverture du peuplement favorise la pénétration du rayonnement solaire qui contribue au renouvellement de la forêt, à sa régénération en favorisant la colonisation par les semis.

Pendant cette phase de réorganisation, les éléments qui s'installent ralentissent ou sélectionnent l'arrivée de nouveaux occupants par des inhibitions ou des facilités physiques ou biologiques. La voûte se referme, guérit et un nouveau cycle recommence.

L'ouverture de la fente entraîne un traumatisme temporaire ; l'évolution du peuplement qui en résulte dépend de sa taille et du moment de la perturbation. Une petite ouverture qui correspond à un arbre mourant et à un chablis de quelques hectares n'aura pas les mêmes effets. Les résultats seront différents selon que la fente a produit à un moment de fructification ou qu'il est en avance ou en retard. Elle provoque des changements brusques des conditions écologiques, avec des différences marquées selon les caractéristiques stationnaires (modification du microclimat, de l'humus, du sol lors du déracinement des arbres, de la végétation herbacée).

Résilience des écosystèmes face au changement climatique

Définition

En écologie, la résilience est la capacité d'un système dynamique à redéfinir sa structure et à retrouver une nouvelle stabilité ou un nouvel équilibre après avoir été affecté par un choc externe (Gunderson, 2000). La résilience des forêts représente donc leur capacité à se remettre de perturbations majeures. Il s'agit d'une propriété émergente d'un écosystème qui résulte de la biodiversité à de multiples niveaux, allant de la génétique à la diversité des paysages (Thompson et al., 2009). La résistance est liée au concept de résilience et représente la capacité d'une forêt à résister à des perturbations mineures au fil du temps, par exemple la mort de quelques arbres ou un niveau chronique d'herbivorie due aux insectes (Thompson, 2011). Dans la plupart des perturbations naturelles, les forêts conservent leur résilience au fil du temps. Pour pouvoir fournir les biens et services que les hommes tirent des forêts, les écosystèmes forestiers doivent pouvoir se remettre des perturbations et ne pas se dégrader avec le temps.

Les forêts peuvent également être résistantes à certains changements environnementaux, par exemple dans les régimes climatiques au fil du temps, en raison de la redondance au sein des espèces ayant des rôles fonctionnels (la redondance signifie la superposition ou la duplication des fonctions assumées écologiquement par un groupe d'espèces) (Díaz et Cabido, 2001). Les écosystèmes peuvent être très résistants mais pas à une perturbation donnée. En général, la plupart des forêts naturelles, en particulier les forêts primaires anciennes, sont à la fois résilientes et résistantes à divers types de changements.

Résilience face au changement climatique

La perte de résilience des forêts peut être causée par la perte de groupes fonctionnels résultant de changements environnementaux tels que les changements climatiques à grande échelle, une mauvaise gestion des forêts ou une modification suffisamment importante ou continue des régimes de perturbations

naturelles (Folke et al., 2004).

Le changement climatique mondial est la source la plus importante d'impact sur les écosystèmes forestiers. Le climat a une influence descriptive sur les rythmes de respiration et de production des forêts ainsi que sur d'autres processus, opérant par le biais de la température, du forçage radiatif atmosphérique et des régimes hydriques à moyen et long terme³⁵. Le climat et les conditions météorologiques influencent également les processus à court terme dans les forêts, tels que les incendies, l'herbivorie et la migration des espèces. Le changement climatique aura un effet néfaste sur les écosystèmes forestiers car il peut entraîner un dépassement de la tolérance physiologique de certaines espèces et une altération de nombreux processus biophysiques forestiers. La plupart des études scientifiques montrent que de nombreuses forêts tropicales ne seront pas résilientes au changement climatique à long terme si la tendance actuelle et prévue de diminution des précipitations et d'augmentation de la sécheresse se poursuit (Betts, Sanderson, Woodward 2008, Malhi et al., 2008).

L'état d'un écosystème est défini par sa composition botanique dominante et la structure prévue du peuplement. Le changement d'état de la forêt résulte d'une perte de résilience, entraînant une transition partielle ou complète vers un type d'écosystème différent de celui auquel on pourrait s'attendre dans la zone considérée. Ce changement de statut entraîne une réduction des biens et services fournis par un écosystème forestier. Par conséquent, le changement d'état d'un écosystème peut être retenu comme indicateur de la dégradation. Par exemple, si l'on dit qu'une forêt est mixte, mais qu'elle est dominée par un très petit nombre d'espèces, ou si l'on s'attend à ce qu'elle ait un couvert forestier dense et que l'on fait face à une forêt couverte ou une savane, c'est qu'il y a eu un changement d'état. Ces changements d'état entraînent la dégradation de la biodiversité et du niveau de production des biens et services des écosystèmes forestiers (Thompson, 2011).

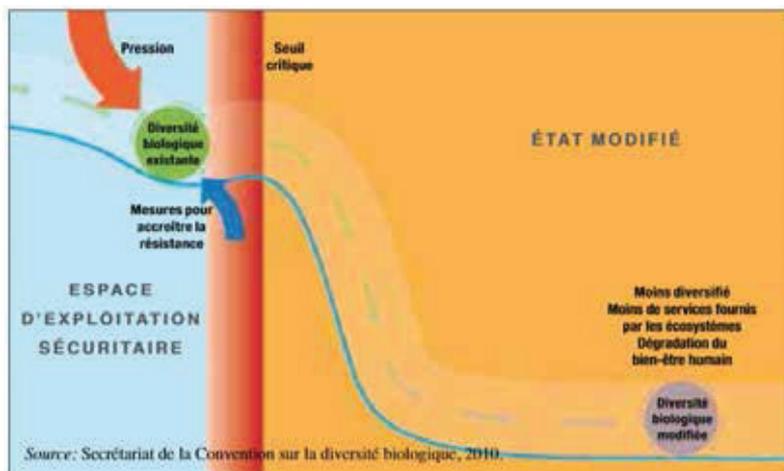


Figure 107. Illustration des points de basculement, ou seuils des écosystèmes

Activités éducatives (exercices et études de cas)

A partir des informations de base présentées dans le cours et d'autres points dans la littérature, préparez en groupe de 4-5 un résumé analytique sur la dynamique et la résilience des écosystèmes forestiers.

35 Biodiversité, seuils de tolérance des écosystèmes résilience et dégradation des forêts. <http://www.fao.org/3/a-i2560f/i2560f05.pdf>

5.8 L'homme et l'écosystème



Objectifs

A la fin de la session, l'apprenant sera en mesure de

- 1 Identifier les biens et services offerts par les écosystèmes forestiers, et ;
- 2 Évaluer les menaces qui pèsent sur ces derniers et les opportunités à saisir pour les apprenants.

Introduction générale

Dans un état stable, la biodiversité d'une forêt tropicale peut produire une série de biens et de services représentant une valeur pour les humains. La perte de biodiversité est susceptible d'avoir des impacts négatifs importants sur la capacité de production des forêts (Thompson et al., 2009 ; Bridgeland et al., 2010 ; Cardinale et al., 2011). Ainsi, dans la mesure où la dégradation des forêts peut être définie comme la perte de leur capacité à produire les biens et services attendus (FAO, 2009), la perte de biodiversité est un critère majeur pour mesurer cette dégradation. La conservation de la biodiversité est donc une pierre angulaire de la GDF (Processus de Montréal, 2009) et un facteur clé pour le maintien du fonctionnement des écosystèmes forestiers (Thompson, 2011).

La maîtrise des principes écologiques et des modes de conservation de la biodiversité est essentielle pour une gestion durable des écosystèmes forestiers. Le Paiement des Services Environnementaux (PSE) fait partie de ces nouvelles approches qui favorisent les externalités environnementales positives par le transfert de ressources financières entre les bénéficiaires de services et leurs fournisseurs. L'utilisation des systèmes de PSE pour la conservation des bassins hydrographiques, de la biodiversité et de la beauté des paysages et pour la séquestration du carbone a été de plus en plus favorisée ces dernières années.

Il est essentiel de comprendre les diverses limites et questions qui entourent les méthodes d'évaluation de la valeur des biens et services pour concevoir un système de PSE et réduire les pressions anthropiques sur les écosystèmes forestiers. Les changements naturels de l'environnement peuvent, dans certains cas, avoir un effet néfaste sur les écosystèmes. Au cours des derniers siècles, la population humaine a augmenté de plus en plus rapidement ; aujourd'hui, plus de 7 milliards de personnes vivent sur la terre. D'ici 2050, ce chiffre devrait atteindre 9 milliards (FNE, 2008). Dans le monde entier, l'explosion démographique joue un rôle majeur dans les changements environnementaux, sous de nombreux aspects et à une échelle difficile à définir avec précision (FNE, 2008).

Les actions humaines développées depuis des millénaires marquent profondément leurs impacts sur les paysages actuels et sont donc responsables de la diversification des trajectoires dynamiques observées (FNE, 2008). Dans de nombreuses régions, les paysages ont été transformés. La mise en œuvre de systèmes de PSE peut contribuer à un changement de comportements en faveur d'une utilisation durable des ressources naturelles.

Services de l'écosystème

Les produits. L'un des défis de la conception des systèmes de PSE est de transformer les services fournis par les écosystèmes en « produits » qui peuvent être vendus aux bénéficiaires. Cela nécessite des données précises sur la nature du marché, la structure de la demande et la valeur des services pour les bénéficiaires (Unifera, 2004).

Les systèmes de PSE se concentrent sur les services environnementaux qui font déjà, ou pourraient faire l'objet d'une demande dans les bonnes conditions. Les systèmes de PSE sont axés sur les services

fournis par la conservation des forêts, le reboisement et la GDF, et certaines pratiques agroforestières ou sylvopastorales. Les services disponibles sont divisés en quatre catégories : la séquestration du carbone, la conservation de la biodiversité, la beauté des paysages et les services hydrographiques (Unifera, 2004).

Les services de **séquestration du carbone** sont inclus dans de multiples transactions commerciales à travers le monde et dans plusieurs systèmes de PSE. La séquestration du carbone se produit lorsque les arbres ou autres plantes absorbent le carbone de l'atmosphère pendant leur croissance. Inversement, la destruction des forêts entraîne à nouveau la libération de carbone dans l'atmosphère. La séquestration du carbone peut donc impliquer deux types de services : l'absorption active par le reboisement ou la réduction des émissions par la conservation du couvert forestier (Unifera, 2004).

La conservation de la biodiversité. Les systèmes de PSE impliquent souvent des services liés à la biodiversité. Il est donc possible de la mesurer par les écosystèmes, les espèces et la diversité génétique. Les services biologiques qui peuvent être fournis dans le cadre des systèmes de PSE comprennent la protection des écosystèmes, des habitats naturels, des espèces et des ressources génétiques et leur valorisation. La protection de la biodiversité vise notamment à assurer son utilisation durable à des fins scientifiques et pharmaceutiques (Unifera, 2004).

La beauté des paysages. Les services liés à la beauté des paysages sont principalement associés à la valeur esthétique ou culturelle donnée à certains sites naturels. Il s'agit notamment de la protection des sites du patrimoine naturel, des récifs coralliens, des sanctuaires culturels ou même des moyens de subsistance traditionnels dans le cadre d'une approche unifiée de protection des zones culturelles et environnementales. Toutefois, peu de systèmes de PSE utilisent ces services car ils sont difficiles à quantifier et à évaluer en raison de leur fondement culturel. Néanmoins, ils sont de plus en plus courants dans les systèmes de PSE, compte tenu de la sensibilisation accrue à la culture et du développement de l'industrie touristique mondiale (Unifera, 2004).

Les services hydrographiques. De nombreux systèmes de PSE ciblent des services hydrographiques qui sont :

- La régulation du débit des eaux, leur maintien par temps sec et la régularisation des crues ;
- La gestion de la qualité de l'eau : régulation des charges solides, nutritives (p. ex., phosphore et azote) et chimiques, et de la salinité ;

Le contrôle de l'érosion et de la sédimentation ;

- La réduction de la salinisation des sols et la régulation des eaux souterraines ; et
- La gestion des habitats aquatiques (par exemple, maintenir la température de l'eau, créer de l'ombrage au-dessus des rivières et des ruisseaux, s'assurer qu'il y a suffisamment de débris ligneux dans l'eau).

Les services fournis par les écosystèmes forestiers aux bassins versants dépendent d'un certain nombre de facteurs spécifiques au site, notamment les terres, la composition du sol, les essences d'arbres, la végétation, le climat et les régimes de gestion existants. En outre, les bassins versants sont parfois soumis à des fluctuations saisonnières, annuelles et pluriannuelles qui rendent pratiquement impossible la prévision et la quantification de la prestation de niveaux spécifiques de services liés à l'eau à un moment donné.

Valeur économique des services écosystémiques

Par définition, les externalités environnementales négatives et positives ne sont pas incluses dans le prix des produits et services vendus sur le marché. Certains marchés ne favorisent donc pas la conservation ou la prévention de la pollution par des indications de prix ou d'autres incitations économiques. Il en résulte généralement une destruction progressive du capital naturel ou des niveaux de pollution inacceptables. Dans le passé, pour régler ce problème, la méthode obligatoire était l'adoption de lois et règlements sur la protection de l'environnement, les émissions de polluants, la santé humaine et l'utilisation des terres (Unisfera, 2004).

Toutefois, l'évolution des régimes environnementaux a permis de préconiser des instruments économiques fondés sur le marché visant à internaliser les externalités environnementales par le biais d'indications de prix et de systèmes d'incitations, qui comprennent des subventions, des politiques fiscales, la création de marchés pour les émissions polluantes et de nombreux autres outils (Commission de coopération environnementale, 2003).

Les systèmes de PSE sont uniques mais ont une structure commune, qui est illustrée dans la figure suivante :

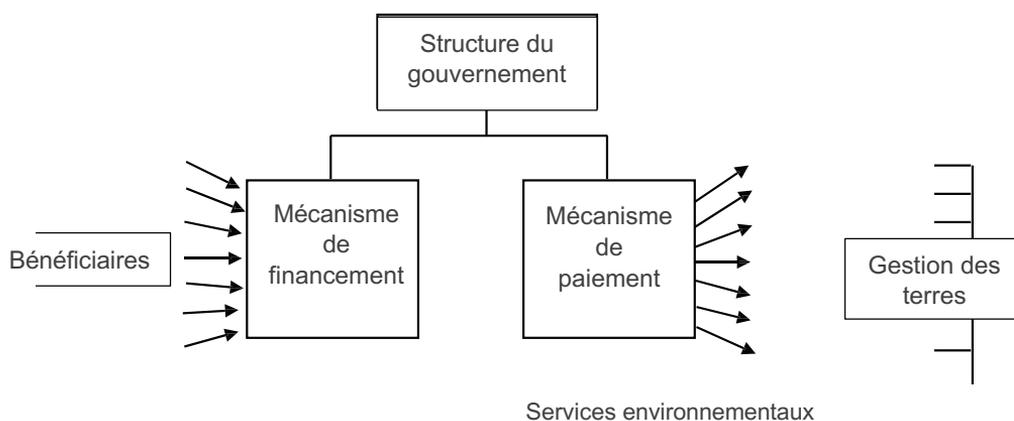


Figure 108. Structure des mécanismes de PSE.

Source : S. Pagiola, Banque Mondiale (2003) cité par Unisfera (2004)

Les bénéficiaires peuvent être locaux (par exemple, les utilisateurs d'eau dans le bassin versant en aval), nationaux (autorités publiques, ONG ou associations professionnelles) ou internationaux. Ils peuvent également inclure des bénéficiaires locaux, nationaux et internationaux. La nature, le nombre et la provenance des bénéficiaires sont directement liés à la nature des services environnementaux générés dans le cadre du système de PSE. Si les bénéficiaires sont peu nombreux et bien organisés, les coûts de transaction seront réduits (Unisfera, 2004).

Les méthodes de détermination de la valeur économique des services écosystémiques sont présentées dans la figure suivante :

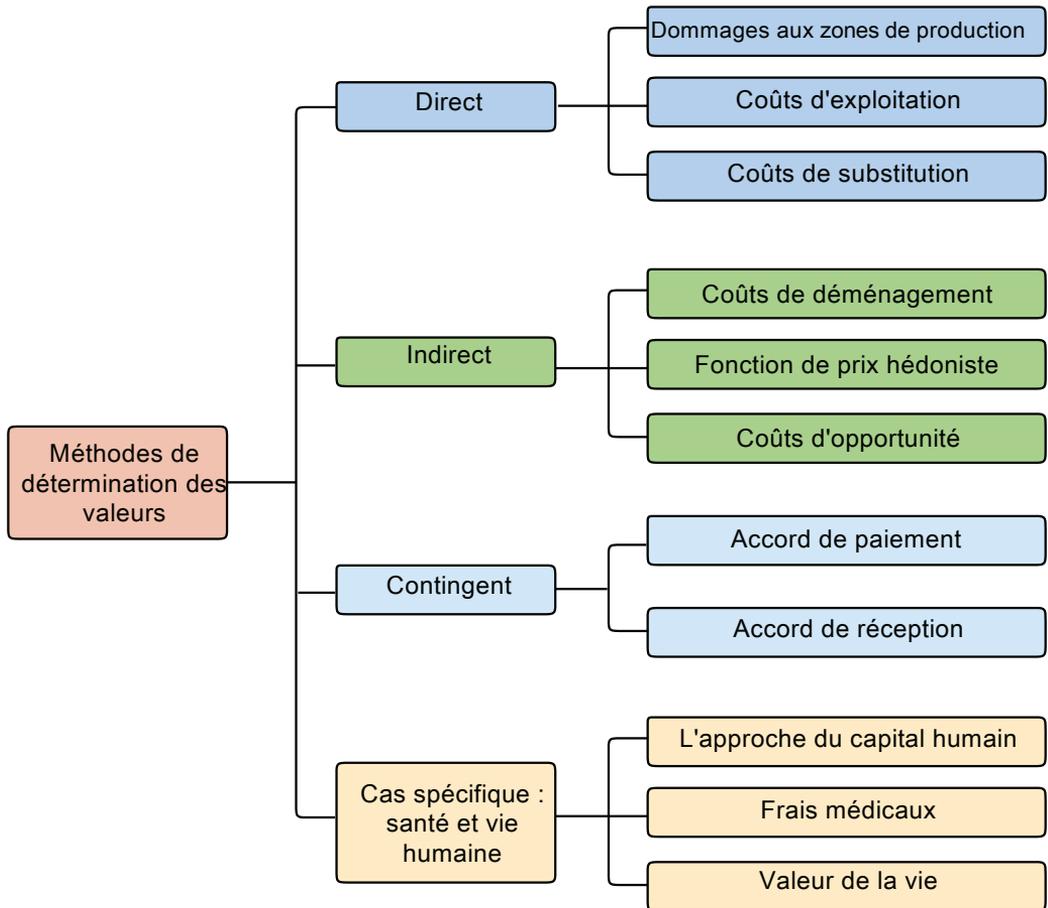


Figure 109. Méthodes économiques de détermination de la valeur

Il est également nécessaire de concevoir un mécanisme de compensation qui distribue l'argent aux utilisateurs des terres. En théorie, ces paiements doivent couvrir le coût des efforts de conservation et le coût de la renonciation à certaines utilisations des terres. Il faut donc trouver un équilibre entre le paiement maximum que les bénéficiaires sont prêts à payer et le paiement minimum qui assurera la prestation des services par les utilisateurs des terres (Unisfera, 2004).

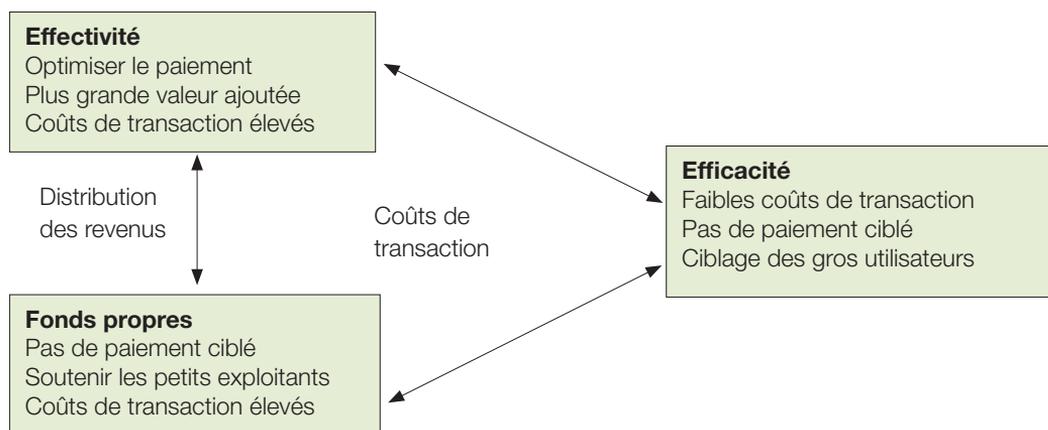


Figure 110. Les relations d'interdépendance dans les systèmes de PSE.

Source : Unisféra (2004)

Valeur de l'écosystème

La plupart des biens et services fournis par les écosystèmes ne sont pas échangés sur les marchés et leur valeur économique n'est pas reflétée dans les prix du marché. La seule façon de leur attribuer des valeurs monétaires est d'utiliser des méthodes d'évaluation non marchandes. Sans ces estimations, ces ressources pourraient être implicitement sous-évaluées et les décisions relatives à leur utilisation pourraient ne pas refléter avec exactitude leur juste valeur pour la société. Les services peuvent être classés en quatre catégories (EM, 2005a) : les services d'approvisionnement, les services de réglementation, les services culturels et les services d'assistance.

Les services d'approvisionnement. La fonction générale des services d'achat est de fournir un approvisionnement en biens et produits directement obtenus de l'écosystème et au profit des humains. Ces services comprennent, par exemple, la fourniture d'eau douce, de denrées alimentaires et de produits pharmaceutiques.

Les services de régulation d'un écosystème ont pour fonction générale de réguler l'environnement par le biais de cycles ou d'agents de régulation (EM, 2005a). Par exemple, la régulation peut se faire au niveau du climat, de la propagation de maladies ou de la pollinisation (où les abeilles sont reconnues comme de très bons pollinisateurs). En ce qui concerne la régulation de l'eau, il est reconnu qu'un marais, étant une terre humide, a une très bonne capacité de rétention d'eau, ce qui régule les niveaux d'eau dans le milieu environnant (Ducks Unlimited Canada, 2004). Ce stockage réduit considérablement les risques d'inondation et d'érosion, en particulier au bord d'un lac. En corollaire, cette capacité de rétention d'eau contribue au bien-être en réduisant les coûts des dommages causés aux bâtiments par les inondations potentielles. Ce service a une valeur monétaire non estimable (Massicotte, 2012).

Les services culturels. La fonction générale des services culturels est d'offrir des avantages non matériels qui satisfont l'esprit humain (EM, 2005a). Ce type de service comprend les valeurs spirituelles et religieuses, l'inspiration et l'appréciation esthétique d'un paysage, et le patrimoine culturel. Un service qui illustre cette catégorie est la valeur culturelle associée à un écosystème particulier (par exemple, les forêts sacrées d'une communauté).

Les services d'assistance. Cette catégorie de services est la base de l'exploitation de tous les biens et services écologiques. Elle englobe les services générés par les trois premières catégories (EM, 2005a). Le tableau suivant donne des exemples de services associés à la valeur écosystémique de chaque catégorie.

Tableau 11. Catégories de biens et services des écosystèmes.

Source : Massicotte (2012)

Services d'approvisionnement	Services de réglementation	Services culturels	Services d'assistance
Nourriture	Régulation du climat, de l'eau et de l'érosion	Diversité environnementale et patrimoine culturel	Formation du sol
Eau douce	Purification de l'air et de l'eau	Valeurs éducatives et spirituelles	Cycle de l'eau
Fibre ligneuse	Séquestration du carbone	Appréciation esthétique	Cycles des nutriments
Carburants	Réglementation des maladies et des ravageurs	Sentiment d'appartenance	Matières premières
Ressources génétiques, biochimiques et médicales	Pollinisation	Récrétourisme	Photosynthèse

Pressions humaines

L'Afrique subsaharienne s'urbanise rapidement et devrait avoir le taux d'urbanisation le plus élevé au monde depuis de nombreuses décennies (FNUAP 2007).

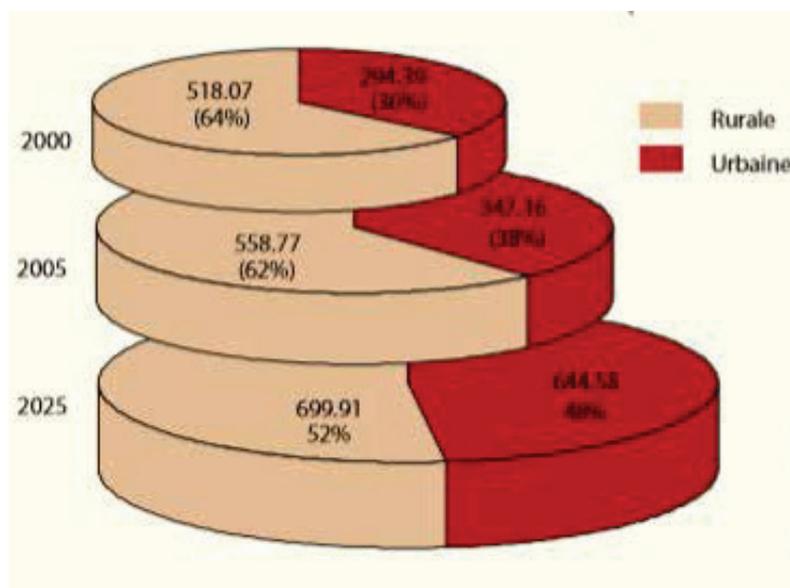


Figure 111. Tendances des taux d'urbanisation en Afrique.

Source: PNUE (2008)

Le phénomène d'expansion urbaine va générer des besoins de plus en plus importants, notamment en termes de terres agricoles, pour assurer la sécurité alimentaire. La satisfaction des besoins alimentaires des populations urbaines impliquera un déclin des autres types de couverture terrestre, et la réduction ou l'élimination des habitats et des ressources naturelles (PNUE, 2008). Dans certains cas, la pression humaine croissante sur les ressources naturelles cause de graves dommages, par exemple la disparition de la forêt tropicale humide d'Afrique de l'Ouest et des biens et services connexes a contribué à l'agitation sociale et à la pauvreté (Gibbs 2006). L'exploitation forestière illégale ou les mauvaises pratiques d'exploitation sont souvent à l'origine de la dégradation des forêts en Afrique. Cependant, les forêts peuvent aussi être dégradées pour d'autres raisons. La télédétection est un outil efficace pour évaluer les changements d'état dans un écosystème forestier.



Activités éducatives (exercices et études de cas)

En utilisant les informations de base présentées dans le cours et dans d'autres documents, préparez en groupe de 4-5 une étude de cas sur l'exploration des indicateurs et des méthodes pour évaluer la qualité d'un écosystème forestier et de ses biens et services.

5.9 Outils et méthodes de caractérisation des écosystèmes



Objectifs

A la fin de la session, l'apprenant sera en mesure de

- 1 Décrire les méthodes d'enquête phytosociologique, l'inventaire de la biodiversité forestière ;
- 2 Déterminer l'importance de la télédétection et des SIG dans la spatialisation ; et
- 3 Analyser l'information sur la dynamique des ressources forestières.

5.9.1 Télédétection et systèmes d'information géographique (SIG)

Il est important de recueillir des données dans des zones choisies objectivement afin de déterminer la disposition spatiale et la dynamique des composantes de l'écosystème. Pour les indicateurs quantitatifs (par exemple les zones d'occupation et leur évolution), qualitatifs (par exemple l'état de santé) ou socio-économiques (par exemple les ressources exploitées, les infrastructures, le type d'utilisation des terres), il est fondamental de spatialiser l'information de manière à pouvoir localiser précisément la distribution des espèces, la fragmentation des milieux et le type de forêt, en les situant dans le contexte de leur environnement physique et biologique (Poso et al., 1995).

Il est également essentiel que les informations disponibles sur la biodiversité soient stockées dans des bases de données géo-référencées si l'on veut qu'elles soient rapidement mobilisées à des fins de cartographie, d'analyse ou de modélisation. Pour être utilisées efficacement, ces informations devraient également être intégrées à d'autres données sur l'environnement, les conditions socio-économiques, les types de ressources naturelles et les risques potentiels de dégradation. La télédétection et les SIG sont des éléments clés pour intégrer l'information à la résolution et aux échelles d'analyse spatiale souhaitées (Jeffers, 1996).

5.9.2 Inventaire forestier

En général, on distingue deux grands types d'inventaires forestiers : les inventaires d'aménagement et les inventaires nationaux ou régionaux.

Inventaires d'aménagement

La gestion durable de la biodiversité au niveau des peuplements forestiers ou des unités paysagères (Omer, 1992) ou à l'échelle des unités forestières d'aménagement (parcelles de quelques ha à quelques dizaines d'ha) nécessite la prise en compte à intervalles réguliers d'un certain nombre d'éléments clés (Rondeux, 2002) :

- la couverture, les diamètres, les hauteurs et les caractéristiques de tous les arbres au-dessus d'un diamètre prédéterminé pour préciser la structure du peuplement ;
- l'indice de fertilité des peuplements par rapport aux conditions stationnaires ;
- les caractéristiques topographiques ;
- les sols et le substrat géologique du peuplement, y compris la nature et la profondeur des horizons humifères ;

- la végétation au sol, en particulier toute espèce rare ou inhabituelle (la présence de champignons, de bryophytes, de lichens, etc. est également opportune) ;
- la présence et l'importance de la régénération (semis ou arbres qui n'ont pas encore atteint un diamètre donné) ;
- la nature et la quantité de tout bois mort sur le sol ou sur pied et/ou en décomposition dans le peuplement ;
- l'influence humaine et l'histoire de la colonisation (culture, droits d'utilisation, éclaircissement, coupe, chasse) ; et,
- les écotones remarquables et les espèces particulièrement associées aux écosystèmes en contact (interface forêt-agriculture, forêt-champ ouvert).

Inventaires forestiers nationaux/régionaux

L'objectif des inventaires forestiers nationaux est de fournir les données suivantes :

- les superficies occupées par la forêt : réparties par propriétaires, par types de peuplements, par groupes d'âge, par espèces
- les caractéristiques dendrométriques des peuplements : nombre de tiges, surface du sol, volumes (selon les différentes coupes, hauteurs ou qualités), niveaux de productivité, composition des peuplements ; et
- les qualités et les formes des arbres, les classifications de la taille du marché, etc.

La plupart des inventaires forestiers nationaux réalisés sur la base d'un échantillonnage systématique et parfois multiphase (combinant mesures et observations de terrain avec analyse de photos aériennes et/ou d'images satellites) et à partir de placettes permanentes (Poso et al., 1995) doivent fournir des informations sur la production de bois et la disponibilité des forêts ; ils contiennent donc a priori peu de données sur la biodisponibilité des forêts (Rondeux, 2002).

Les missions d'inventaire forestier devraient inclure des informations liées aux fonctions de la forêt et non exclusivement orientées vers la production de bois (Lund, 1986). Si plusieurs variables environnementales sont déjà présentes dans ces types d'inventaire, certaines peuvent être partiellement ou totalement déduites ; d'autres nécessitent une récolte spécifique, voire l'utilisation de méthodologies adaptées (Lund, 1993).

5.9.3 Inventaire de la biodiversité

L'inventaire de la biodiversité est une liste des espèces animales et végétales présentes sur un site donné. Il permet de connaître le patrimoine naturel d'un territoire, d'orienter ou d'affiner les projets de développement local. Les objectifs d'un inventaire de la biodiversité sont les suivants :

- réaliser un inventaire de la biodiversité (faune, flore et milieux) afin d'identifier les enjeux majeurs liés à la biodiversité remarquable et ordinaire et d'améliorer sa connaissance ;

sensibiliser et mobiliser les représentants élus, les agents techniques et les citoyens pour conserver ou restaurer la faune et la flore du territoire ;

- initier des actions concrètes pour la prise en compte de la biodiversité sur le territoire et la valorisation de cette biodiversité ; et
- aider les communautés à intégrer les enjeux de la biodiversité dans la gestion de leurs territoires.

5.9.4 Description phytosociologique

Une description phytosociologique contient des informations variées sur la communauté végétale existante et son contexte (Loic, 2015) : la composition floristique, la structure de la végétation, l'abondance des différents taxons au sein de la végétation étudiée, la physionomie et le périmètre de l'inventaire, etc.

Concrètement, elle est produite par une liste de taxons (quantifiés) et par une série d'informations synthétiques permettant de déterminer les conditions de réalisation de l'énoncé. Afin de pouvoir être comparée avec d'autres enquêtes et ainsi contribuer à l'amélioration des connaissances, l'enquête doit comporter un minimum d'informations (nom et prénoms des observateurs, date, lieu, nom de l'espèce).



Activités éducatives (exercices et études de cas)

- En se basant sur les informations présentées dans le cours et sur d'autres documents, préparez une étude de cas de 4-5 ans sur l'importance des SIG dans les inventaires forestiers.
- Participez à un recensement phytosociologique sur un site donné.

5.10 Variabilité structurelle et spatiale des écosystèmes



Objectif

A la fin de la session, l'apprenant sera en mesure de :
Décrire les structures démographiques verticales et horizontales des écosystèmes forestiers.

5.10.1 Structure démographique horizontale

La disposition et la distribution des individus sur le plan horizontal (densité de l'espèce, valeur de la surface terrière et biovolume des individus) ; méthode de recensement des différents individus de l'espèce et mesure des paramètres dendrométriques.

5.10.2 Structure démographique verticale

Niveau maximal de concentration de la masse foliaire (strate), étude de la structure verticale (connaissance des différentes strates, détermination du degré de dégradation de la formation végétale).



Activités éducatives (exercices et études de cas)

En utilisant les informations de base présentées dans le cours et d'autres points dans la littérature, préparez en groupes de 4-5 une fiche technique sur les structures démographiques.

5.11 Phytogéographie



Objectifs

A la fin de la session, l'apprenant sera en mesure de :
Déterminer les zones et districts phytogéographiques.

5.11.1 Domaines phytogéographiques

Région phytogéographique guinéenne

Les forêts guinéennes sont séparées en deux blocs par l'avancée des savanes vers la côte atlantique au Togo et au Bénin : une « Haute Guinée » fluviale (Afrique de l'Ouest) et une « Basse Guinée » (Afrique centrale autour du Golfe de Guinée, White 1979).

Les forêts côtières à feuillage persistant le long de la côte atlantique africaine, de la Sierra Leone à l'ouest du Gabon, bénéficient d'un climat très humide, avec des précipitations annuelles pouvant dépasser 2000 mm. Ces forêts contiennent une flore très riche avec un taux d'endémisme élevé (Aubreville, 1958, 1962 ; Hall & Swaine, 1976, 1981 ; White, 1983 ; Letouzey, 1985 ; Hawthorne, 1995 ; Doumenge et al., 2003).

Le domaine de la Basse Guinée a été à son tour subdivisé en deux secteurs phytogéographiques : le secteur du bassin sédimentaire côtier (forêt côtière) et les collines atlantiques (forêts de bivouac) (Letouzey, 1968, 1985 ; Caballé, 1978 ; Doumenge et al., 2001). Ces collines atlantiques forment un archipel bordant le littoral atlantique du Cameroun à la RDC. Les principaux sommets ne dépassent pas 1000 m d'altitude et comprennent : les monts Rumpi, les monts Ngovayang et la région de Campo-Ma'an (Cameroun), les régions du Monte Alèn et du Monte Mitra (Guinée équatoriale), les monts Cristal et les monts Doudou (Gabon), le massif du Chaillu (Gabon et Congo) et la chaîne du Mayombe (du Gabon à la RDC) (Gonmadje, 2010).

Région phytogéographique du Soudan

Cette unité phytogéographique s'étend de la côte du Sénégal au pied des hauts plateaux de l'Ethiopie en une bande longue et relativement étroite (500 à 700 km). La végétation naturelle et semi-naturelle la plus caractéristique est une forêt ouverte, qui peut être subdivisée en plusieurs types distincts. La plupart des arbres soudanais se caractérisent par une grande amplitude écologique et une très large répartition géographique tant en longitude qu'en latitude (Devineau, 1997). Cette zone correspond aux zones climatiques soudanienne et sub-soudanienne. La végétation est une savane de tous les sous-types, de la savane boisée et de la forêt ouverte à la savane herbeuse.

Région phytogéographique sahélienne

Les formations sont principalement des arbustes de steppe, pour la plupart dominés par des épines et soumis à une forte pression pastorale. L'analyse floristique permet de distinguer deux secteurs phytogéographiques : le secteur sahélien strict et le secteur subsahélien. Le secteur sahélien strict est situé au nord du 14ème parallèle dans le climat sahélien avec une pluviométrie inférieure à 600 mm et se caractérise par de nombreuses espèces typiques du Sahara et du Sahel qui sont très rarement rencontrées dans les territoires du sud. Le secteur subsahélien s'étend entre les 13ème et 14ème parallèles avec une pluviométrie comprise entre 600 et 750 mm. C'est la zone où de nombreuses espèces sahéliennes et soudanaises interagissent. L'aspect général de la végétation est dominé par les éléments sahéliens et sahariens³⁶.

36 Situation des ressources génétiques forestières : <http://www.fao.org/docrep/004/ab385f/ab385f03.htm#bm3.1>

5.11.2 Districts phytogéographiques

Les districts phytogéographiques comprennent : les forêts tropicales humides à feuillage persistant, les savanes et les forêts tropicales sèches, les déserts chauds, les forêts sclérophylles, les forêts lauriphyllées, les forêts subtropicales humides à feuilles caduques, les steppes et les déserts froids, la taïga, la toundra. Ces forêts se trouvent dans diverses zones agroécologiques en Afrique.

Zones humides

Les plus grandes zones humides d'Afrique subsaharienne se trouvent en Afrique centrale et occidentale. Les précipitations se produisent pendant plus de neuf mois, avec des totaux dépassant 1 500 mm par an. Les principaux sols sont acides avec de faibles niveaux de fertilité. Un des points clés dans ce domaine est la gestion de la matière organique, car la plupart des nutriments y sont associés et sont donc concentrés dans l'horizon supérieur. Ainsi, lorsqu'elle est cultivée, la matière organique est perdue par oxydation ou érosion, et la fertilité diminue rapidement (FAO, 2003).

Zone subhumide de l'Afrique de l'Ouest et du Centre

En Afrique de l'Ouest, près de la côte, il y a une transition de la forêt tropicale humide à la forêt semi-décidue et une mosaïque de savane et de forêt aux prairies de la savane boisée lorsque la durée de la saison sèche augmente et que les précipitations diminuent. La culture itinérante est courante avec des dispositifs similaires à ceux pratiqués dans les zones humides. Les jachères sont généralement inadéquates pour maintenir la fertilité du sol et les rendements des cultures diminuent, sauf lorsque de nouvelles variétés de cultures plus performantes et plus résistantes sont utilisées.

Terres subhumides supérieures d'Afrique de l'Est

Les grandes zones des hautes terres sont situées à plus de 1 000 m au-dessus du niveau de la mer et plusieurs zones montagneuses ont des altitudes allant de 1 500 à plus de 4 000 m. Les températures dans toute cette région sont relativement basses en raison de l'altitude. Dans les champs situés à plus de 1 500 m, le rendement de la culture peut être limité par les basses températures. Les précipitations sont de 900 à 1 500 mm par an et la durée de la saison de croissance est de six à neuf mois. Les sols (Nitisols, Andosols et certains Ferralsols) ont une fertilité relativement bonne : Les Ferralsols et les Andosols ont une bonne structure et profondeur, les Nitisols ont une forte saturation en bases, et les températures plus basses ralentissent la décomposition de la matière (FAO, 2003).

Les zones subhumides et semi-arides de l'Afrique australe

Les vastes zones allant du sud du Rwanda au Cap de Bonne Espérance sont pour la plupart à des altitudes comprises entre 500 et 1 000 m, et reçoivent des précipitations plus faibles que celles reçues sur les hauts plateaux. Une partie de cette zone est subhumide, mais la plus grande partie est semi-aride.

La végétation naturelle de la zone subhumide va des bois de miombo aux prairies, en passant par les savanes boisées, et devient dominante lorsque le climat devient plus sec. Les sols dominants dans les zones semi-arides sont les Arenosols, avec une faible fertilité naturelle. Lorsque le climat devient plus humide, les Luvisols, Ferralsols et Cambisols dominent, avec une fertilité naturelle légèrement plus élevée mais encore faible. La dégradation par l'érosion et l'épuisement des nutriments est commune à toute la région (FAO, 2003).

La zone soudano-sahélienne

La zone de savane soudanaise est généralement considérée comme semi-aride humide et la zone sahélienne comme semi-aride sèche. Dans ces deux domaines, la disponibilité de l'eau tend à être le facteur critique déterminant les systèmes de production. Dans les parties plus sèches du Sahel, qui s'étendent jusqu'aux zones arides, le nomadisme est encore très répandu. Des zones plus sèches aux zones plus humides, la production agricole joue un rôle croissant dans le système. Dans le passé, les longues jachères permettaient de régénérer la végétation clairsemée des arbres et des buissons, lorsque le bétail était déplacé pour paître ailleurs.

La zone aride de l'Afrique orientale et australe

Malgré des précipitations très faibles et irrégulières, il y a normalement suffisamment de végétation pour permettre au bétail de paître. Mais comme les précipitations sont incertaines, le bétail doit se déplacer là où la nourriture est disponible et le nomadisme est donc fréquent (FAO, 2003).



Activités éducatives (exercices et études de cas)

Sur la base des informations présentées dans le cours et dans d'autres documents, préparez en groupe de 4-5 une fiche technique sur les domaines phytogéographiques

5.12 Objectifs de suivi



Objectif

1. Identifiez et analysez les indicateurs pour le suivi de la biodiversité forestière.

Poser le problème de l'analyse et du suivi de la biodiversité en forêt implique non seulement de fixer les limites de l'investigation (dans le monde végétal par exemple), mais aussi de décider précisément de l'échelle d'analyse et de la fréquence des observations à faire (Rondeux, 2002). La biodiversité est dynamique et évolutive, ses processus et sa composition changent constamment en raison de facteurs naturels et anthropiques. Avec la biodiversité, il y a des problèmes de variation spatiale et temporelle qui sont liés aux processus biosphériques et géosphériques.

Les successions biotiques et le développement des sols sont liés à des phénomènes écologiques complexes qui sont des intégrations de plusieurs processus biologiques, chimiques et physiques nécessitant des années, parfois des siècles, pour s'exprimer (Jeffers, 1996).

Les objectifs de surveillance sont les suivants :

- effectuer des observations à long terme des écosystèmes forestiers, principalement à des fins de production, dans le contexte du changement climatique ;
- générer des connaissances sur les relations causales entre les facteurs externes et les tendances observées pour les scénarios de prévision et de prédiction par le biais de la modélisation ;
- développer des partenariats et faire partie du continuum des dispositifs de mesure et d'observation des écosystèmes forestiers permettant l'extrapolation et la généralisation nécessaires en relation avec d'autres dispositifs ou expériences pertinents ; et
- aider les décideurs et les gestionnaires à faire des choix de gestion durable pour les écosystèmes forestiers dans un contexte changeant et incertain.



Activités éducatives (exercices et études de cas)

Sur la base des informations présentées dans le cours et d'autres points dans la littérature, préparez en groupes de 4-5 une étude de cas sur l'identification des problèmes et la construction d'indicateurs pour le suivi de la biodiversité forestière dans un territoire donné.

5.13 Évaluation de l'état et de la dynamique de la biodiversité

5.13.1 Évaluation et surveillance de la biodiversité (Biomonitoring)



Objectif

A la fin de la session, l'apprenant sera en mesure de Décrire les indicateurs pour le suivi et l'évaluation de la biodiversité.



Résultats d'apprentissage

A la fin de cette session, les apprenants seront capables d'évaluer les changements futurs de l'état d'un écosystème forestier et de sa biodiversité.

Introduction générale

Les évaluations de la diversité intraspécifique et interspécifique des écosystèmes forestiers sont essentielles pour la gestion et la conservation des ressources forestières (Hunter, 1999). Ces évaluations sont utilisées pour fournir les données nécessaires à l'appui des décisions relatives à la biodiversité au niveau des politiques et de la gestion des forêts. L'évaluation de la biodiversité présente un certain nombre de défis. Premièrement, en raison de sa complexité, l'information doit être recueillie et exprimée à l'aide de variables simplifiées, normalement sous forme d'indicateurs (Noss, 1990, 1999). Deuxièmement, étant donné que les décisions relatives aux forêts sont prises à différentes échelles, les données et les indicateurs de biodiversité devront être regroupés avec ces échelles à des fins de surveillance et de rapport (Noss, 1990 ; Turner, 1995).

Choix des indicateurs

Le choix des indicateurs à utiliser dans une évaluation de la biodiversité forestière dépend des objectifs poursuivis. Les indicateurs de biodiversité adaptés au niveau d'un écosystème forestier peuvent être subdivisés en huit grands groupes³⁷ :

- la superficie forestière par type et stade de succession par rapport à la superficie terrestre ;
- les aires forestières protégées par type, stade de succession et catégorie de protection par rapport à la superficie forestière totale ;
- le degré de fragmentation des types de forêts ;
- le taux de conversion du couvert forestier (par type) à d'autres usages ;
- la superficie et le pourcentage de forêts touchées par les perturbations anthropiques et naturelles ;
- la complexité et l'hétérogénéité de la structure forestière ;
- le nombre d'espèces dépendantes de la forêt ; et,
- l'état de conservation des espèces dépendantes de la forêt.

Les indicateurs de fragmentation des forêts nécessitent des données spatiales à grande échelle sur le couvert forestier et peuvent comprendre des mesures de la taille et de la connectivité des blocs forestiers, ou des indices qui associent ces attributs (Kapos, Lysenko et Lesslie, 2000).

37 FAO, Indicateurs de la biodiversité dans les inventaires forestiers nationaux <http://www.fao.org/docrep/005/y4001f/Y4001F09.htm>

Méthode d'évaluation

Les méthodes traditionnelles d'inventaire forestier combinées aux techniques de télédétection et de SIG peuvent être utilisées pour recueillir des données sur les indicateurs de suivi et d'évaluation. L'inventaire des taxons non inclus dans l'inventaire forestier peut être réalisé par des enquêtes de terrain. Une attention particulière doit être accordée à la conception de l'échantillonnage et aux méthodes de stratification et de suivi, tant lors de l'inventaire forestier que lors des études complémentaires (Dallmeier et Comiskey, 1998a ; Bachmann, Köhl et Paivinen, 1998 ; Boyle et Boontawee, 1995 ; Vanclay, 1998). L'imagerie satellitaire peut être utilisée comme base pour la stratification des échantillons de terrain ainsi que pour cartographier la distribution des espèces étroitement associées à des types de végétation distincts.



Activités éducatives (exercices et études de cas)

Sur la base des informations de base présentées dans le cours et d'autres documents, préparez en groupe de 4-5 un résumé analytique sur les indicateurs de biodiversité forestière et les méthodes d'évaluation.

5.14 Indices de biodiversité



Objectif

A la fin de la session, l'apprenant sera en mesure d'expliquer les méthodes utilisées pour estimer la diversité biologique.

Introduction générale

La biodiversité désigne la diversité du monde vivant sous toutes ses formes et à toutes les échelles : diversité des écosystèmes, diversité des espèces et diversité génétique³⁸. La connaissance de la biodiversité des forêts est essentielle pour sa gestion et son exploitation rationnelle. Plusieurs méthodes sont généralement utilisées pour mieux comprendre la biodiversité des écosystèmes forestiers. Les indices de biodiversité peuvent être combinés avec d'autres méthodes pour estimer les changements et générer des connaissances sur la biodiversité des forêts.

Indice de Shannon

Pour quantifier simultanément la richesse taxonomique et la répartition des taxons dans une communauté, on utilise souvent des indices de diversité, les trois principaux étant ceux de Shannon-Weaver, Simpson et Gleason³⁹. L'indice de Shannon est un indice permettant de mesurer une diversité spécifique. Il donne une idée de la spécificité d'un environnement. C'est-à-dire le nombre d'espèces de ce milieu (richesse spécifique) et la répartition des individus au sein de ces espèces (équitabilité spécifique)⁴⁰. L'indice Shannon-Weaver est basé sur les proportions d'espèces que « nous observons ». Il combine donc la richesse taxonomique et l'équitabilité⁴¹.

$$H' = - \sum_{i=1}^S p_i \ln p_i$$

H' : indice de biodiversité ; i : une espèce ; $p = n / N$ où n est le nombre d'individus de l'espèce et N est le nombre total d'individus de toutes les espèces combinées⁴².

Dans la nature, la valeur de H' se situe généralement entre 0,5 (très faible diversité) et 4,5 (dans le cas de communautés complexes). Plus la valeur de l'indice H' est élevée, plus la diversité est grande. L'indice Shannon-Weaver est bien adapté à l'étude comparative des communautés car il est relativement indépendant de la taille des enquêtes⁴³. Il fait partie des indices de la théorie de l'information qui supposent que la diversité dans un écosystème peut être mesurée comme l'information contenue dans un message ou un code⁴⁴. L'indice Shannon-Weaver est le plus simple de ces indices et le plus largement utilisé (à titre d'exemple, voir le tableau 12).

38 CNPF, 2012, Indice de biodiversité potentielle: http://crpf-paysdelaloire.fr/sites/default/files/fiches/lindice_de_biodiversite_potentielle.pdf

39 Nature ordinaire, Mesurer la biodiversité d'un site: <http://natureordinaire.over-blog.com/article-mesurer-la-biodiversite-d-un-site-57668977.html>

40 Indice de Shannon : https://fr.wikipedia.org/wiki/Indice_de_Shannon

41 Mesures de la diversité biologique Roscoff (2005) : http://max2.ese.upsud.fr/epc/conservation/BEMA/Indices_biodiversite_070305.pdf

42 Indice de Shannon : https://fr.wikipedia.org/wiki/Indice_de_Shannon

43 Nature ordinaire, Mesurer la biodiversité d'un site: <http://natureordinaire.over-blog.com/article-mesurer-la-biodiver-site-d-un-site-57668977.html>

44 Observatoire du sahara et du sahel : http://www.oss-online.org/cd_envi/doc-new/02/06/02/05.pdfsite-d-un-site-57668977.html

Tableau 12. Méthode de calcul de l'indice de Shannon-Weaver et de son équitabilité pour une station de surveillance permanente

Station 1	Espèce	Fréquence	$p = n / N$	$\log_2 p$	$- p \log_2 p$
	<i>Astragalus armatus</i>	4	0.1739	-2.5236	0.4389
	<i>Deverra tortuosa</i>	2	0.0870	-3.5236	0.3064
	<i>Zygophyllum album</i>	1	0.0435	-4.5236	0.1967
	<i>Cynodon dactylon</i>	1	0.0435	-4.5236	0.1967
	<i>Diplotaxis harra</i>	4	0.1739	-2.5236	0.4389
	<i>Astragalus corrugatus</i>	1	0.0435	-4.5236	0.1967
	<i>Stipa capensis</i>	10	0.4348	-1.2016	0.5224
N = 23					
S = 7					
Indice de Shannon $H' = 2,2966$					
Équitabilité $E = H' / \log_2 S = 0,8181$					

Source : Jauffret (2001)

Indice de Simpson

Cet indice fait partie des indices de dominance qui prennent en compte la fréquence mesurée des espèces. C'est le plus utilisé. L'indice de Simpson accorde plus d'importance et est donc plus sensible aux espèces les plus fréquentes qu'à la richesse totale des espèces (Magurran, 1988). L'expression de l'indice de Simpson (Simpson, 1949) est :

$$D = \sum_{i=1}^s p_i^2$$

Plus l'indice de Simpson est faible, plus la diversité spécifique est élevée. La mesure de la corrélation d'équitabilité avec l'indice de Simpson est :

$$E = \frac{D}{1 - \frac{1}{S}}$$

L'inverse de Simpson permet de faire varier l'indice dans le même sens que la diversité : plus la diversité spécifique est élevée, plus l'indice est fort⁴⁵.

$$D = \frac{1}{\sum_{i=1}^s p_i^2}$$

45 Observatoire du sahara et du sahel : http://www.oss-online.org/cd_envi/doc-new/02/06/02/05.pdf

Indice d'équitabilité

Les structures d'abondance relative des espèces déterminent l'équitabilité ou la composante de dominance de la diversité. Par exemple, étant donné une phytocénose composée d'espèces S, la diversité est plus élevée si toutes les espèces S sont bien représentées (grande équité, faible dominance) que si un petit nombre d'espèces, appelées T, sont très communes et que les autres (S - T) sont présentes mais rares (faible équité, forte dominance). L'évaluation de l'équité est utile pour détecter les changements dans la structure d'une communauté et s'est parfois révélée efficace pour détecter les changements d'origine anthropique. La mesure d'équivalence de l'indice de Shannon-Weaver est calculée à l'aide de la formule⁴⁶ suivante :

$$E = \frac{H}{\log_2 S}$$

Indice de biodiversité potentielle (IBP)

L'IBP est un outil simple et rapide qui permet aux gestionnaires forestiers :

- d'estimer la capacité d'accueil des espèces dans leurs peuplements ; et
- de choisir les améliorations à apporter dans la gestion quotidienne de leurs forêts.

Il peut être utilisé avant une intervention sylvicole ou dans la préparation de documents de gestion⁴⁷.



Activités éducatives (exercices et études de cas)

A partir des informations de base présentées dans le cours et d'autres points de la littérature, préparez par groupes de 4-5 une fiche d'information sur les indices de biodiversité avec des exemples d'application.

⁴⁶ Observatoire du sahara et du sahel : http://www.oss-online.org/cd_envi/doc-new/02/06/02/05.pdf

⁴⁷ CNPF, 2012, Indice de biodiversité potentielle: http://crpf-paysdelaloire.fr/sites/default/files/fiches/lindice_de_biodiversite_potentielle.pdf

Références

- Abouti, A., n.d., *Écologie végétale*, (Cours université Mohamed V Agdal Faculté des Sciences, Rabat Laboratoire de Botanique, Mycologie et Environnement)
- Anatomie et physiologie végétale <http://slideplayer.fr/slide/5457697/>
- Bachmann, P., M. Köhl & Päivinen, R. (eds.), 1998. *Assessment of biodiversity for improved forest planning*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands.
- Baize, D., 2004. *Petit lexique de pédologie*. INRA
- Baize, D. et Girard M.C. 1995. *Référentiel pédologique*. INRA.
- Baize D. & B. Jabiol, 1998. *Guide pour la description des sols*. INRA.
- Beattie, A.J., J.D. Majer & I. Oliver, 1993. *Rapid biodiversity assessment: a review*. p. 4-14. Report from workshop on biodiversity evaluation, 3-4 mai 1993. Macquarie University, Sydney, Australia.
- Beauchamp, J., 2008. *Propriétés des sols*. Available at: <https://www.u-picardie.fr/beauchamp/mst/sol.htm>.
- Bergkamp, G., B. Orlando & I. Burton, 2003. *Change: adaption of water resources management to climate change*. IUCN, Gland, Switzerland,
- Betts, R., M. Sanderson & S. Woodward, 2008. *Effects of large-scale Amazon forest degradation on climate and air quality through fluxes of carbon dioxide, water, energy, mineral dust and isoprene*. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 363:1873–1880.
- Boutrais, J., 2007a. *Pasteurs d'Afrique de l'Ouest et de l'Est face à une catastrophe; la peste bovine de 1890*. In Landy, F. et al. (eds.): *Les raisons de la géographie*. Paris, Karthala. Pp. 175-192.
- Boutrais, J., 2010. *Pastoralisme et aires protégées d'Afrique de l'Ouest en regard de l'Afrique de l'Est*. In *Aires protégées, espaces durables*. 246 p.
- Boyd, J. & S. Banzhaf, 2006. *What Are Ecosystem Services? The Need for Standardized Environmental Accounting Units*. Discussion Paper, Resources for the Future, 29 p.
- Boyle, M., 1998. *Developing policy performance indicators for Ontario Ministry of Natural Resources*. Université de Waterloo, Canada. (thèse).
- Boyle, T.J.B. & J. Sayer, 1995. *Measuring, monitoring and conserving biodiversity in managed tropical forests*. *Commonwealth Forestry Review* 74:20-25.
- Boyle, T.J.B. & B. Boontawee (eds.), 1995. *Measuring and monitoring biodiversity in tropical and temperate forests*. CIFOR, Bogor, Indonesia.
- BRGM, 2010. *Quelles techniques pour quels traitement - analyse coût – bénéfiques*. Rapport de recherche. Bridges, E.M., 1997. *World soils*, Cambridge University Press 3rd ed
- Burley, J. & I. Gauld, 1995. *Measuring and monitoring forest biodiversity. A commentary*. In Boyle, T.J.B. & B. Boontawee (eds.): *Measuring and monitoring biodiversity in tropical and temperate forests*, p. 19-46. CIFOR, Bogor, Indonesia.
- Castañeda, F., 2001. *Collaborative action and technology transfer as means of strengthening the implementation of national-level criteria and indicators*. In Raison, R.J. et al. (eds.): *Criteria and indicators for sustainable forest management*, p. 145-163. IUFRO Research Series No. 7. CABI Publishing, Wallingford, UK.

CDB. 1997b. Indicators of forest biodiversity. Document de travail préparé pour la réunion du Groupe de liaison sur la diversité biologique forestière. PNUE/CDB/SBSTTA/3/Inf.23. Secrétariat CDB, Montréal, Canada. CDB, 2001. Global biodiversity outlook. Secrétariat CDB, Montréal, Canada

Centre National de la Propriété Forestière (CNPF), 2012. Indice de biodiversité potentielle. http://crpf-paysdelaloire.fr/sites/default/files/fiches/lindice_de_biodiversite_potentielle.pdf

Chapron, C., 2004. Principes de zoologie: Structure-Fonction et Evolution, Dunod, 203p.

Chaves, M.M., J.S. Pereira, J. Maroco, M.L. Rodrigues, C.P.P. Ricardo, M.L. Osorio, I. Carvalho, T. Faria & C. Pinheiro, 2002. How plants cope with water stress in the field. Photosynthesis and growth. *Annals of Botany* 89:907-916.

Cherubini, P., 2000. Tree-ring research beyond the climate change: "Quo vadis?" *Dendrochronologia* 18:91-93.

Chidumayo, E., D. Okali, G. Kowero & M. Larwanou, 2011. Forêts, Faune sauvage et Changement Climatique en Afrique. African Forest Forum, Nairobi, Kenya, 356p.

Chmielewski, F.M. & T. Rötzer, 2001. Response of tree phenology to climate change across Europe. *Agr Forest Meteorol.* 108:101-112.

Climate challenge, effet de serre: <http://www.climatechallenge.be/fr/des-infos-en-mots-et-en-images/le-changement-climatique/leffet-de-serre/leffet-de-serre-naturel/le-bilan-radiatif-de-la-terre.aspx>

Collins, S.L., S.M. Glenn & D.J. Gibson, 1995. Experimental analysis of intermediate disturbance and initial floristic composition: decoupling cause and effect. *Ecology* 76: 486-492.

Commission de Coopération Environnementale, 2003. Document d'information - les mécanismes axés sur le marché en matière de séquestration du carbone, d'efficacité énergétique et d'énergie renouvelable en Amérique du Nord — Quelles options s'offrent à nous? CCE, Montreal, Canada.

Commission du développement durable (CDD), 2001. Indicators of sustainable development: guidelines and methodologies. New York, US.

Convention sur la diversité biologique (CDB), 1997a. Recommendations for a core set of indicators of biological diversity. PNUE/CDB/SBSTTA/3/Inf.13. CDB Secrétariat, Montreal, Canada.

Cook, E.R., K. Briffa, S. Shiyatov & V. Mazepa, 1990. Tree-Ring Standardization and Growth Trend Estimation. In R. Cooke & L.A. Kairiukstis (eds.): *Methods of dendro-chronology, applications in environmental sciences*. Kluwer Academic Publisher, Dordrecht, p 104-122.

Coomes, O.A., R.B. Allen, N.A. Scott, C. Gouling & P. Beets, 2002. Designing systems to monitor carbon stocks in forests and shrublands. *Forest Ecology and Management* 164(1-3):89-108.

Cosandey C. & M. Robinson, 2000. Hydrologie continentale. Armand Collin, Paris.

Costanza R., R. d'Arge, R. de Groot, S. Farber, M. Grasso, B. Hannon, K. Limburg, S. Naeem, R. O'Neil, J. Paruelo, R.G. Raskin, P. Sutton & M. Van den Belt, 1997. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature* 387:253-260.

Cours d'écologie générale de l'université Badji Mokhtar Annaba. Available at: <http://elearning.univ-annaba.dz/course/view.php?id=330>

Cours de Botanique: http://www.doc-developpement-durable.org/file/Agriculture-Lutte-Biologique/ebook_cours_de_botanique_l_appareil_vegetatif_des_vegetaux_superieurs_jean_marie_savoie.pdf

Couteron, P. & G. Serpantie, 1995. Cartographie d'un couvert végétal soudano-sahélien partir d'images SPOT XS exemple du Nord-Yatenga (Burkina Faso). *Photo interprétation* 33(1):42-43.

Cresam, 2007. Conservation et Reproduction des Espèces Sauvages Africaines Menacées, Congrès Mondial de Biologie et Conservation des Félidés.

CRPF, 2012. Indice de biodiversité potentielle : Available at: http://crpf-paysdelaloire.fr/sites/default/files/fiches/lindice_de_biodiversite_potentielle.pdf

Darkoh, M.B.K., 2003. Regional perspectives on agriculture and biodiversity in the drylands of Africa. *Journal of Arid Environments* 5:261-279.

De Groot, R.S., M.A. Wilson & R.M.J. Boumans, 2002. The dynamics and value of eco-system services : integrating economic and ecological perspectives - a typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services. *Ecological Economics* 41:393-408.

Defila, C. & B. Clot, 2001. Phytophenological trends in Switzerland. *Int J Biometeorol* 45:203-207.

Delpierre, N., 2015. Bilan Radiatif, (cours université Paris Sud). Available at : http://www.esse.u-psud.fr/IMG/pdf/eco1_bilan-radiatif.pdf

Department for Environment, Food and Rural Affairs (Defra), 2007. An introductory guide to valuing ecosystem services. In Defra. Ecosystem services – What nature gives us. Available at: <http://archive.defra.gov.uk/environment/policy/naturalenviron/documents/eco-valuing.pdf>

DGRnE-OWD, 2005. Réhabilitation des dépotoirs et assainissement des sols : le point sur la situation en Région wallonne et ses perspectives d'évolution. 61 p.

Diaz, S. & M. Cabido, 2001. Vive la difference: plant functional diversity matters to eco-system processes. *Trends in Ecology and Evolution* 16(11):646–655.

Duchaufour, P., 2001. Introduction à la science du sol, végétation, environnement, Dunod.

Ducks Unlimited Canada, 2004. Natural Values. In: Wetland values. Ducks Unlimited Canada. Available at: http://www.ducks.ca/conservation/wetland_values/pdf/nvalue.pdf

Dynamique des écosystèmes: <http://www.ecosociosystemes.fr/dynamique.html> Écosystème forestier: http://www.lpretre.com/travaux/foret/#_Toc471899893 Effet de serre: <http://www.ecobase21.net/Effetdeserre.html>

Eswaran, H, R. Almaraz, E. van den Berg & P. Reich, 1996. An Assessment of the Soil Resources of Africa in Relation to Productivity. Washington, DC: US Dept. of Agriculture. <http://soils.usda.gov/use/worldsoils/papers/africa1.html>

FAO, 2003. Gestion de la fertilité des sols pour la sécurité alimentaire en Afrique sub-saharienne. Rome, Italy.

FAO, 2005. Irrigation in Africa figures - AQUASTAT Survy 2005. Available at: http://www.tho.org/nr/water/aqua-stat/countries/madagascar/madagascar_cp.pdf

FAO, Indicateurs de la biodiversité dans les inventaires forestiers nationaux. <http://www.fao.org/docrep/005/y4001f/Y4001F09.htm>

FAO, 2007. Fisheries and Aquaculture Information and Statistics Service. Capture production 1950-2005.

FISHSTAT Plus - Universal software for fishery statistical time series. <http://www.fao.org/fi/statist/>

FISOFT/FISHPLUS.asp

FAO, 2007. Forêts et eau: <ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/010/a1598f/>

FAO, 2012. Bonnes pratiques de gestion durables des terres et des eaux en Afrique du Nord (Projet Grande Muraille Verte).

- Ferrari, J.P., 1984. Dictionnaire étymologique de la flore française. Éditions Le chevalier. Paris. 232 pages.
- Folke, C., S. Carpenter, B. Walker, M. Scheffer, T. Elmqvist, L. Gunderson & C.S. Holling, 2004. Regime shifts, resilience, and biodiversity in ecosystem management. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics* 35:557–581.
- Gerasimov, 1985. La notion de processus élémentaire de pédogenèse et ses différentes possibilités d'utilisation, *Science du sol* 196(2):163-170.
- GIEC, 2008. Climate change 2008: the IPCC fourth assessment report. Cambridge University Press, Cambridge.
- Gobat, J.M., M. Aragno & W. Matthey, 1998. Le sol vivant: base de pédologie-biologie des sols, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes.
- Grassé, P. & D. Doumecq, 1998. Invertébrés. Paris, Masson, 296 p.
- Gunderson, H.L., 2000. Ecological resilience: in theory and application, *annual review of ecology, evolution, and systematics*. 31:425-439.
- Hallé, F., 2016. 50 ans d'explorations et d'études scientifiques en forêt tropicale, *Museo ?*
- Homewood, K.M. & W.A. Rodgers, 1984. Pastoralism and conservation. *Human Ecology* 12(4):431-441.
- Homewood, K.M. & W.A. Rodgers, 1991. Maasailand ecology, pastoralist development and wildlife conservation in Ngorongoro, Tanzania. Cambridge University Press, 318 p.
- Hyman, M. & R.R. Dupont, 2001. Groundwater and Soil Remediation, Process Design and Cost Estimating of Proven technologies. ASCE Press, Reston, Virginie, 534 p
- Indice de Shannon: https://fr.wikipedia.org/wiki/Indice_de_Shannon.
- Institut Bruxellois pour la Gestion de l'Environnement/Observatoire des Données de l'Environnement, 2005. Available at : http://document.environnement.brussels/opac_css/doc_num.php?explnum_id=5378
- Khan, F.I., T. Husain & R. Hejazi, 2004. An overview and analysis of site remediation technologies. *Journal of environmental management* 71 :95-122.
- Kolié, B., 2015. Analyse des capacités d'adaptation des communautés de Beindou au changement climatique (Mémoire de Master en Science de l'environnement, Université de Conakry), 130p.
- Kourouma, D.L., 2005. Approche méthodologique d'évaluation environnementales stratégique de dimension régionale de la politique énergétique guinéenne (Thèse de Doctoral, Université du Québec à Montréal), 410p.
- La forêt et l'effet de serre: <http://www.bois.com/environnement/non-au-co2/comprendre-effet-serre/role-foret>
- Langenhoff, A., 2007. In situ bioremediation technologies – experiences in the Netherlands and future European challenges. TNO, Complementary report for EURODEMO to the “Status report on technological reliability for demonstrated soil and groundwater management technologies with special focus on the situation in Europe (D6.2) part 2”, 21 p.
- Lecuyer, C., 2014. L'eau sur la terre: Propriétés physico chimiques et fonctions biologiques. Éditions Lste, 226p
- Legras, B., 2012. Bilan Radiatif (cours): <http://www.lmd.ens.fr/legras>

- Limoges, B., 2009. Biodiversité, services écologiques et bien-être humain. In AgriRéseau. Agri-réseau : Agroenvironnement. Available at : http://www.agrireseau.qc.ca/agroenvironnement/documents/Services_ecologiques.pdf
- Lisec, 2004. Cité par Institut Bruxellois pour la Gestion de l'Environnement/Observatoire des Données de l'Environnement, 2005.
- Loic, D., 2015. Guide de terrain pour la réalisation des relevés phytosociologiques (document technique). Meylan P. & A. Musy, 1999. Hydrologie Fréquentielle, Edition HGA Bucarest,
- Michez, D., 2012, Éléments de Botanique (cours)
- Musy, A., 2005. Hydrologie générale, (cours École Polytechnique Fédérale de Lausanne) <http://echo2.epfl.ch/e-drologie/chapitres/chapitre6/main.html>
- Nature ordinaire, Mesurer la biodiversité d'un site. Available at: <http://natureordinaire.over-blog.com/article-mesurer-la-biodiversite-d-un-site-57668977.html>
- Nelson, G.C., M.W. Rosegrant, J. Koo, R. Robertson, T. Sulser, T. Zhu, C. Ringler, S. Msangi, A. Palazzo, M. Batka, M. Magalhaes, R. Valmonte-Santos, M. Ewing & D. Lee, 2009. Climate change: Impact on agriculture and costs of adaptation., Food Policy Report 21. Washington, D.C. 30p.
- Notion d'écosystème (cours): Available at : http://www.uvt.rnu.tn/resources-uvt/cours/ecosystemes/lecon1/co/Contenu_04.html
- Observatoire du sahara et du sahel : Avaialble at : http://www.oss-online.org/cd_envi/doc-new/02/06/02/05.pdf
- Office national de l'environnement de la Corse, 2012. Available at : file:///C:/Users/TEMP.admin.002/Downloads/classification_des_vegetaux_bc_oec.pdf
- Palmer, A.R. & A.M. Ainslie, 2005. Grasslands of South Africa. In: Grasslands of the world, J.M. Suttie et al. (eds). Plant Production and Protection Series No. 34. FAO, Rome.
- Protégeons les forêts du bassin du Congo : Available at : <http://www.greenpeace.org/africa/fr/notre-action/Protegeons-les-forets/>
- Radoux, M., 1999. Qualité et traitement des eaux (Cours de l'université Senghor, Alexandrie)
- Radoux, M., D. Cadelli & M. Nemcova, 1995. L'optimisation des technologies extensives d'épuration des eaux usées sous climat sahélien (Sénégal). In: Pollution in large city. Science and technology for planning environmental quality, Venise/Padova, 1, 461-471.
- Radoux, M., D. Cadelli & M. Nemcova, 1996. A mosaic of artificial ecosystems as a waste water treatment plant evaluation of the pilot plant of Lallaing (France). In: Natural and Constructed Wetlands for Waste Water Natural Treatment. Ecology and Use of Wetlands. Prague and Botanical Institute, Trebon, pp.45-56.
- Ramade, F., 1995. Éléments d'écologie. 5eme édition. Ediscience international, 631p Ritter, J., 2015. Érosion des sols: cause et effet.
- Rondoux, J., 2002a. Les cahiers forestiers de gembloux (Inventaires forestiers et bio-diversité). 20p.
- Rosa, H. & S. Kandel, 2003. Gestión Local y Participacion en Torno al Pago por Servicios Ambientales: Estudios de Caso en Costa Rica, Fundación PRISMA.
- Schadeck, S., 2007. Contamination locale des sols. Dossier scientifique réalisé dans le cadre de l'élaboration du Rapport analytique sur l'état de l'environnement wallon 2006. 46 p. Bureau d'études Siterem.

- Sipichiger, E., M. Figeat & D. Jeanmonod, 2016. Botanique Systematique. Presse Poly-techniques et universitaires Romandes (PPUR).
- Stock, R., 2004. Africa South of the Sahara: A Geographical Interpretation. Guilford Press, New York.
- Suty, L., 2015. Les végétaux - Des symbioses pour mieux vivre, Quae, 55 p
- Systématique des plantes supérieures ; classification ; définition de l'espèces. Available at: <http://ecologieenvironnement.blogspot.com/2015/01/systematique-des-plantes-superieures.html>
- Thompson, I., B. Mackey, S. McNulty & A. Mosseler, 2009. Forest resilience, biodiversity, and climate change: a synthesis of biodiversity resilience/stability relationship in forest ecosystems. Technical Series n° 43. Montreal, Canada, Secrétariat de la Convention sur la diversité biologique.
- Thompson, I., 2011. Biodiversité, seuils de tolérance des écosystèmes résilience et dégradation des forêts: Available at: <http://www.fao.org/3/a-i2560f/i2560f05.pdf>
- UK NEA, 2011. Synthesis of the Key Findings. National ecosystem assessment. Information Press, Oxford. Available: <http://uknea.unepwcmc.org/Resources/tabid/82/Default.aspx>
- UNEP, 2008. "Africa: Atlas of Our Changing Environment." Division of Early Warning and Assessment (DEWA), United Nations Environment Programme, Nairobi. 393p.
- Unisféra, 2004. Le paiement pour les services environnementaux: Étude et évaluation des systèmes actuels, Commission de coopération environnementale de l'Amérique du Nord. 67p.
- UK Environment Agency, 2002. Remedial Treatment Action Data Sheets. EA, INFO-OA1c, 35 p.
- UK Environment Agency, 2004a. Model Procedures for the Management of Land Contamination. Contaminated Land Report 11, ISBN: 1844322955, 203 p.
- UK Environment Agency, 2004b. Guidance on the use of Stabilisation/Solidification for the Treatment of Contaminated Soil. Science Report: SC980003/SR1, ISBN: 184432320 X, 86 p.
- US Environmental Protection Agency, 1988. Guidance for conducting remedial investigations and feasibility studies under CERCLA. Interim final. Office of Solid Waste and Emergency Response, Washington, D.C. EPA/540 G_89 004, 186 p.
- US Environmental Protection Agency, 1991. Handbook: Stabilization Technologies for RCA Corrective Actions. Cincinnati (Ohio). Report EPA/625/6-91/026, 62 p.
- US Environmental Protection Agency, 1997. Proceedings of the Symposium on Natural Attenuation of Chlorinated Organics in Ground Water, Dallas (Texas), 11-13 sept 1996. Report EPA/540/R-97/504, 191 p.
- Villeneuve, C., 1998. Qui a peur de l'an 2000, Éditions MultiMondes. 303p.
- Villeneuve, C. & F. Richadr, 2005. Éditions MultiMondes. 381p.
- Wallace, K.J., 2007. Classification of ecosystem services: Problems and solutions. Biological Conservation 139:235-246.
- Western. D., 1982. Amboseli National Park; enlisting landowners to conserve migratory wildlife. Ambio 11(5):302-308.
- World Bank, 2002a. Market-based Mechanisms for Conservation and Development, Annual Review, July 2001 – June 2002. IBRD, Washington D.C.
- World Bank, 2002b. Colombia, Costa Rica and Nicaragua regional integrated silvopastoral approaches to ecosystem management project: project appraisal document. Report No.21869-LAC. IBRD, Washington, D.C.

Sites Web consultés

Caractéristiques des végétaux, reproduction : L'alternance des générations :

<http://www.creaweb.fr/perso/bv/caract.html>

Characteristics of life:

<http://www.larousse.fr/encyclopedie/divers/vie/101614>

Characteristics of plants: Vegetative propagation and totipotency:

<http://www.creaweb.fr/perso/bv/tissus.html>

Plants of the plant cell Features:

<http://www.creaweb.fr/perso/bv/tissus.html>

Characteristics of plant tissues:

<http://www.creaweb.fr/perso/bv/tissus.html>

Characteristics of plants autotrophy and photosynthesis :

<http://www.creaweb.fr/perso/bv/autotro.html>

Features Plant autotrophy and photosynthesis

<http://www.creaweb.fr/perso/bv/autotro.html>

Characteristics of plants , plant cells:

<http://www.creaweb.fr/perso/bv/cellule.html>

Systematics higher plants; classification; definitions:

<http://ecologieenvironnement.blogspot.com/2015/01/systematique-des-plantes-superieures.html>

Plant characteristics; plant cell:

<http://www.creaweb.fr/perso/bv/cellule.html>

<https://fr.wikipedia.org/wiki/Arthropode> <https://fr.wikipedia.org/wiki/Mollusca>

<https://www.google.com/#q=Nematoda>

<https://fr.wikipedia.org/wiki/Chordata>

<https://fr.wikipedia.org/wiki/Platyhelminthes>

<https://fr.wikipedia.org/wiki/Annelida>

<https://fr.wikipedia.org/wiki/Cnidaria>

<https://fr.wikipedia.org/wiki/Echinodermata>

[https://www.google.com/#q=Porifer has](https://www.google.com/#q=Porifer+has)

<http://www.airparif.asso.fr/pollution/emissions-ou-concentrations>

<http://www.igqa.mddelcc.gouv.qc.ca/contenu/polluants.htm#ozone>

<http://ge.ch/air/qualite-de-lair/polluants-de-lair/cycle-de-pollution>

<http://www.airparif.asso.fr/pollution/effets-de-la-pollution-generalites> Office fédéral de l'environnement
OFEV suisse :

<http://www.bafu.admin.ch/luft/10804/10807/index.html?lang=fr>Parlement européen:

http://www.europarl.europa.eu/workingpapers/agri/s5-11-1_fr

http://www.meteo45.com/couches_atmospheriques.html

http://www.mrcc.uqam.ca/effet_serre/serre/composition.html

<https://fr.wikipedia.org/wiki/Arthropode>

<https://fr.wikipedia.org/wiki/Mollusca>

<https://www.google.com/#q=Nematoda>

<https://fr.wikipedia.org/wiki/Chordata>

<https://fr.wikipedia.org/wiki/Platyhelminthes>

<https://fr.wikipedia.org/wiki/Annelida>

<https://fr.wikipedia.org/wiki/Cnidaria>

<https://fr.wikipedia.org/wiki/Echinodermata>

<https://www.google.com/#q=Porifera>

Formulations et valeurs (tables) des différentes constantes météorologiques: formules:

<http://www.fao.org/docrep/X0490E/x0490e0k.htm#TopOfPage>

Tables des valeurs: _

<http://www.fao.org/docrep/X0490E/x0490e0k.htm#TopOfPage>

<http://forums.futura-sciences.com/chimie/587433-pka-acide-fort.html>

<http://haliosphere.over-blog.com>

<http://forums.futura-sciences.com/chimie/587433-pka-acide-fort.html>

<http://haliosphere.over-blog.com>

http://environnement.wallonie.be/rapports/dppgss/air1997/intro_2.htm#i121

http://www.mrcc.uqam.ca/effet_serre/serre/composition.html

http://document.environnement.brussels/opac_css/doc_num.php?explnum_id=5378

http://max2.es.eupsud.fr/epc/conservation/BEMA/Indices_biodiversite_070305.pdf

http://www.ecosociosystemes.fr/eau_proprietes_physicochimiques.html

http://www.ecosociosystemes.fr/eau_proprietes_physicochimiques.html

<http://www.omafra.gov.on.ca/french/engineer/facts/12-054.htm#1>

<http://www.omafra.gov.on.ca/french/engineer/facts/12-054.htm#1>

<http://www.planetoscope.com/cereales/13-pertes-de-terres-agricoles-rendues-incultivables-du-fait-de-l-erosion.html>

Principaux auteurs

Prof. Dan Lansana Kourouma

Centre d'Etudes et de Recherche en
Environnement
Université de Conakry, République de Guinée
Email: dan_lansana@yahoo.fr

Dr. Emmanuel Acheampong

Senior Lecturer
Department of Silviculture and Forest Management
Faculty of Renewable Natural Resources;
Kwame Nkrumah University of Science and
Technology (KNUST); Private Mail Bag, KNUST
Kumasi, Ghana
Email: ekachie@yahoo.com; eacheampong.irnr@knust.edu.gh

Liste des autres contributeurs

Nom et institution d'affiliation

Dr. Abasse Tougiani

Senior Research Scientist; National Institute for
Agricultural Research of Niger (INRAN)
BP 429, Niamey, Niger;
Tél: +227 96970886;
Email: abasse.tougiani@gmail.com

Dr. Bayen Philippe

Lecturer; University of Dédougou;
Private Bag Burkina Faso;
Cel: 226-705-73-601;
Email: phbayen@yahoo.fr

Prof. Busuyi Olasina Agbeja

University of Ibadan, Nigeria; Department of Social
and Environmental Forestry
Faculty of Renewable Natural Resources;
13, Ijoma Street, University of Ibadan, Nigeria;
Email: olasinagbeja@yahoo.com; bo.agbeja@mail.ui.edu.ng

Prof. Adjima Thiombiano

Université de Ouagadougou, Laboratoire de
Biologie et Ecologie Végétales ;
03 BP 7021 Ouagadougou 03, Burkina Faso
Tél. +226 70 238261;
Email: adjima_thiombiano@yahoo.fr
Prof. Alfred Opere
Chairman of Department of Meteorology, University
of Nairobi, College of Biological and Physical
Sciences, Department of Meteorology;
P.O. Box 30197-00100, GPO, Nairobi, Kenya;
Email: aopere@uonbi.ac.ke

Dr. Bamba Sylla

Head of Research Cluster: Climate Change and
Climate Variability, West African Science Service
Center on Climate Change and Adapted Landuse
(WASCAL);
WASCAL Competence Center, Ouagadougou,
Burkina Faso;
Tel: Office: (+226) 25 37 54 23/29/39;
Cell: (+226) 76
76 53 85 (+226) 76 89 66 70,
E-mail: sylla.b@wascal.org; syllabamba@yahoo.fr

Mrs. Beatrice Kolie

Assistant Lecturer ; Centre d'Etudes et de
Recherche
en Environnement; Université de Conakry ;
Private Bag; Conakry, République de Guinée

Dr. Daud Kachamba;

Lecturer; Lilongwe University of Agriculture and
Natural Resources (LUANAR);
Private Bag, Lilongwe;
Tel: +265 993 605154;
Email: dkachamba@gmail.com

Dr. Dan Guimbo Iro

Senior Lecturer; Faculté d'Agronomie, Université
Abdou Moumouni (Niger);
Email: danguimbo@yahoo.fr
Dr. Darlington Chima Uzoma
Senior Lecturer; University of Port Harcourt;
Department of Forestry and Wildlife;
Choba, P. M. B 5323; Nigeria;
Email: uzoma.chima@uniport.edu.ng

Dr. Dickson Makanji

Lecturer, Egerton University, Njoro Campus,
Department of Natural Resources;
P.O Box 536 Egerton 20115 , Kenya;
Mobile: +254. 0702115860;
Email: lmakanji@hotmail.com , lmakanji@yahoo.co.uk

Dr. Doris Mutta

Senior Programme Officer; African Forest Forum (AFF);
C/o World Agroforestry Center (ICRAF), United Nations Avenue; P.O. Box 30677-00100, Nairobi, Kenya;
Tel: +254 020 7224485; Fax: +254 020 7224001;
Email: D.mutta@cgiar.org

Dr. Godfrey Hampwaye

Senior Lecturer, The University of Zambia, Dept of Geography and Environmental Studies;
Great East road, P.O Box 32379, Lusaka, Zambia;
Tel: +260 211 290 603,
Email. ghampwaye@unza.zm; hampwaye@yahoo.co.uk

Prof. Godwin Kowero

Executive Secretary; African Forest Forum (AFF);
C/o World Agroforestry Center (ICRAF), United Nations Avenue; P. O. Box 30677 – 00100, Nairobi, Kenya;
Phone: +254207224203;
Email: G.kowero@cgiar.org

Prof. Eliakimu Zahabu

Department of Mensuration and Management ;
Sokoine University and Agriculture, Faculty of Forestry and Nature Conservation;
P.O. Box 3013 Chuo, Kikuu, Morogoro, Tanzania;
Email: zahabue@yahoo.com; zahabue@suanet.ac.tz

Mr. Emmanuel Seck

Programme Manager; ENDA - Energy Environment Development ;
Complexe SICAP Point E Bâtiment B; 1er étage
Avenue Cheikh Anta Diop X Canal IV; Dakar,
Senegal; Tél : (221) 33 869 99 48/49; Fax : (221) 33 860 51 33;
Email : se@endatiersmonde.org ; ssombel@yahoo.fr

Mr. Eric Christophe Bayala

Chef de service Ecovillages ; Direction Generale de l'économie; Vorte et du changement climatique
BP 7044, Ouagadougou, Burkina Faso;
Tel: 78914757 / 70650252;
Email: bayalaeric2@gmail.com

Dr. Eyob Tesfamariam

Lecturer; University of Pretoria; RM 5-15, Plant Sciences Complex;
Corner of Lynwood Rd & Roper St.; Hatfield 0028; South Africa;
Mobile:.. +27-724597140;
Email: eyob.tesfamariam@up.ac.za

Dr. Franklin Joseph Opijah

Senior Lecturer; University of Nairobi; Chiromo Campus; Department of Meteorology;
P.O Box 30197-00100 ; Nairobi, Kenya;
Email: fopija@uonbi.ac.ke; fopijah@gmail.com;
fopijah@yahoo.com

Prof. Jacob Mwitwa

University of Copper belt, School of Natural Resources, Zambia;
Cell: +260 977 848 462;
Email: Jacob.mwitwa@gmail.com

Prof. John Nzioka Muthama

Deputy Director; Wangari Maathai Institute for Peace and Environmental Studies; University of Nairobi, College of Biological and Physical Sciences; Head of Climate Change; Department of Meteorology;
PO. Box 15160-00100, GPO, Nairobi Kenya;
Email: jmuthama@uonbi.ac.ke; jnmuthama@gmail.com

Dr. Joshua Ngaina

Chairman, Meteorology Department, South Eastern Kenya University (SEKU), Department of Meteorology;
P.O. Box 170-90200 , Kitui, Kenya;
Email: jngaina@gmail.com

Dr. Joyce Lepetu

Senior Lecture (Forest Sciences); Director, Centre of In Service and Continuing Education (CICE), Botswana University of Agriculture and Natural Resources (BUAN);
PB 0027; Gaborone, Botswana;
Tél: +267 3650396; Cell: (00267) 75168163 ;
Email: jlepetu@bca.bw; jlepetu@yahoo.com

Dr. Jules Bayala

Principal Scientist - Sahel Ecosystems; World Agroforestry Centre (ICRAF) ; West and Central Africa Regional Office - Sahel Node; BP E5118, Bamako, Mali; Tél: +223 20 70 92 20; Mobile: +223 77 71 41 90; Email: J.Bayala@cgjar.org

Prof. Kokou Kouami

Director of the Master of Climate and Human Security, West African Science Service Centre on Climate Change and Adapted Land Use (WASCAL), University of Lome, Faculté des Sciences; BP 1515, Lomé, Domicile BP 80825 Lomé, Togo; Tél (00) 228 90 02 04 11/ Dom. (00) 228 22 71 33 44 ; Email: kokoukouami@hotmail.com

Prof. Kokutse Adzo Dzifa,

Epe Kokou University of Lomé; Department of Botany; BP 80825; Lomé Togo; Tél: 0022890865207; Email: mimidam@hotmail.com

Dr. Kossi Adjonou

Université de Ouagadougou, Laboratoire de Biologie et Ecologie Végétales ; 03 BP 7021, Ouagadougou 03, Burkina Faso; Tél: +226 70 23 82 61; Email: adjima_thiombiano@yahoo.fr

Prof. Larwanou Mahamane

Senior Programme Officer and Head of Programmes Management Unit; African Forest Forum (AFF); C/o World Agroforestry Center (ICRAF); United Nations Avenue; P.O. Box 30677-00100, Nairobi, Kenya; Phone: +254207224624; Email: M.larwanou@cgjar.org

Dr. Lizzie Mujuru

Senior Lecturer; Department of Environmental Science, Bindura University; Private Bag 1020, Bindura, Zimbabwe ; Tél/Fax: +263 271-6505, cell:+263 712 220 651/263; 730 352279/+263 735302279 Email: mujuru2004@yahoo.co.uk

Dr. Louis Sawadogo

Directeur de Recherche en Biologie et Ecologie Vegetales; CNRST/INERA; 03 BP 7047, Ouagadougou 03, Burkina Faso; Tél: 70255877; Email: sawadogo_ls@hotmail.com

Prof. Louis Zapfack

University of Yaounde 1, Faculty of Science, Department of Plant Biology; P.O. Box 812, Yaounde, Cameroon; Tél: +237-99-3396; Email: lzapfack@yahoo.fr

Mr. Macarthy Afolabi Oyebo

Chair, Governing Council, African Forest Forum; No. 3 Daniel Arap Moi Close; Off Maitama Sule Street, Asokoro; Abuja, Nigeria; Email: folas31@gmail.com

Dr. Massaoudou Moussa

Research Scientist, National Institute for Agricultural Research of Niger; BP 240, Maradi, Niger; Email : massaoudmoussa@yahoo.fr

Pr. Nacro H. Bismark

University Nazi Boni of Bobo Dioulasso; Tél: 70247825; Email: nacrohb@yahoo.fr

Prof. Paxie Chirwa

University of Pretoria; SAFCOL Forest Chair & Director, Postgraduate Forest Programme; RM 5-15, Plant Sciences Complex; Corner of Lynwood Rd & Roper St; Hatfield 0028; South Africa; Tél +27(0)12 420 3213/3177; Cell +27(0)82 852 3386; Email: paxie.chirwa@up.ac.za Alt Email: forestscience@up.ac.za; Extraordinary Prof of Forest Science, Stellenbosch University

Dr. Paul Donfack

Programme Officer; African Forest Forum (AFF); C/o World Agroforestry Center (ICRAF), United Nations Avenue; P.O. Box 30677-00100, Nairobi, Kenya; Tél: +254 020 7224485; Email: p.donfack@cgjar.org

Dr. Ouédraogo Issaka

Lecturer; Université de Ouagadougou; Laboratoire de Biologie et Ecologie Végétales; 03 BP 7021, Ouagadougou 03, Burkina; Email: sonrenoma@yahoo.fr

Dr. Ouédraogo Amadé

Lecturer, Université de Ouagadougou; Laboratoire de Biologie et Ecologie Végétales;
3 BP 7021, Ouagadougou 03, Burkina Faso;
Email: o_amade@yahoo.fr

Prof. Rajoelison Lalanirina Gabrielle

Head Department of Water and Forestry; School of Agronomy; University of Antananarivo;
BP 175, Antananarivo, Madagascar;
Tel. +261 32 46 060 16;
Email: g.rajoelison@yahoo.fr

Mr. Richard Banda

Principal, Zambia Forestry College; Ministry of Lands, Natural Resources and Environmental Protection
Private Bag 1, Mwekera; Kitwe, Zambia;
Tel. +260-212-252459; +260-212-251 460; Mobile: +260-966 845 945; Email: rbinda4@yahoo.com

Dr. Rodrigue Castro Gredomon

Head of Unit; Forest and People Livelihood Research Unit; Laboratoire de Bio-mathématiques et d'Estimations Forestières; University of Abomey-Calavi; Faculty of Agronomic Sciences; 4 P O. Box 1525, Cotonou, Benin;
Email: castro.gbedomon@fsa.uac.bj;
gbedomon@gmail.com

Dr. Shem Kuyah

Lecturer, Botany Department; Jomo Kenyatta University of Agriculture and Technology, P.O. Box 62000-00200 Nairobi, Kenya;
Mob. +254-721-590-198;
Email: kshem@jkuat.ac.ke, kuyashem@gmail.com

Dr. Salamatou I. Abdourahamane Senior

Lecturer; University of Diffa; BP 78 Diffa, Niger;
Tel: (00227) 90316959/ 96978635;
Email: assalamat2@yahoo.com

Dr. Tajudeen Okekunle Amusa

Lecturer; University of Ilorin; Fac., of Agriculture; Dept.of Forest Resources Management; PM.B 1515, Ilorin; Kwara State, Nigeria;
Tel: 08051750289; 07033831616;
Email: amusa.to@unilorin.edu.ng; teejayui@gmail.com

Dr. Vincent Onguso Oeba

Programme Officer; African Forest Forum (AFF) ; C/o World Agroforestry Center (ICRAF), United Nations Avenue; P.O. Box 30677-00100; Nairobi, Kenya;
Phone: +254207224000 Ext 4048;
Email: v.oeba@cgiar.org and vongusoeba@gmail.com

Dr. Wilson Kasolo

Executive Secretary; ANAFE; c/o World Agroforestry Centre (ICRAF); P.O. Box 30677-00100, Nairobi, Kenya;
Email: W.KASOLO@cgiar.org
Prof. Winston J. Akala
Dean School of Education, College of Education and External Studies, University of Nairobi; PO Box 30197-00100, Nairobi, Kenya,
Tel: 066-32117/32020/29, Cell: +254723432546,
Email: akala@uonbi.ac.ke; akalajumba@yahoo.com

Prof. Zac Tchoundjeu

Higher Institute of Environmental Sciences; PO Box 35460; Yaounde, Cameroon;
Phone: +237-677 707582;
Email: z.tchoundjeu@cgiar.org



Forum forestier africain

Une plateforme pour les acteurs du secteur forestier africain



Forum forestier africain

United Nations Avenue, Gigiri
B. P. 30677-00100
Nairobi, Kenya

Tél : +254 20 722 4203
Fax : +254 20 722 4001
Site Web : www.afforum.org

ISBN 978-9966-7465-2-8



9 789966 746528

