

Cadre TASK : Systèmes Terre → Domaine : Limites planétaires fondamentales → Sujet : 1.1.1 – Changement Climatique

Définition : Variation de l'état du climat qu'on peut déceler (au moyen de tests statistiques, etc.) par des modifications de la moyenne et/ou de la variabilité de ses propriétés et qui persiste pendant une longue période, généralement pendant des décennies ou plus. Les changements climatiques peuvent être dus à des processus internes naturels ou à des forçages externes, notamment les modulations des cycles solaires, les éruptions volcaniques ou des changements anthropiques persistants dans la composition de l'atmosphère ou dans l'utilisation des terres ([GIEC, 2022](#)).

1. Principes du climat terrestre

- Climat vs. météo
- Température moyenne de surface globale
- Causes des variations climatiques naturelles
 - Variations du cycle du carbone
 - Variations du rayonnement solaire
 - Variations de l'orbite terrestre
 - Variations de l'activité volcanique
- Causes des variations climatiques anthropiques
 - Perturbation de l'équilibre du cycle du carbone
- Absorption du CO₂ par les plantes via la photosynthèse
- Rôle d'El Niño et de La Niña
- Rôle des courants océaniques (AMOC)

2. L'effet de serre

- Science établie au XIX^e siècle
- Gaz à effet de serre naturels
- Gaz à effet de serre : CO₂, N₂O, CH₄, CFC, H₂O (vapeur d'eau et nuages)
- Réflexion / absorption du rayonnement solaire
- Bilan / budget énergétique de la Terre (énergie absorbée vs. énergie réémise)
- Émissions de CO₂ et équivalent CO₂ (CO₂-eq)

3. Changement climatique anthropique

- L'Anthropocène (signification / débat)
- La « Grande Accélération » et la mondialisation
- Émissions anthropiques de GES
- Concentration atmosphérique de CO₂ (parties par million – ppm)
 - CO₂ à l'ère glaciaire : ≈ 200 ppm
 - CO₂ en période interglaciaire (Holocène) : ≈ 280 ppm
 - CO₂ actuel de l'Anthropocène : ≈ 425 ppm et réchauffement global de +1,47 °C

4. Déséquilibre du carbone — causes et tendances

- Causes principales : émissions de GES et changements des systèmes terrestres (notamment la déforestation)
- Principaux secteurs émetteurs de CO₂ : énergie fossile, agriculture (déforestation), élevage, transport, gaspillage / pertes alimentaires, ciment
- Efforts de réduction des émissions de GES
- Pollution et charge en aérosols
- Effet d'albédo et boucles de rétroaction

5. Impacts sur l'air et l'eau

- Atmosphère
 - Hausse des températures : réchauffement global, vagues de chaleur, feux de forêt, réchauffement accéléré de l'Arctique
 - Phénomènes météorologiques extrêmes (pluies, tempêtes, etc.)
- Hydrosphère
 - Réchauffement des océans (vagues de chaleur marine)
 - Acidification des océans
 - Élévation du niveau de la mer (dilatation thermique et fonte des glaces terrestres)
 - Altération de la circulation océanique (AMOC)
 - Affaiblissement de la fonction d'absorption du carbone par les océans
 - Précipitations modifiées
 - Stress hydrique / abondance d'eau — sécheresse, feux de forêt, désertification, inondations
 - Impact sur les aquifères et eaux souterraines

6. Impacts sur les terres, la glace et la vie

- Lithosphère
 - Inondations / érosion
 - Chaleur / feux de forêt / désertification
 - Baisse de l'humidité des sols
- Cryosphère
 - Perte globale de glace — glaciers, banquise, pôles, manteau neigeux, etc.
 - Fonte du pergélisol (libération de méthane — CH₄)
- Biosphère
 - Perte de biodiversité
 - Stress / migration / disparition / extinction des espèces
 - Perte et destruction des habitats marins (ex. blanchissement des coraux dû à la hausse des températures de l'eau et à l'acidification)
 - Déclin des amphibiens d'eau douce
 - Déclin des chaînes alimentaires (ex. stocks de poissons, phytoplancton, etc.)

7. Impacts sur le bien-être humain

- Événements climatiques extrêmes
- Migration (due au climat, aux conflits, à l'inondation côtière, à l'accès aux ressources, etc.)
- Réfugiés climatiques (phénomènes météorologiques extrêmes, chaleur, inondations, épuisement des sols, etc.)
- Pandémies / maladies infectieuses / parasites / nouveaux microbes (ex. pergélisol en fonte)
- Santé humaine (coup de chaleur, déshydratation, etc.)
- Sécurité alimentaire (terrestre et marine)
- Mauvaises récoltes et perte de terres cultivables et de pâturages
- Stress hydrique / contamination de l'eau douce
- Sécurité énergétique
- Inondations côtières et fluviales
- Événements météorologiques extrêmes

8. Science du réchauffement planétaire

- Sensibilité climatique (variation de température en fonction du CO₂)
- Équilibre climatique vis-à-vis de la neutralité carbone (net zéro GES)
- Forçage radiatif / climatique (modification de l'équilibre énergétique due à des facteurs externes)
- Rétroactions climatiques / boucles de rétroaction
- Seuils climatiques / points de bascule
- Modélisation climatique (ex. graphique en « crosse de hockey », fonte de la glace de mer, circulation des fluides, bilan énergétique, etc.)
- Force probante de la science du climat
- Consensus scientifique sur le changement climatique

Bibliographie sélective

1. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2021). *Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report*.
<https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>
2. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2022a). *Climate change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report*.
<https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/>
3. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2022b). *Climate change 2022: Mitigation of climate change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report*.
<https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/>
4. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2023). *Climate change 2023: Synthesis report*.
<https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>
5. United Nations. (n.d.-e). *Sustainable Development Goals (17 goals, targets, indicators & progress)*.
<https://sdgs.un.org/goals>
6. Steffen, W., Richardson, K., Rockström, J., et al. (2015). Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. *Science*, 347(6223). <https://doi.org/10.1126/science.1259855>
7. Stockholm Resilience Centre. (2025). *Planetary boundaries research overview (updated)*.
<https://www.stockholmresilience.org/research/planetary-boundaries.html>
8. United Nations. (2022). *The Sustainable Development Goals report 2022*.
<https://unstats.un.org/sdgs/report/2022/>
9. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO). (2017). *Education for sustainable development goals: Learning objectives*.
<https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000247444>

Principaux accords et cadres internationaux

- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) — 1988
- United Nations Conference on Environment and Development (Earth Summit) — 1992
- United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) — 1994
- Conference of the Parties (COP) — 1995–2025
- Kyoto Protocol — 1997
- Paris Agreement (Paris Climate Accord) — 2015

Cadre TASK : Système Terre → Domaine : Limites planétaires fondamentales → Sujet : 1.1.2 – Intégrité de la biosphère

Définition : « L'intégrité de la biosphère désigne la capacité des écosystèmes de la planète à soutenir la vie et à préserver la santé et la stabilité globales du système Terre. Elle repose sur la vitalité, la diversité et les interactions entre les organismes qui composent ces écosystèmes. » ([Planetary Boundaries Science Lab, 2025](#)). Elle englobe « la diversité, l'étendue et l'état de santé des organismes vivants et des écosystèmes, qui influencent l'état général de la planète en co-régulant les flux d'énergie et les cycles chimiques. La perturbation de la biodiversité compromet cette co-régulation et la stabilité dynamique de la Terre. » ([Stockholm Resilience Center, 2025](#)).

1. Principes fondamentaux de l'intégrité de la biosphère

- Biodiversité : diversité génétique et fonctionnelle, hotspot de biodiversité
- Fonctionnement des écosystèmes : flux d'énergie, cycles de la matière, cycles de l'eau, production primaire, photosynthèse
- Biomes, écosystèmes, habitats, espèces
- Interdépendance entre espèces, réseaux trophiques, niveaux trophiques
- Espèces indicatrices, espèces clés de voûte
- Écosystèmes marins : récifs coralliens, mangroves, estuaires, haute mer, zones polaires, etc.
- Écosystèmes d'eau douce : zones humides, lacs, étangs, cours d'eau, rivières, etc.
- Écosystèmes terrestres : forêts, déserts, prairies, toundra, montagnes, etc.

2. La 6^{ème} extinction

- Perte de biodiversité : génétique ou fonctionnelle, temporaire ou définitive (extinction, effondrement)
- Épisodes d'extinctions massives — passés et présents
- Taux d'extinction : actuellement 100 à 1 000 fois supérieur au taux naturel
- Indice d'intégrité de la biodiversité (Biodiversity Intactness Index, BII)
- Liste rouge de l'UICN : Éteint (EX), Éteint à l'état sauvage (EW), En danger critique (CR), En danger (EN), Vulnérable (VU), Quasi menacé (NT), Préoccupation mineure (LC)
- Déclin des invertébrés terrestres : insectes, pollinisateurs, araignées, vers de terre, etc.
- Menaces pesant sur les espèces d'eau douce (notamment les amphibiens)
- Effets sur la vitesse et les trajectoires de migration, et sur la gestion transfrontalière des zones protégées

3. Facteurs indirects de l'érosion de la biodiversité

- Démographie : dynamique de population, urbanisation, artificialisation des sols
- Technologie : agriculture intensive moderne (monocultures, pesticides), culture de biomasse
- Économie : industries extractives, production concentrée, échanges commerciaux et flux financiers
- Gouvernance : marchés, communautés locales, États, politiques publiques
- Comportements : modes de production et de consommation non durables, utilisation des ressources, commerce, gestion des déchets
- Analphabétisme écologique et déconnexion croissante entre l'humain, la nature et les services écosystémiques

4. Facteurs directs de l'érosion de la biodiversité

- Changements d'utilisation des sols et des mers : agriculture, élevage, sylviculture, exploitation minière, infrastructures, urbanisation, etc.
- Surexploitation des organismes : chasse, surpêche, exploitation forestière, commerce d'espèces sauvages, animaux exotiques, récoltes, etc.
- Changement climatique : émissions de GES, perturbation des régimes thermiques, acidification des océans
- Pollution : excès de nutriments, plastiques, contaminants chimiques, entités nouvelles, pollution atmosphérique, bruit, lumière
- Espèces exotiques envahissantes : animaux, plantes, champignons et micro-organismes introduits volontairement ou accidentellement

5. Éthique, bien-être animal et droits des écosystèmes

- Mammifères sauvages sont minoritaires, dominés par le bétail et les humains
- Utilisations massives des animaux : élevage, viande, produits laitiers, aquaculture, tests médicaux, etc.
- Spécisme / hiérarchisation des espèces
- Séparation culture-nature : l'humain comme distinct de la nature
- Contre-mouvements : antispécisme, défense des droits animaux, véganisme
- L'écocide comme crime international émergent ; reconnaissance des droits de la nature

6. Impact du changement climatique sur la biodiversité

- Effets sur les milieux naturels : hausse des températures, élévation du niveau de la mer, fonte des glaciers, acidification des océans, blanchissement des coraux, etc.
- Effets sur les êtres vivants : déplacement des aires de répartition, modification des cycles biologiques, hausse des risques de maladies, pandémies et zoonoses
- Rôle des écosystèmes : puits de carbone, zones tampons essentiels pour l'atténuation et l'adaptation au changement climatique

7. Services écosystémiques

- Capital naturel : écosystèmes fournissant des bénéfices aux humains
- Services de régulation : création d'habitats, pollinisation, régulation de la qualité de l'air, fertilité des sols, quantité-qualité de l'eau
- Services d'approvisionnement : énergie, nourriture, ressources médicinales
- Services culturels : inspiration, loisirs, identité, spiritualité, bien-être psychologique
- Services de support : processus écologiques qui soutiennent les autres (p. ex. cycles des nutriments, production primaire)

8. Cultures autochtones et intégrité de la biosphère

- Les territoires autochtones couvrent 22 % de la surface terrestre et abritent 80 % de la biodiversité restante
- Savoirs écologiques traditionnels, systèmes de croyances, visions du monde
- Principes : responsabilité intergénérationnelle, gestion durable, respect, coexistence harmonieuse
- Pratiques : gouvernance territoriale autochtone, gestion des terres, pratiques bioculturelles

Bibliographie sélective

1. Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services (IPBES). (2019). Global assessment report on biodiversity and ecosystem services. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3831673>
2. Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services (IPBES) & Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2021). IPBES-IPCC co-sponsored workshop report on biodiversity and climate change. <https://www.ipbes.net/events/ipbes-ipcc-co-sponsored-workshop-biodiversity-and-climate-change>
3. Persson, L., et al. (2022). Outside the safe operating space of the planetary boundary for biosphere integrity. Environmental Science & Technology, 56(3), 1510–1521. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c04158> United Nations. (n.d.-a).
4. United Nations. Sustainable Development Goal 14: Life Below Water. <https://sdgs.un.org/goals/goal14>
5. United Nations. Sustainable Development Goal 15: Life on Land. <https://sdgs.un.org/goals/goal15>
6. Steffen, W., Richardson, K., Rockström, J., et al. (2015). Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. Science, 347(6223). <https://doi.org/10.1126/science.1259855>
7. United Nations. The Sustainable Development Goals: Global data & report portal. <https://unstats.un.org/sdgs/>
8. United Nations Environment Programme (UNEP). (2021). Making peace with nature: A scientific blueprint to tackle the climate, biodiversity and pollution emergencies. <https://sdgs.un.org/publications/publication-making-peace-nature-scientific-blueprint-tackle-climate-biodiversity-and>
9. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO). (2017). Education for sustainable development goals: Learning objectives. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000247444>
10. Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services (IPBES). (2024a). Transformative change assessment – media release. <https://www.ipbes.net/transformative-change/media-release>
11. Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services (IPBES). (2024b). Nexus assessment – media release. <https://www.ipbes.net/nexus/media-release>
12. International Union for Conservation of Nature (IUCN). (annual). Annual editions available at: <https://iucn.org/about-iucn/accountability-and-reporting/annual-reports>
13. Global Goals. (2025). Guardians of the Earth: The essential role of Indigenous Peoples in the protection of natural resources. <https://globalgoals.org/news/guardians-of-the-earth-the-essential-role-of-indigenous-peoples-in-the-protection-of-natural-resources/>

Principaux accords et cadres internationaux

- Ramsar Convention on Wetlands — 1971
- World Heritage Convention — 1972
- Convention on International Trade in Endangered Species of Wild Fauna and Flora (CITES) — 1975
- Convention on the Conservation of Migratory Species (CMS) — 1979
- Convention on Biological Diversity (CBD) — 1992
- Nagoya Protocol on Access and Benefit-Sharing — 2010
- Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services (IPBES) — 2012
- Kunming-Montreal Global Biodiversity Framework (GBF) — 2022

Cadre TASK : Système Terre → **Domaine :** Limites planétaires régulatrices → **Sujet :** 1.2.1 – Utilisation de l'eau douce

Définition : L'utilisation de l'eau douce désigne le prélèvement ou l'extraction d'eau provenant de sources naturelles — rivières, lacs, nappes souterraines — pour répondre aux besoins humains. Elle englobe l'ensemble des prélèvements et de la consommation humaine d'eau douce à faible salinité, une ressource limitée, indispensable à la vie et intimement liée à la santé du système terrestre ([Sustainability Directory](#), 2025) « Les humains sont désormais la principale force modifiant les flux fluviaux à l'échelle planétaire [...]. Ces manipulations globales du cycle de l'eau douce affectent la biodiversité, la sécurité alimentaire et sanitaire, ainsi que le fonctionnement écologique — notamment la création d'habitats pour le renouvellement des poissons, le stockage du carbone et la régulation du climat — compromettant la résilience des écosystèmes terrestres et aquatiques. » ([Rockström & Steffen, 2009](#), p. 46-47).

1. Cycle naturel de l'eau

- Cycle global de l'eau
- Cycle hydrologique / rôle de l'eau douce
- Cycles du carbone et des nutriments dans les milieux d'eau douce
- Évapotranspiration et précipitations
- Rareté de l'eau : causes (sécheresses, surexploitation) ; impacts (pénuries, restrictions, rationnement)
- Abondance d'eau : Causes (fortes pluies, fonte rapide des neiges) ; impacts (inondations, érosion des sols)
- Proportion d'eau douce par rapport à l'eau salée
- Proportion d'eau douce accessible par rapport aux réserves totales

2. L'eau "bleue" — Réserves et flux

- Définition de l'eau bleue
- Échelle globale vs échelle d'un bassin versant ; cycles hydrologiques régionaux
- Eaux de surface : lacs, rivières, réservoirs — son importance écologique et économique
- Eaux souterraines : aquifères, puits — rôle vital pour l'agriculture et l'eau potable
- Interactions entre eaux de surface et eaux souterraines : zones de recharge et de décharge, impacts sur la disponibilité en eau
- Répartition mondiale de l'eau douce
- Ressources et approvisionnement en eau douce

3. L'eau "verte" — Réserves et flux

- Rôle de l'eau verte dans les agroécosystèmes : croissance des cultures, maintien de l'humidité des sols
- Causes anthropiques de perturbation de :
 - La précipitation : changement d'usage des sols, émissions de GES et d'aérosols
 - L'évaporation : expansion agricole et pastorale, émissions de CO₂
 - L'humidité des sols : intensification agricole, urbanisation, modification des précipitations et de l'évaporation
- Impact différencié des activités humaines (ex. déforestation) sur l'eau bleue et l'eau verte

4. Utilisation (abusiv) de l'eau douce

- Croissance démographique et urbanisation comme moteurs de l'augmentation massive de la consommation d'eau (surtout souterraine)
- Empreinte hydrique
- Usage agricole : irrigation, élevage
- Usage industriel : production, rejets
- Usage domestique : boisson, assainissement, loisirs
- Aquaculture : poissons et mollusques
- Énergie : hydroélectricité, refroidissement des centrales et des data centers
- Technologies : dessalement, recyclage, collecte d'eau, innovations

5. Pollution de l'eau

- Types, sources et volumes de pollution de l'eau
- Eutrophisation : causes, effets
- Pollution azotée (engrais)
- Pollution phosphorée (détergents)
- Contamination par pesticides et herbicides : impact sur la vie aquatique, bioaccumulation
- Pollution aux microplastiques
- Métaux lourds
- Résidus pharmaceutiques
- Impacts sur la santé humaine : maladies à transmission hydriques, pathologies chroniques

6. Menaces sur les ressources en eau douce

- Surexploitation : épuisement des aquifères, dégradation des nappes, lacs et réservoirs
- Changement climatique : précipitations modifiées, évaporation accrue, intrusions salines, désertification
- Destruction d'habitats : barrages, dérivations de rivières, drainage des zones humides, urbanisation, artificialisation des sols
- Conversion des terres : perte de biodiversité, hausse des émissions de carbone, disparition des défenses naturelles contre les inondations
- Déforestation : ruissellement accru, infiltration réduite, envasement des cours d'eau
- Stockage de l'eau : mégabassines
- Menaces pour les écosystèmes côtiers

7. Écosystèmes d'eau douce et biodiversité

- Types d'écosystèmes d'eau douce : zones humides, lacs, rivières ; caractéristiques et diversité
- Importance de la biodiversité d'eau douce : espèces indicatrices, services écosystémiques, ressources génétiques
- Réseaux trophiques d'eau douce : niveaux trophiques, espèces clés, impacts des pertes d'espèces

8. Impacts de la rareté et de la surabondance en eau

- Santé : maladies hydriques, malnutrition due aux pertes de récoltes
- Société : précarité, réfugiés climatiques
- Conflits liés à l'eau, guerres de l'eau (*Tigre et Euphrate, Égypte-Éthiopie, Colorado, etc.*)
- Éducation : temps consacré à la collecte d'eau réduisant la scolarité, surtout des filles
- Sol : excès de prélèvements entraînant dégradation, tassement, affaissements

Bibliographie sélective	Principaux accords et cadres internationaux
- Intergovernmental Science–Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services (IPBES). (2019). <i>Summary for policymakers – The global assessment report on biodiversity and ecosystem services</i>. https://doi.org/10.5281/zenodo.3553458 ict.ipbes.net+2zenodo.org+2 - Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2022). <i>Climate Change 2022: Impacts, adaptation, and vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report</i>. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/downloads/report/IPCC_AR6_WGII_SummaryForPolicymakers.pdf - Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2023). <i>Climate Change 2022: AR6 Synthesis Report: Climate Change</i>. https://ipcc.ch/report/ar6/syr/ - Rockström, J., Gupta, J., Qin, D., et al. (2023). Safe and just Earth system boundaries. <i>Nature</i>, 619, 102–111. https://doi.org/10.1038/s41586-023-06083-8 - United Nations. (n.d.). <i>Sustainable Development Goals: The 17 goals, 169 targets, overview, indicators, progress & info</i>. Retrieved from https://sdgs.un.org/goals - Steffen, W., Richardson, K., Rockström, J., et al. (2015). Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. <i>Science</i>, 347(6223). https://doi.org/10.1126/science.1259855 - United Nations. (2022). <i>The United Nations World Water Development Report 2022: Groundwater: Making the invisible visible</i>. UNESCO, Paris. Retrieved from https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000380721 UNESCO+2UNDP+2 - Wang-Erlandsson, L., Tobian, A., van der Ent, R. J., et al. (2022). A planetary boundary for green water. <i>Nature Reviews Earth & Environment</i>, 3, 380–392. https://doi.org/10.1038/s43017-022-00287-8 - United Nations. (2024). <i>The United Nations World Water Development Report 2024: Water for Peace and Prosperity</i>. UNESCO, Paris. Retrieved from https://www.unwater.org/publications/un-world-water-development-report-2024 - UNESCO. (2020). <i>United Nations World Water Development Report 2020: Water and Climate Change</i>. Paris: UNESCO. Retrieved from https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000372985.locale=en - WWAP (UNESCO World Water Assessment Programme). (2019). <i>The United Nations World Water Development Report 2019: Leaving No One Behind</i>. Paris: UNESCO. Retrieved from https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000367306 - OECD. (n.d.). <i>The OECD Principles on Water Governance and Implementation Strategy</i>. Retrieved from https://www.oecd.org/en/topics/sub-issues/water-governance/the-oecd-principles-on-water-governance-and-implementation-strategy.html - Transformative Water Pact. (n.d.). <i>Transformative Water Pact</i>. Retrieved from https://www.transformativewaterpact.org/	- Ramsar Convention on Wetlands — 1971 - UNESCO Intergovernmental Hydrological Programme (IHP) — 1975 - United Nations Water Conference — 1977 - Dublin Statement on Water and Sustainable Development — 1992 - Convention on the Protection and Use of Transboundary Watercourses and International Lakes — 1996 - UN Watercourses Convention — 1997

Cadre TASK : Système Terre → **Domaine** : Limites Planétaires Régulatrices → **Sujet** : 1.2.2 – Changement d'utilisation des sols

Définition : Les systèmes terrestres regroupent « l'ensemble des processus et des activités liés à l'usage humain des terres » ([Verburg et al., 2015](#)). Les transformations des systèmes terrestres ont des effets à la fois locaux et globaux sur l'environnement et le bien-être humain. Les forêts, par leur présence ou leur absence, influencent le climat mondial plus fortement que tout autre changement d'usage des sols. L'agriculture moderne constitue aujourd'hui l'un des principaux moteurs de la modification des usages du sol à l'échelle planétaire.

1. Utilisations des sols et services écosystémiques • Usages des sols : production alimentaire, habitat, transport, exploitation des ressources naturelles, énergie, industrie, etc • Services écosystémiques : production alimentaire, pollinisation, ressources naturelles, etc. • Régulation du climat, approvisionnement en eau, stockage du carbone, etc. • Services culturels, spirituels, religieux ou rituels	2. Les forêts comme utilisation des terres • Déforestation, reforestation, afforestation • Forêts primaires • Biomes forestiers : tropicaux, boréaux, tempérés • Facteurs de déforestation • Taux de couverture forestière • Gestion forestière et production de bois	3. Cause majeure : démographie et économie • Croissance démographique et urbanisation : augmentation de la demande en nourriture, logements et infrastructures • Évolution des modes de consommation : hausse de la demande en viande, produits laitiers, huile de palme, bois et produits agricoles • Amélioration du niveau de vie : extension des zones urbanisées et modes de vie plus énergivores • Mondialisation des échanges alimentaires et des matières premières : réorientation de l'usage local des sols vers les marchés d'export, pressions sur la souveraineté alimentaire locale	4. Cause majeure : l'agriculture moderne • Révolution verte (Haber-Bosch), mécanisation, spécialisation, intensification pour répondre aux besoins croissants • Systèmes agricoles intensifs, très consommateurs de ressources, aux impacts sociaux et environnementaux souvent négligés • Dégradation de la santé et de la fertilité des sols avec des conséquences à long terme • Mécanismes de dégradation des terres : irrigation, salinisation, fertilisation excessive et eutrophisation, surpâturage, déforestation, érosion, désertification, pollutions physiques-chimiques-biologiques, destruction d'habitats naturels
5. Cause majeure : urbanisation • Transition démographique du second XX^e siècle : 70 % de la population mondiale vit aujourd'hui en ville • Formes d'occupation humaine : zones urbaines à forte densité, étalement périurbain, zones rurales • Augmentation de l'utilisation des sols pour les besoins industriels, logistiques et commerciaux • Mécanismes de dégradation liés à l'urbanisation : artificialisation, compaction des sols, problèmes hydriques, eutrophisation, pollutions physiques et chimiques	6. Facteurs émergents • Production énergétique : demande en surface pour les parcs solaires, cultures de biocarburants, barrages hydroélectriques, infrastructures renouvelables • Industries minières et extractives : destruction des habitats, pollutions, dégradation à long terme des sols et des eaux • Extraction du bois : déforestation et perte de biodiversité	7. Enjeux et dynamiques rurales • Exode rural, appauvrissement des zones rurales, aggravation des inégalités • Politiques de développement rural • Droits (autochtones) sur l'accès aux terres, territoires et ressources • Accaparement des terres, pratiques néocoloniales, corruption, violences et assassinats liés aux conflits environnementaux	8. Impacts du changement d'utilisation des sols • Impacts climatiques : forêts, prairies et zones humides jouent un rôle clé comme puits de carbone • Perte de biodiversité : destruction d'habitats naturels, accélération de l'effondrement du vivant • Rétroactions écologiques : écosystèmes dégradés = régulation climatique affaiblie, cycles de l'eau et des nutriments perturbés, baisse de la sécurité alimentaire • Impacts humains et culturels : moyens de subsistance locaux, systèmes alimentaires, cultures autochtones

Bibliographie sélective

1. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2024). *The State of the World's Forests*. <https://doi.org/10.4060/cd1211en> [FAOHome](#)
2. Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services (IPBES). (2019). *SPM – The global assessment report on biodiversity and ecosystem services – Summary for policymakers*. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3553458>
3. United Nations. (n.d.). *Sustainable Development Goals: The 17 Goals, 169 targets, overview, indicators, progress & info*. Retrieved from <https://sdgs.un.org/goals>
4. Steffen, W., Richardson, K., Rockström, J., et al. (2015). Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. *Science*, 347(6223). <https://doi.org/10.1126/science.1259855>
5. United Nations. (annual). *The Sustainable Development Goals Report*. Annual editions available at: <https://unstats.un.org/sdgs>
6. United Nations. (2022). *Convention on Biological Diversity – Kunming Montreal Global Biodiversity Framework*. Retrieved from <https://www.cbd.int/doc/c/e6d3/cd1d/daf663719a03902a9b116c34/cop-15-l-25-en.pdf> [Convention on Biological Diversity+](#)
7. United Nations Department of Economic and Social Affairs. (2021). *Global Forest Report*. Retrieved from <https://desapublications.un.org/publications/global-forest-goals-report-2021>
8. United Nations Department of Economic and Social Affairs. (2021). *The State of the World's Indigenous Peoples (SOWIP), Vol. 5: Rights to land, territories, resources*. Retrieved from <https://www.un.org/development/desa/indigenouspeoples/publications/state-of-the-worlds-indigenous-peoples.html>
9. United Nations Department of Economic and Social Affairs. (2021). *World Social Report 2021: Reconsidering rural development*. Retrieved from https://www.un.org/development/desa/dspd/wp-content/uploads/sites/22/2021/05/World-Social-Report-2021_web_FINAL.pdf
10. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO). (2020). *Education for sustainable development goals: Learning objectives & discussion topics*. Retrieved from <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000247444>
11. Verburg, P. H., Crossman, N. D., Ellis, E., et al. (2015). Land system science and sustainable development of the Earth system: A global land project perspective. *Anthropocene*, 12, 29–41. <https://doi.org/10.1016/j.ancene.2015.09.004>
12. Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). (2020). *Towards sustainable land use*. Retrieved from https://www.oecd.org/en/publications/towards-sustainable-land-use_3809b6a1-en.html

Principaux accords et cadres internationaux

- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) – 1945
- United Nations Convention to Combat Desertification (UNCCD) – 1994
- Convention on Biological Diversity (CBD) – 1992
- United Nations Environment Programme (UNEP) – 1972
- Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services (IPBES) – 2012
- State of the World's Forests (FAO Flagship Report Series) – 1995–present
- Global Forest Goals (UN DESA / UN Forum on Forests) – 2017
- Kunming–Montreal Global Biodiversity Framework (GBF) – 2022

Cadre TASK : Système Terre → **Domaine** : Limites Planétaires Régulatrices → **Sujet** : 1.2.3 – Acidification des océans

Définition : L'acidification des océans correspond à une baisse durable du pH de l'eau de mer, généralement sur plusieurs décennies ou plus. Cette baisse s'accompagne de modifications chimiques — principalement des variations des ions carbonate et bicarbonate — et résulte avant tout de l'absorption du dioxyde de carbone (CO₂) atmosphérique par les océans. L'acidification anthropique désigne la part de cette diminution de pH directement causée par les activités humaines ([IPCC, 2011, p. 37](#)).

1. Principes de l'acidification des océans

- Diminution du pH de l'eau de mer (augmentation de l'acidité)
- Acidification intégrée au cycle du carbone via l'absorption du CO₂
- Rôle des océans dans le bilan carbone mondial : puits de carbone marins et côtiers
- Composition et chimie de l'eau de mer

2. Causes et lien avec le changement climatique

- Causes naturelles : activité volcanique, décomposition de la matière organique, respiration des organismes marins
- Causes anthropiques : absorption accrue du CO₂ émis par l'homme, hausse historique et projetée des concentrations atmosphériques
- Acidification liée aux ruissellements terrestres (ex. excès d'azote provenant des activités agricoles)
- Secteurs économiques responsables d'émissions de CO₂
- Boucle de rétroaction positive entre acidification des océans, réchauffement climatique et dérèglement du cycle du carbone
- Dérégulation des cycles

3. Impacts sur la vie marine et les écosystèmes côtiers

- Effets négatifs sur les organismes calcifiants (coraux, mollusques, certains planctons) : difficulté à former des squelettes et des coquilles, plus grande vulnérabilité aux prédateurs, réduction des taux de survie
- Déclin de la biodiversité
- Menaces pour les poissons et autres organismes non calcifiants
- Perturbation des chaînes alimentaires et des fonctions écosystémiques

4. Impacts socio-économiques et sanitaires

- Implications pour la sécurité alimentaire (pêcheries et aquaculture)
- Impacts sur les régimes côtiers, surtout dans les pays à faible revenu et les États insulaires
- Effets négatifs sur la santé : toxicité des produits de la mer, maladies
- Impacts sur l'emploi dans les pêcheries et les industries de transformation
- Impact sur le tourisme côtier

Bibliographie sélective	Principaux accords et cadres internationaux
1. Doney, S. C. (2009). Anticipating ocean acidification's economic consequences for commercial fisheries. <i>Environmental Research Letters</i>, 4(2), 024007. https://doi.org/10.1088/1748-9326/4/2/024007 2. Feely, R. A., Doney, S. C., & Cooley, S. R. (2009). Ocean acidification: Present conditions and future changes in a high-CO₂ world. <i>Oceanography</i>, 22(4), 36–47. https://doi.org/10.5670/oceanog.2009.95 3. Gattuso, J.-P., et al. (2018). Ocean solutions to address climate change and its effects on marine ecosystems. <i>Frontiers in Marine Science</i>, 5, Article 337. https://doi.org/10.3389/fmars.2018.00337 4. Hoegh-Guldberg, O., et al. (2007). Coral reefs under rapid climate change and ocean acidification. <i>Science</i>, 318(5857), 1737–1742. https://doi.org/10.1126/science.1152509 5. Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services (IPBES). (2019). Global assessment report on biodiversity and ecosystem services. https://doi.org/10.5281/zenodo.3831673 6. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2021). Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the IPCC. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_SPM.pdf 7. Orr, J. C., et al. (2005). Anthropogenic ocean acidification over the twenty-first century and its impact on calcifying organisms. <i>Nature</i>, 437(7059), 681–686. https://doi.org/10.1038/nature04095 8. Orr, J. C., et al. (2009). Research priorities for understanding ocean acidification: Summary from the Second Symposium on the Ocean in a High-CO₂ World. <i>Oceanography</i>, 22(4), 182–189. https://doi.org/10.5670/oceanog.2009.107 9. Steffen, W., Richardson, K., Rockström, J., et al. (2015). Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. <i>Science</i>, 347(6223). https://doi.org/10.1126/science.1259855 10. Wallace, R. B., Baumann, H., Gear, J. S., Aller, R. C., & Gobler, C. J. (2014). Coastal ocean acidification: The other eutrophication problem. <i>Estuarine, Coastal and Shelf Science</i>, 148, 1–13. https://doi.org/10.1016/j.ecss.2014.05.027	• United Nations Convention on the Law of the Sea (UNCLOS) – 1982 • United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) – 1992 • Aichi Biodiversity Targets (Convention on Biological Diversity) – 2010 • Monaco Declaration (Second International Symposium on the Ocean in a High-CO₂ World) – 2008 • Paris Agreement (UNFCCC) – 2015

Cadre TASK : Système Terre → **Domaine** : Limites Planétaires Régulatrices → **Sujet** : 1.2.4 – Entités nouvelles

Définition : Les entités nouvelles désignent des substances inédites, de nouvelles formes de substances existantes, ou des organismes vivants modifiés — incluant des produits chimiques, des matériaux ou des organismes conçus — qui n'existaient pas auparavant dans le système Terre. Elles comprennent aussi des éléments naturels (comme des métaux lourds) mobilisés par les activités humaines. Toutes ont un potentiel d'effets géophysiques ou biologiques indésirables. ([Persson, 2022](#))

1. Caractéristiques principales

- Présentes sous formes naturelles ou synthétiques
- Incluent des substances xénobiotiques (ex. plastiques)
- Diversité, mobilité, persistance, dispersion (capacité de transport à longue distance, p. ex. pluies acides)
- Toxicité inconnue ou mal évaluée
- Effets potentiels : localisés, cumulatifs, bioaccumulés, multiplicatifs, imprévisibles, irréversibles, généralisés, intensification chimique
- Apports potentiels pour la science, l'industrie ou la médecine
- Utilisation en énergies renouvelables et technologies vertes : électronique, voitures électriques, batteries, éoliennes, panneaux solaires, fibres optiques... mais avec la création de déchets électroniques...

2. Dangers liés aux premiers produits chimiques

- POPs — Polluants organiques persistants (ex. dioxines)
- DDT — Dichlorodiphényltrichloroéthane
- PCB — Polychlorobiphényles
- EPPP — Polluants pharmaceutiques persistants dans l'environnement (ex. antibiotiques)
- COV / VOC — Composés organiques volatils
- Présence de plomb : peintures, tuyaux, essence, aliments, contenants alimentaires (poterie), fluides de refroidissement
- Benzène : colorants, détergents, bouteilles plastiques
- Cas célèbres :
 - Catastrophes chimiques : Bhopal, Flint (Michigan), Agent Orange, Beyrouth
 - Catastrophes nucléaires : Tchernobyl, Fukushima, Three Mile Island, Sellafield

3. Plastiques – déchets, dangers, pollution marine

- Polymères, monomères et solvants plastiques
- Tailles : macro (>5 mm), micro (<5 mm), nano (<1 µm)
- Formes : granulés ("nurdles"), fragments, poudre, fibres textiles, microbilles, etc.
- Présents dans les chaînes alimentaires
- Présents dans l'air, les nuages, les sols, la neige, la glace...
- La majorité finit dans les océans
- Additifs : colorants, plastifiants, stabilisants, résistance UV, imperméabilisation, retardateurs de flamme, etc.
- Principaux producteurs de déchets plastiques : Coca-Cola, PepsiCo, Nestlé, Unilever
- Exemples : Le continent de déchets du Pacifique nord" (et autres)

4. PFAS et les "polluants éternels"

- Immense famille des PFAS (composés polyfluoroalkylés)
- Types : PFOS, PFBA, PFOA, PFNA, etc.
- Présents dans les sols, la pluie, la glace arctique, l'air, l'eau de fonte, la nourriture...
- PFAS à chaîne longue (années 1940), chaîne courte (années 1970)
- Utilisations : produits de nettoyage, peintures, mousses anti-incendie, textiles résistants à l'eau et aux tâches, moquettes, emballages alimentaires, plastiques, Téflon, ustensiles antiadhésifs, vaisselle non biodégradable, vêtements imperméables
- Malgré leur toxicité, ils restent largement utilisés

5. Ingénierie génétique / Nanotechnologie

- Organismes génétiquement modifiés
- Clonage animal et végétal
- Agriculture cellulaire et viande cultivée
- Manipulation et édition génétique
- Matériaux biosourcés conçus
- Biologie synthétique, chimie verte, biotechnologies
- Blockchain (cryptomonnaies), Bitcoin...
- Intelligence artificielle : forte consommation d'énergie, risques pour l'humanité)
- Impact de la production de microprocesseurs sur la consommation d'eau

6. Libération dans l'environnement

- Libérations intentionnelles ou accidentelles
- Rythme rapide de l'innovation technologique (ex. GES, gaz destructeurs d'ozone, CFC)
- Leur production dépasse largement la capacité d'évaluation des risques
- Demande croissante de production
- Sources d'émission : extraction minière, raffinage, traitement, production, utilisation, élimination
- Métaux rares et métaux lourds toxiques : mercure, plomb, chrome, cadmium, arsenic, béryllium, nickel

7. Toxicité et impacts sur les systèmes terrestres

- Pesticides, insecticides, rodenticides...
- Contamination hydrologique : rivières, lacs, aquifères, sols, zones humides
- Processus menant souvent à la dégradation des sols
- Contamination des sols par engrais chimiques
- Perte de biodiversité (ex. amphibiens, insectes)
- Néonicotinoïdes : effets graves sur les pollinisateurs, notamment les abeilles
- Impacts sur la flore et la faune
- Ingestion de PFAS par plus de 600 espèces

8. Toxicité et impacts sur la santé humaine

- Perturbateurs endocriniens
- Risques cancérogènes / mutagènes
- Vulnérabilité accrue : nourrissons, enfants, personnes âgées, femmes enceintes
- Présence dans compléments alimentaires, cosmétiques, produits pharmaceutiques
- Mercure dans les poissons et fruits de mer
- Amiante retardateur de flamme : toxique et cancérogène

Bibliographie sélective	Principaux accords et cadres internationaux
1. Baldock, C., et al. (2024). Novel entities – A financial time bomb: Why investors need to be aware of the risks and impacts of toxic artificial chemicals. Planet Tracker. Retrieved from https://planet-tracker.org/novel-entities-a-financial-time-bomb/ 2. Barra, M., et al. (2018). Novel entities. Scientific and Technical Advisory Panel of the Global Environment Facility (GEF-STAP). Washington, DC. Retrieved from https://www.thegef.org/sites/default/files/publications/GEFSTAP%20Novel%20Entities%20Report.pdf 3. Persson, L., et al. (2022). Outside the safe operating space of the planetary boundary for novel entities. Environmental Science & Technology, 56(3), 1510–1521. https://doi.org/10.1021/acs.est.1c04158 4. United Nations. (n.d.). Sustainable Development Goals: 17 goals, 169 targets, indicators & progress – see Target 12.4. Retrieved from https://sdgs.un.org/goals 5. United Nations. (annual). The Sustainable Development Goals Report. Annual editions available at: https://unstats.un.org/sdgs/report/ 6. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO). (2017). Education for sustainable development goals: Learning objectives & discussion topics. Retrieved from https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000247444	• Montreal Protocol – 1989 • Basel Convention – 1992 • Cartagena Protocol on Biosafety – 2003 • Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants (POPs) – 2004 • Rotterdam Convention – 2004 • Strategic Approach to International Chemicals Management (SAICM) – 2006 • EU REACH Regulation – 2007 • Global Plastics Treaty – 2022

Cadre TASK : Système Terre → Domaine : Limites Planétaires Régulatrices → Sujet : 1.2.5 Cycles biogéochimiques

Définition : Les cycles biogéochimiques désignent le mouvement continu d'éléments essentiels à la vie — comme l'azote et le phosphore — entre les organismes vivants (le « bio »), la Terre (le « géo ») et au travers de réactions chimiques. Ces éléments, qui constituent la base de toute forme de vie, circulent dans l'air, l'eau et les sols, soutenant aussi bien les microbes que les forêts les plus vastes ([Sustainability Directory](#)). Plus largement, les cycles biogéochimiques décrivent les échanges de ces éléments entre les différentes composantes de la Terre : du vivant au non vivant, de l'atmosphère aux terres et aux océans, des sols aux plantes ([Galloway et al., 2014](#)).

1. Principes, processus et caractéristiques - Définition : mouvements d'éléments entre les organismes vivants et l'environnement - Nécessaires aux processus organiques et inorganiques - Importance de distinguer les <i>stocks</i> et les <i>flux</i> - Principaux cycles : eau, azote, phosphore, carbone - Interactions étroites entre H₂O, N, C et P — nutriments biologiques essentiels - Cycles secondaires : méthane, soufre, mercure, calcium, etc. - Tous peuvent être perturbés par les activités humaines - Plusieurs cycles ont déjà été modifiés au-delà des seuils de sécurité	2. Le cycle de l'eau (H₂O) - Processus : évaporation, condensation, précipitation, infiltration, ruissellement - Composantes : océans, rivières, glaciers, eaux souterraines, sols, atmosphère - Cycles naturels : circulation en continu entre atmosphère, terres et océans via évaporation, transpiration et précipitations - Impacts humains : changement climatique change le rythme et la distribution des pluies, surexploitation des nappes, construction de barrages, modifications d'usage des sols - Conséquences : sécheresses, modifications des précipitations (plus de pluie, moins de neige), baisse de l'humidité des sols et perte de zones humides, dégradation des écosystèmes	3. Le cycle de l'azote (N) - Processus : fixation de l'azote, nitrification, assimilation, ammonification, dénitrification - Composantes : azote atmosphérique, bactéries du sol, plantes, animaux - Cycles naturels : fixation biologique, fixation atmosphérique (foudre), fixation industrielle (procédé Haber-Bosch) - Impacts humains : - Pratiques agricoles intensives : utilisation d'engrais de synthèse, impacts négatifs sur la santé des sols, ruissellement - Procédés industriels : combustion d'énergies fossiles générant des émissions de NO_x, contribuant au smog et aux pluies acides - Conséquences : eutrophisation, pluies acides, changement climatique (N₂O), acidification des sols	4. Le cycle du phosphore (P) - Processus : minéralisation, immobilisation, sédimentation, érosion et altération des roches - Composantes : roches phosphatées, minéraux du sol, P organique et inorganique dans sols et eaux - Cycles naturels : altération des roches, absorption par les plantes, retour au sol via décomposition, sédimentation dans les milieux aquatiques - Impacts humains : exploitation minière, engrais phosphatés, rejets d'eaux usées, détergents contenant du phosphore - Disponibilité : inquiétudes sur l'épuisement des ressources ; enjeux de sécurité alimentaire - Conséquences : eutrophisation, perte de fertilité des sols, pollution des eaux douces
5. Le cycle du carbone (C) - Processus : photosynthèse, respiration, décomposition, combustion - Composantes : réservoirs (air, océans, biosphère, lithosphère) ; sources (fossiles, usage des terres) - Cycles naturels : échanges rapides de C entre l'atmosphère, les océans et la biosphère ; cycle géologique lent du C (formation et altération des roches) - Impacts humains : fossiles et déforestation → effet de serre, océans acidifiés - Conséquences : changement climatique accéléré, acidification des océans, perte de carbone des sols	6. L'eutrophisation et ses impacts - Causes : ruissellement agricole, eaux de ruissellement urbain, eaux usées, dépôts atmosphériques - Rôle de l'azote et du phosphore - Impacts : proliférations d'algues, hypoxie (manque d'oxygène), mortalité piscicole, perte de biodiversité, zones mortes - Impacts humains et économiques : eau potable, loisirs, pêche commerciale et récréative	7. Autres impacts liés à la perturbation des cycles biogéochimiques - Acidification : modification du pH des sols et eaux - Zones mortes : emplacements, causes, effets sur la vie aquatique - Sols : appauvrissement, érosion, modifications de structure - Biodiversité : disparition d'espèces, déséquilibres écologiques, perte de services écosystémiques - Extraction du phosphore : perte d'habitats, érosion des sols, contamination des eaux	8. Impacts socio-éco des perturbations - Qualité de l'eau : ruissellement chargé en nutriments, risques sanitaires - Marées rouges : problèmes respiratoires, fermetures de plages, baisse du tourisme - Pêche : variations des stocks, impacts économiques, sécurité alimentaire - Agriculture : baisse des rendements, coûts accrus des engrais, érosion des sols - Extraction du phosphore : enjeux sociaux, économiques, géopolitiques - Sécurité alimentaire : volatilité des prix, disponibilité des ressources, effets sur le commerce et la stabilité politique

Bibliographie sélective	Principaux accords et cadres internationaux
1. Bennett, E. M., et al. (2001). Human impact on erodable phosphorus and eutrophication: A global perspective. <i>BioScience</i>, 51(3), 227–234. https://doi.org/10.1641/0006-3568(2001)051[0227:HIOEPA]2.0.CO;2 2. Planetary Health Check. (n.d.). Modification of biogeochemical flows. Retrieved from https://www.planetaryhealthcheck.org/boundary-pages/modification-of-biogeochemical-flows 3. Carpenter, S. R., et al. (1998). Nonpoint pollution of surface waters with phosphorus and nitrogen. <i>Ecological Applications</i>, 8(3), 559–568. https://doi.org/10.1890/1051-0761(1998)008[0559:NPOSWW]2.0.CO;2 4. Foley, J. A., et al. (2005). Global consequences of land use. <i>Science</i>, 309(5734), 570–574. https://doi.org/10.1126/science.1111772 5. Intergovernmental Science–Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services (IPBES). (2019). Summary for policymakers – Global assessment report on biodiversity and ecosystem services. https://doi.org/10.5281/zenodo.3553458 6. Smith, V. H., et al. (1999). Eutrophication: Impacts of excess nutrient inputs on freshwater, marine, and terrestrial ecosystems. <i>Environmental Pollution</i>, 100(1–3), 179–196. https://doi.org/10.1016/S0269-7491(99)00091-3 7. Steffen, W., Richardson, K., Rockström, J., et al. (2015). Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. <i>Science</i>, 347(6223), Article 1259855. https://doi.org/10.1126/science.1259855 8. Sutton, M. A., et al. (Eds.). (2013). <i>Our Nutrient World: The challenge to produce more food and energy with less pollution – Global overview of nutrient management</i>. Centre for Ecology and Hydrology (CEH) on behalf of GPNM & INI. Retrieved from https://www.unep.org/resources/report/our-nutrient-world-challenge-produce-more-food-and-energy-less-pollution 9. Vitousek, P. M., et al. (1997). Human alteration of the global nitrogen cycle: Sources and consequences. <i>Ecological Applications</i>, 7(3), 737–750. https://doi.org/10.1890/1051-0761(1997)007[0737:HAOTGN]2.0.CO;2 10. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2025). Sustainable nitrogen management in agrifood systems. Retrieved from https://openknowledge.fao.org/items/245fe2ec-c2ec-423d-a4d9-d2c60a6aa853 11. Watanabe, M. D. B., & Ortega, E. (2011). Ecosystem services and biogeochemical cycles on a global scale: Valuation of water, carbon and nitrogen processes. <i>Environmental Science & Policy</i>, 14(6), 594–604. https://doi.org/10.1016/j.envsci.2011.04.005	• Global Programme of Action for the Protection of the Marine Environment from Land-Based Activities (GPA) – 1995 • EU Water Framework Directive (WFD) – 2000 • Gulf of Mexico Hypoxia Action Plan – 2001 • Danube River Basin Management Plan – 2009 • United Nations Environment Assembly (UNEA-4) – 2019 • Colombo Declaration on Nitrogen (UNEP) – 2019 • Farm to Fork Strategy (European Green Deal) – 2020 • Helsinki Declaration – <i>Our Phosphorus Future</i> – 2022

Cadre TASK : Système Terre → **Domaine** : Limites Planétaires Régulatrices → **Sujet** : 1.2.6 – Charge atmosphérique en aérosols

Définition : Couramment appelés *pollution de l'air*, les aérosols sont « une suspension de particules solides ou liquides dans l'air, dont la taille varie de quelques nanomètres à plusieurs dizaines de micromètres, et dont la durée de vie atmosphérique peut aller de quelques jours dans la troposphère à plusieurs années dans la stratosphère. [...] Ils peuvent avoir une origine naturelle ou anthropique dans la troposphère ; dans la stratosphère, ils proviennent surtout des éruptions volcaniques. [...] Les aérosols peuvent être émis directement (matière particulaire primaire) ou se former dans l'atmosphère à partir de gaz précurseurs (production secondaire). » ([GIEC, AR6, 2021](#)).

1. Pollution de l'air, aérosols et particules fines

- Particules solides, gouttelettes liquides ou substances gazeuses en suspension
- Polluants primaires et secondaires, précurseurs d'aérosols
- Pollution atmosphérique (aérosols + polluants gazeux)
- Pollution non liée aux aérosols : SO₂, NO₂, etc.
- Types de particules : PM10 (grossières), PM2.5 (fines), PM0.1 (ultrafines)
- Smog, brume, suie, poussières, CFC, HCFC...

2. Qualité de l'air et normes

- Indices de qualité de l'air
- Qualité de l'air intérieur (IAQ)
- Référentiels locaux, nationaux et internationaux : indice européen de la qualité de l'air, normes américaines (US EPA), seuils d'alerte de l'OMS concernant les particules
- Classement des villes les plus et moins polluées en particules
- Composés organiques volatils (COV / VOC)
- Énergies propres pour la cuisson et le chauffage
- Désinformation des industries du tabac et du pétrole

3. Causes naturelles ou biogéniques (90%)

- Inorganiques (naturelles)
 - Éruptions volcaniques (cendres, soufre, CO₂, pluies acides)
 - Tempêtes de poussière, poussières minérales dues à l'érosion éolienne
 - Embruns marins, sel de mer
 - Vapeur d'eau, nuages, brouillard, brume
- Organiques (biogéniques)
 - Incendies de forêts et de prairies (fumée)
 - Pollen, spores fongiques, bactéries, moisissures

4. Causes humaines—échelle macro

Industrie—Agriculture—Commerce—Transport

- Combustion d'énergies fossiles (charbon, pétrole, gaz) : sulfates, nitrates, carbone organique, suie, carbone noir, cendres...
- Combustion de biomasse : bois, résidus de culture, brûlis, déchets municipaux
- Activités industrielles : fusion, soudage, mines, travail du bois, ciment, carrières...
- Agriculture : pulvérisation de pesticides, labour, récolte, transformation...
- Construction / rénovation / démolition — amiante, poussières, débris
- Transport : travaux routiers, émissions des voitures et camions, traînées d'avion, transport maritime
- Émissions non liées à l'échappement : plaquettes de frein, usure des pneus, poussières routières...

5. Causes humaines—échelle micro

Local—Ménages—Individus

- Combustion quotidienne de biomasse : feux d'artifice, feux de camp, chauffages extérieurs, lampes à huile, bougies
- Chauffage au bois, incinération des déchets verts
- Cuisine : friture, ébullition, grillades, barbecues
- Tabagisme, vapotage, fumée tertiaire
- Aérosols domestiques : peintures en spray, solvants, produits ménagers
- Produits de jardin : pesticides, insecticides, engrais
- Déodorants, sprays corporels, poussière domestique, desquamation de la peau

6. Impact sur les écosystèmes et la biodiversité

- Effets sur la photosynthèse et la productivité végétale
- Acidification des sols et des milieux aquatiques
- Impacts sur la faune et les chaînes alimentaires
- Influence sur le comportement des pollinisateurs
- Liens avec la déforestation et les changements d'usage des terres

7. Impacts sur le CO₂, le climat et la météo

- Effets radiatifs directs (refroidissement et réchauffement)
- Atténuation ou amplification du réchauffement global
- Diffusion de la lumière
- Formation des nuages, circulation de l'air, précipitations
- Pluies acides (vapeur d'eau + aérosols sulfatés)
- Influence sur les systèmes de mousson et les régimes de pluie
- Interactions avec l'ozone

8. Impacts sur la santé humaine

- Dépendent de la forme, de la taille, de la concentration et de la toxicité des particules
- Effets respiratoires, cardiovasculaires et génétiques (maladies pulmonaires et cardiaques, asthme, infertilité, malformations...)
- Mortalité, maladies chroniques et impacts psychiques (ex. lien avec Alzheimer)
- Les particules en suspension sont classées cancérogènes de groupe 1
- Différences entre pollution intérieure et extérieure
- Effets nocifs de : cendres de charbon, pesticides, amiante, sciure, poussière de peinture au plomb...
- Populations vulnérables et inégalités environnementales
- Coûts économiques et sociaux de la pollution de l'air

Bibliographie sélective	Principaux accords et cadres internationaux
1. Bellouin, N., et al. (2020). Bounding global aerosol radiative forcing of climate change. Reviews of Geophysics, 58(1), e2019RG000660. https://doi.org/10.1029/2019RG000660 2. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2021). Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the IPCC. Retrieved from https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_SPM.pdf 3. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2022a). Climate change 2022: Impacts, adaptation, and vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the IPCC. Retrieved from https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/downloads/report/IPCC_AR6_WGII_SummaryForPolicymakers.pdf 4. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2022b). Climate change 2022: Mitigation of climate change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the IPCC. Retrieved from https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/downloads/report/IPCC_AR6_WGIII_SummaryForPolicymakers.pdf 5. Landrigan, P. J., et al. (2018). The Lancet Commission on pollution and health. The Lancet, 391(10119), 462–512. https://doi.org/10.1016/S0140-6736(17)32345-0 6. Seinfeld, J. H., & Pandis, S. N. (2016). Atmospheric chemistry and physics: From air pollution to climate change (3rd ed.). John Wiley & Sons. 7. Steffen, W., Richardson, K., Rockström, J., et al. (2015). Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. Science, 347(6223), Article 1259855. https://doi.org/10.1126/science.1259855	• Clean Air Act (United States) — 1963 • Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution (CLRTAP) — 1979 • World Health Organization Air Quality Guidelines — 1987 • Gothenburg Protocol — 1999 • Paris Agreement (UNFCCC) — 2015

Cadre TASK : Système Terre → **Domaine** : Limites Planétaires Régulatrices → **Cadre TASK** : Système Terre → **Domaine** : Limites Planétaires Régulatrices → **Sujet** : 1.2.7 – Appauvrissement de l'ozone stratosphérique

Définition : « La stratosphère contient une couche, dite couche d'ozone, dans laquelle la concentration d'ozone est particulièrement élevée. Cette couche s'étend approximativement de 12 à 40 km d'altitude. [...] Dans cette couche, l'ozone se raréfie du fait des émissions anthropiques de composés de chlore et de brome. Chaque année, pendant le printemps austral, un appauvrissement très important de la couche d'ozone se produit au-dessus de l'Antarctique, dû à la combinaison de la présence de ces composés anthropiques du chlore et du brome et de conditions météorologiques particulières à cette région. Ce phénomène est appelé trou (dans la couche) d'ozone. » ([GIEC, 2013](#)).

1. Ozone et « trous » dans la couche d'ozone

- Ozone stratosphérique
- Ozone troposphérique
- Couche d'ozone
- Rôle du rayonnement solaire dans la formation et la destruction de l'ozone
- Définition des « trous d'ozone »
- Évolution historique et état actuel
- Différences régionales
- Zones critiques (« hotspots »)
- Impact du changement climatique sur la récupération de l'ozone

2. Substances appauvrissant la couche d'ozone

- Substances appauvrissant la couche d'ozone (SAO) et potentiel d'appauvrissement de l'ozone (PAO)
- Mécanisme d'appauvrissement de la couche d'ozone
- CFC et HCFC : climatisation, réfrigération, propulseurs d'aérosols (sources anthropiques)
- Halons : systèmes d'extinction et lutte contre l'incendie (source anthropique)
- Protoxyde d'azote (N_2O), également gaz à effet de serre
- Sources de N_2O : agriculture, activités industrielles, eaux usées, combustibles fossiles
- Le N_2O provient de sources naturelles **et** anthropiques

3. Réponse internationale et actions menées

- Protocole de Montréal : objectifs et réussites
- Fonds multilatéraux
- Amendement de Kigali (réduction progressive des HFC)
- Facteurs de réussite du Protocole de Montréal :
 - Consensus et accord mondiaux
 - Preuves scientifiques claires et incontestables
 - Existence d'alternatives viables et abordables
 - Mécanismes d'application claires, incluant des sanctions commerciales

4. Conséquences sanitaires et environnementales

- Santé : UV, affections cutanées et oculaires, perturbation du système immunitaire
- Environnement : perturbation des écosystèmes, des habitats et des chaînes alimentaires
- Vie marine : impacts sur le phytoplancton, base des chaînes alimentaires océaniques
- Agriculture : diminution des rendements agricoles due à une exposition accrue aux UV

Bibliographie sélective

1. Farman, J., Gardiner, B., & Shanklin, J. (1985). Large losses of total ozone in Antarctica reveal seasonal ClO_x/NO_x interaction. *Nature*, 315, 207–210. <https://doi.org/10.1038/315207a0>
2. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2013). Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. Retrieved from <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>
3. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2021). Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change — Summary for policymakers. Retrieved from https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_SPM.pdf
4. Molina, M., & Rowland, F. S. (1974). Stratospheric sink for chlorofluoromethanes: Chlorine atom-catalysed destruction of ozone. *Nature*, 249, 810–812. <https://doi.org/10.1038/249810a0>
5. Steffen, W., Richardson, K., Rockström, J., et al. (2015). Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. *Science*, 347(6223), Article 1259855. <https://doi.org/10.1126/science.1259855>
6. United Nations Environment Programme (UNEP). (2018). Scientific assessment of ozone depletion: 2018. Retrieved from <https://ozone.unep.org/sites/default/files/2019-05/SAP-2018-Assessment-report.pdf>

Principaux accords et cadres internationaux

- Vienna Convention for the Protection of the Ozone Layer — 1985
- Montreal Protocol — 1989
- UNEP OzonAction Programme — 1991
- Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services (IPBES) — 2012
- Kigali Amendment — 2016