



« Les changements climatiques »

**Lundi 25, jeudi 28 et vendredi 29 mars 2024
et lundi 15 avril 2024**

**Quatre matinées avec les étudiants des masters en géographie,
orientation *Global Change*, en sciences spatiales et en géologie
de l'Université de Liège**

Dans le cadre du cours « *Les changements climatiques et leurs impacts* », nous organisons les lundi 25, jeudi 28, vendredi 29 mars et lundi 15 avril 2024, notre seizième colloque annuel sur le thème des changements climatiques. Dans une série de mini-conférences, des étudiants des masters en géographie, orientation *Global Change*, en sciences spatiales et en géologie de l'Université de Liège tenteront de mieux faire comprendre les changements climatiques qui affectent aujourd'hui notre planète et analyseront les impacts possibles sur l'environnement et la société. Au cours de cette quatrième matinée, organisée en collaboration avec Réjouisciences, leurs exposés aborderont des aspects très variés, tels que la différence entre un réchauffement global de 1,5°C et 2°C (voire 3 ou 4°C) pour la fin du siècle, ce que la science connaît au sujet du climat du Moyen-Âge, quels impacts les changements climatiques ont eu et auront sur les cyclones, ouragans et autres typhons, sur les forêts en Europe ou sur la santé mondiale, et quelles sont les implications de l'utilisation accrue au gaz de schiste pour le changement climatique.

*Informations : Guy MUNHOVEN, Institut d'Astrophysique et de Géophysique, Université de Liège, Quartier Agora, 19c Allée du Six Août, 4000 Liège.
Tél.: 04/3669771, e-mail: Guy.Munhoven@uliege.be*

Quatrième matinée « Les changements climatiques »

Lundi 15 avril 2024, 09h20 à 12h30

Exèdre Dick Annegarn (ex théâtre, Bât. B8)

Sart Tilman, 4000 Liège

09h20 – 09h40 Accueil et introduction de la journée (Louis François & Guy Munhoven)

09h40 – 10h00 1,5°C ou 2°C : peu importe ? (Denis Schraepen)

L'Accord de Paris vise de maintenir l'augmentation de température moyenne mondiale en-dessous de 2°C, si possible, même en-dessous de 1,5°C. Une élévation de la température globale, est-ce vraiment si grave ? Y a-t-il réellement une différence entre +1,5°C, +2°C, voire +3°C ? Qu'en est-il des autres conséquences du changement climatique : élévation du niveau de la mer, sécheresses, canicules, etc. ?

10h00 – 10h20 Moyen-Âge : une époque sombre et froide ? (Brieuc Verstraete)

D'importantes variations du climat ont eu lieu au cours des deux derniers millénaires, en particulier sur la région Atlantique Nord. Dans ce contexte, l'épisode de l'Optimum Climatique Médiéval est souvent rappelé lors des discussions animant le débat contemporain autour du réchauffement climatique. Quelles sont les causes de l'élévation des températures durant cette période ? Sont-elles comparables aux causes du réchauffement actuel ?

10h20 – 10h40 Le changement climatique souffle-t-il sur les cyclones ? (Jeanne Strebelle)

Depuis des siècles nous pouvons constater les ravages des cyclones, des ouragans et des typhons. Les changements climatiques observés depuis quelques décennies ont-ils un impact sur ces phénomènes extrêmes ? Seront-ils plus puissants ou au contraire vont-ils faire moins de dégâts ? Vont-ils être plus fréquents ? Allons-nous voir ces phénomènes extrêmes se développer à des endroits où ils n'ont pas été observés auparavant ?

10h40 – 11h10 Pause

11h10 – 11h30 Les forêts européennes à l'épreuve de l'évolution rapide du climat

(Valérian Authélet)

Les écosystèmes forestiers font face à de nombreux stress en raison de l'évolution rapide du climat. Ces contraintes compromettent le fonctionnement optimal de l'écosystème, affaiblissant sa résilience et perturbant son équilibre. Quelles sont les conséquences du changement climatique sur les forêts européennes ? Leurs capacités d'adaptation seront-elles suffisantes ? Quelles seront les différences régionales ?

11h30 – 11h50 Le pouvoir menaçant du méthane : accélérateur silencieux du

réchauffement climatique (Seguy V. Saa Dongmo)

En raison de la situation géopolitique internationale, plusieurs pays de l'Union Européenne cherchent à diversifier leurs sources d'approvisionnement en gaz naturel. Une de ces sources est le gaz de schiste nord-américain. Qu'est-ce que le gaz de schiste ? Comment se compare-t-il sur le plan environnemental au gaz naturel extrait de manière conventionnelle ?

11h50 – 12h10 Le changement climatique : un ennemi invisible pour la santé mondiale

(Sasha Kolm)

À ce jour, le changement climatique occupe une position prépondérante dans notre société, influençant de nombreux aspects de notre vie quotidienne. Qu'en est-il de son influence sur la santé mondiale ? Quelles sont les populations les plus vulnérables ? Comment sont-elles touchées ? Et existe-t-il des solutions pour faire face à ces conséquences ?

12h10 – 12h20 Conclusions de la matinée

1,5°C ou 2°C : peu importe ?

Denis Schraepen

Master en sciences géographiques — orientation « Global Change »

Introduction

À l'instar de notre planète Terre, notre corps constitue un système complexe où la perturbation de son équilibre pourrait entraîner des conséquences néfastes. Prenons l'exemple d'une élévation de 1,5°C de la température corporelle due à une fièvre. Si cet état persiste, il pourrait aboutir à des dommages irréversibles, voire à la perte de la vie de la personne. Ce même principe s'applique de manière analogue à la Terre elle-même. En effet, un réchauffement moyen de l'atmosphère terrestre de quelques degrés entraînera un déséquilibre aux conséquences de plus en plus graves.

Cependant, il est crucial de comprendre que ce n'est pas seulement l'élévation de la température en elle-même qui est préoccupante, mais plutôt les conséquences qu'elle entraîne. Par exemple, l'augmentation actuelle de la température moyenne globale, établie à 1,2°C par rapport à la période préindustrielle, a des répercussions majeures. Ces impacts se manifestent par la destruction significative des récifs coralliens tropicaux, une fréquence et une intensité accrues des incendies, des inondations et des sécheresses, ainsi que le déclenchement de la fonte de la calotte glaciaire du Groenland et de la plupart des glaciers terrestres.

Si l'on envisage maintenant un réchauffement encore plus important, de 2°C par exemple, les conséquences deviennent bien plus dévastatrices. En effet, l'augmentation de la température moyenne à la surface de la Terre et les conséquences qui en découlent ne suivent pas une tendance linéaire, mais plutôt une tendance exponentielle. Dans ce cas, les conséquences d'un réchauffement deux fois plus important n'entraîneront pas des répercussions deux fois plus graves, mais potentiellement 100 voire 1000 fois plus importantes.

Les causes de ce réchauffement climatique

Avant d'aborder les conséquences du réchauffement climatique, il est crucial de comprendre son origine. Tout au long de son histoire, la Terre a connu des variations de température. Les changements actuellement observés se produisent cependant à une vitesse sans précédent. Ces changements sont attribués aux activités humaines telles que les émissions de gaz à effet de serre et la déforestation.

Les conséquences de ce réchauffement climatique

Afin de mieux appréhender les répercussions d'une élévation de quelques degrés de la température moyenne de la Terre, voici une liste (non exhaustive) de ses conséquences.

Les vagues de chaleur

Lorsque nous abordons l'élévation de la température, il est souvent question de moyennes. Cependant, il est important de souligner que les extrêmes sont également renforcés et deviennent plus fréquents. C'est particulièrement le cas pour les vagues de chaleur, où les conditions météorologiques deviennent difficiles pour le corps humain.

Le nombre de jours de conditions météorologiques mortelles atteint des valeurs de 100 jours par an pour une élévation moyenne de la température de 1°C jusqu'à 365 jours par an pour une élévation moyenne de la température de 4°C. La Figure 1 illustre la répartition inégale de ces vagues de chaleur, mettant en évidence le risque que les régions proches de l'équateur deviennent critiques si les températures moyennes atteignent ces niveaux. Sachant que cette zone compte des centaines de millions d'habitants, cela représente un défi majeur

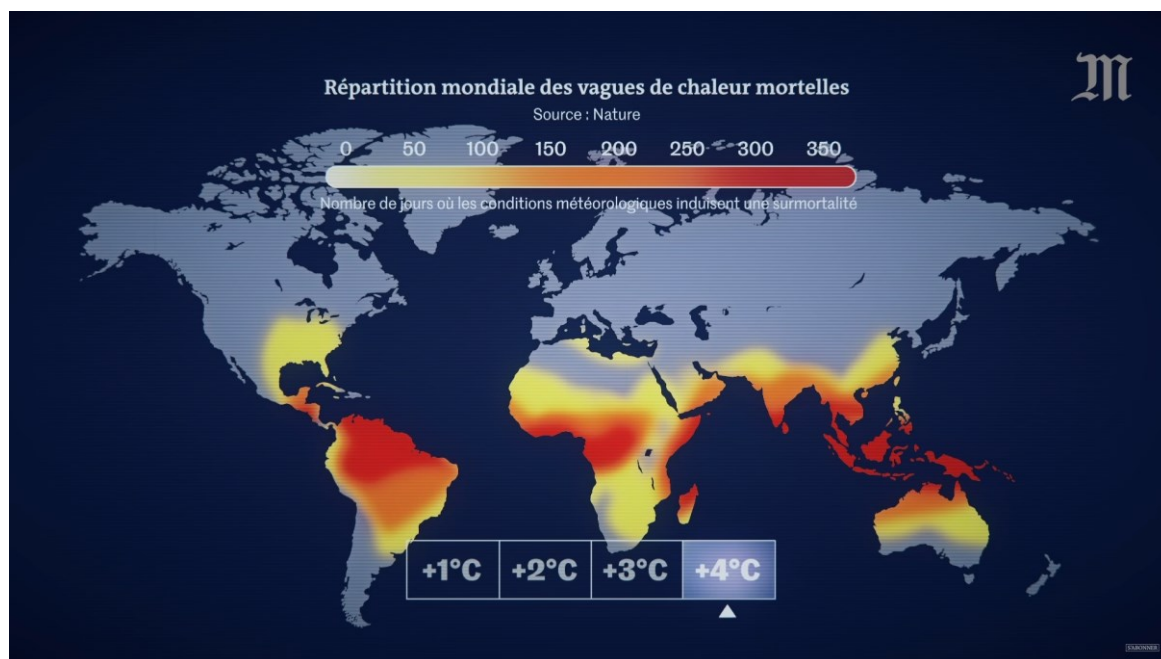


Figure 1 : Carte de la répartition du nombre de jours de vagues de chaleur mortelles sur l'année pour un réchauffement climatique de 4°C (Source : [Le Monde](#)).

Le cycle de l'eau

Dans un contexte où les températures globales sont en hausse, l'évaporation et la capacité de l'air à absorber l'eau connaîtront également une augmentation. En conséquence, les régions où l'eau est abondante verront une augmentation des précipitations, entraînant des risques accrus d'inondations et de dommages significatifs aux infrastructures et en agriculture. En revanche, les zones déjà confrontées à une rareté d'eau connaîtront une diminution des précipitations, car les masses d'air humide auront moins tendance à se condenser. Cette diminution des précipitations aggrave les sécheresses, provoque des pertes de récoltes agricoles et favorise des incendies plus dévastateurs.

Certains pays africains, tels que le Niger, subissent déjà les conséquences de ces changements climatiques, avec une diminution notable des précipitations. Le Niger se retrouve confronté à une insuffisance en terres cultivables pour nourrir l'ensemble de sa population, entraînant des famines et des conflits violents avec les nations voisines. Cette réalité souligne l'urgence d'adopter des mesures globales pour atténuer les impacts du changement climatique et aider les régions les plus vulnérables à faire face aux défis croissants liés à l'eau et à l'agriculture.

La cryosphère

La cryosphère englobe tout d'abord les glaciers terrestres, dont dépendent plusieurs centaines de millions de personnes. En effet, lors de la fonte des glaciers au printemps et en été, elle assure l'approvisionnement des rivières, favorisant une agriculture florissante et constituant une précieuse ressource en eau potable. Cependant, avec l'augmentation des températures, les glaciers se rétrécissent, réduisant la quantité d'eau alimentant les rivières. Cette diminution a un impact négatif sur les populations dépendantes des glaciers, affectant non seulement l'approvisionnement en eau potable, mais également celui pour l'agriculture et d'autres besoins nécessitant de l'eau.

La cryosphère inclut également les calottes glaciaires du Groenland et de l'Antarctique, les plus grandes réserves d'eau douce de la planète. Leur fonte entraînerait inévitablement des conséquences sur le niveau de la mer, provoquant une érosion côtière dévastatrice pour les habitations et les écosystèmes. De plus, les courants marins, régulateurs essentiels du climat mondial, seraient perturbés par l'apport important en eau douce. Enfin, les calottes glaciaires jouent

un rôle crucial dans la réflexion des rayons solaires en raison de leur albédo¹ élevé. La fonte des glaces induit ainsi un réchauffement, amorçant un sorte de cercle vicieux, aussi connu comme boucle de rétroaction. Cette boucle est déjà enclenchée pour la calotte glaciaire du Groenland, avec des effets prochains, notamment sur la modification du *Gulf Stream*². Si les températures continuent d'augmenter, l'Antarctique pourrait suivre le même chemin inévitable de fonte.

Enfin, la cryosphère comprend aussi la banquise arctique, une vaste étendue de glace flottante au pôle Nord. Depuis plusieurs années, la surface minimale de la banquise arctique diminue, entraînant des conséquences similaires à celles observées pour les calottes glaciaires. De nombreux animaux dépendent de cette banquise, et leur survie est compromise en raison de sa fonte rapide.

L'élévation du niveau de la mer

Une première cause de l'élévation du niveau des océans, comme expliqué précédemment, est la fonte des glaces. La deuxième cause, et la plus significative, est la dilatation thermique. En effet, à l'instar de l'atmosphère, les océans et les mers se réchauffent également, ce qui entraîne une augmentation de volume due à la dilatation de l'eau. Les conséquences de cette élévation sont, comme on l'attend, une submersion des régions côtières, où une part importante de la population mondiale réside.

De plus, lors des tempêtes, les vents associés peuvent faire monter le niveau de l'eau, provoquant aussi des inondations côtières. Cette double menace, résultant à la fois de la dilatation thermique et des événements météorologiques extrêmes, met en péril les zones côtières et nécessite une attention immédiate pour la gestion des risques, l'adaptation et l'atténuation des effets du changement climatique.

Les coraux tropicaux

Les coraux tropicaux peuvent résister à l'élévation du niveau de la mer mentionnée précédemment, mais ils sont particulièrement vulnérables à une forte élévation de la température de l'eau. Actuellement, on estime que 15% des coraux tropicaux ont déjà succombé en raison du réchauffement de leur environnement, et une augmentation de la température de l'eau d'environ 2°C entraînerait la mortalité totale de ces coraux. Cela signifie que les zones tropicales assisteront à un déclin massif des récifs coralliens, avec une migration potentielle de ces écosystèmes vers des latitudes plus élevées. Une autre menace majeure pour la survie des récifs coralliens est l'acidification des océans, résultant des activités humaines telles que les émissions de dioxyde de carbone.

La combinaison du réchauffement de l'eau et de l'acidification des océans peuvent entraîner le blanchiment des coraux et conduire à leur mort, ce qui pose une menace sérieuse à l'intégrité des écosystèmes coralliens. La préservation de ces habitats marins cruciaux nécessite une action mondiale pour réduire les émissions de gaz à effet de serre et atténuer les changements climatiques, tout en mettant en œuvre des stratégies de conservation et d'adaptation pour protéger les coraux face aux défis actuels et futurs.

Les cyclones tropicaux

Selon le cinquième rapport du GIEC (Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat), on anticipe une diminution de la fréquence globale des cyclones tropicaux (appelés *ouragans* pour le nord de l'Océan Atlantique et le nord-est de l'Océan Pacifique, *typhons* pour le nord-ouest de l'Océan Pacifique et *cyclones* pour l'Océan Indien et le sud de l'Océan Pacifique). Cependant, la prévision inclut une augmentation de la fréquence des cyclones tropicaux les plus intenses. En outre, ces ouragans semblent s'approcher davantage des côtes, entraînant des précipitations torrentielles et des vents extrêmement violents, entraînant la destruction des infrastructures et des terres agricoles. Ces changements dans la fréquence et l'intensité soulignent

¹ Albédo : fraction du rayonnement incident qui est réfléchi par une surface. Un albédo de 1 indique une réflexion totale, alors qu'un albédo de 0 indique une absorption totale du rayonnement par la surface.

² *Gulf Stream* : courant océanique qui transporte les eaux de surface chaudes depuis le golfe du Mexique jusqu'à l'Atlantique Nord en longeant la côte Est des États-Unis.

l'importance d'une planification et d'une adaptation adéquates pour minimiser les impacts sur les populations côtières et les activités humaines.

La migration des espèces animales et végétales

Dans leurs efforts pour s'adapter, les animaux et les végétaux sont susceptibles de migrer vers les pôles, créant plusieurs problèmes le long de leur trajet. Tout d'abord, le déplacement de ces animaux dans des zones habitées par l'Homme peut entraîner des conflits potentiels, mettant en danger leur survie si les populations locales se sentent menacées ou perturbées par leur présence. Cette interaction accrue entre les espèces en migration et les habitats humains souligne la nécessité d'une gestion prudente et de politiques de conservation efficaces.

En outre, la migration des moustiques vers de nouvelles zones peut avoir des conséquences directes sur la santé humaine. En effet, cette dispersion pourrait entraîner une augmentation des cas de paludisme, avec une estimation de 60.000 décès supplémentaires en 2023. Ces chiffres soulignent l'importance de surveiller de près les impacts sanitaires des changements climatiques et de mettre en place des stratégies de prévention et de contrôle des maladies.

Conclusion

Une élévation globale de la température moyenne produira des conséquences qui s'aggraveront probablement dans le futur, avec l'ajout d'autres défis à la liste. Il devient donc impératif d'agir et d'initier un changement dans nos habitudes afin de préserver la durabilité de la planète que nous habitons pour les millions d'années à venir.

Pour en savoir plus...

- HugoDécrypte – Entretien avec Jean-Marc Jancovici : <https://www.youtube.com/watch?v=iWGaYMa90v4&t=482s>
- Le Monde – Comment le réchauffement climatique va bouleverser l'humanité : <https://www.youtube.com/watch?v=8nzRXxPnlPQ>
- RTBF – Réchauffement climatique : comment les états se préparent contre la montée des eaux : <https://www.youtube.com/watch?v=coMsre5RAbk>
- Joël Guiot – Limiter l'augmentation des températures bien en-dessous de 2°C : est-ce un objectif atteignable ? <https://www.cairn.info/revue-juridique-de-l-environnement-2017-HS17-page-23.html>

Moyen-Âge : une époque sombre et froide ?

Brieuc Verstraete

Master en sciences géographiques — orientation « Global Change »

Le Moyen Âge est souvent dépeint dans l'inconscient collectif comme une ère obscure et froide. Cette vision, largement influencée par une multitude de représentations cinématographiques et littéraires, occulte souvent une réalité plus nuancée, notamment en ce qui concerne le climat. Bien que les conflits et les épidémies aient assombri cette période de l'histoire, il en va tout autrement pour les conditions climatiques. Les recherches en paléoclimatologie révèlent en effet une tendance à la hausse des températures au cours du Moyen Âge, phénomène connu sous le nom « d'optimum climatique médiéval » et qui aurait notamment permis aux Vikings de coloniser le Groenland.

L'Optimum Climatique Médiéval

Le climat ne cesse d'évoluer au cours du temps, sous l'influence de divers facteurs physiques, chimiques, géologiques, astronomiques et anthropiques.

L'Optimum Climatique Médiéval (OCM)³ représente une période caractérisée par des conditions relativement chaudes, accompagnées d'anomalies climatiques notables, telles qu'une sécheresse prononcée dans certaines régions continentales. La chronologie de cet intervalle n'est pas clairement définie, différents enregistrements suggérant le début et la fin du réchauffement à des moments différents, et certains traduisant un réchauffement intermittent. Les spécialistes en paléoclimatologie s'accordent généralement pour placer l'OCM entre le X^e et le XV^e siècles de notre ère. Les reconstitutions de la température moyenne de l'hémisphère Nord actuellement disponibles indiquent que la période la plus chaude à l'échelle de l'hémisphère pourrait avoir eu lieu entre 950 et 1250. La période qui a suivi l'OCM (1450–1850), appelée « Petit Âge Glaciaire, »⁴ est en revanche caractérisée par des températures plus fraîches, provoquant l'extension des calottes polaires et de nombreux glaciers continentaux (Figure 1).

La reconstitution de climats passés se base sur deux types d'archives : les archives historiques et les archives naturelles. Les archives historiques (écrits, œuvres d'art, etc.) transmettent surtout des informations sur les événements exceptionnels survenus dans le passé des sociétés. Les analyses biologiques ou physicochimiques d'archives naturelles (sédiments, pollens, insectes, micro-organismes) permettent quant à elles de caractériser les changements de température ou de précipitations du passé. La dendrochronologie⁵ et l'examen des glaciers et calottes polaires offrent également des enregistrements des variations passées du climat. Enfin, le développement de la modélisation informatique permet aujourd'hui de reconstituer des climats anciens.

Les données relevées et les températures ainsi reconstituées/simulées indiquent que les moyennes thermiques au cours de certaines phases de l'OCM ont effectivement surpassé celles des deux derniers millénaires. Cependant, il est à noter que cette chaleur n'était pas uniformément répartie à travers les saisons et les régions géographiques, se distinguant ainsi du réchauffement généralisé de l'ère industrielle (Figure 1).

³ Appelé « *Medieval Climate Anomaly* (MCA) » en anglais.

⁴ Appelé « *Little Ice Age* (LIA) » en anglais.

⁵ Méthode de datation par l'étude des anneaux de croissance des troncs d'arbres.

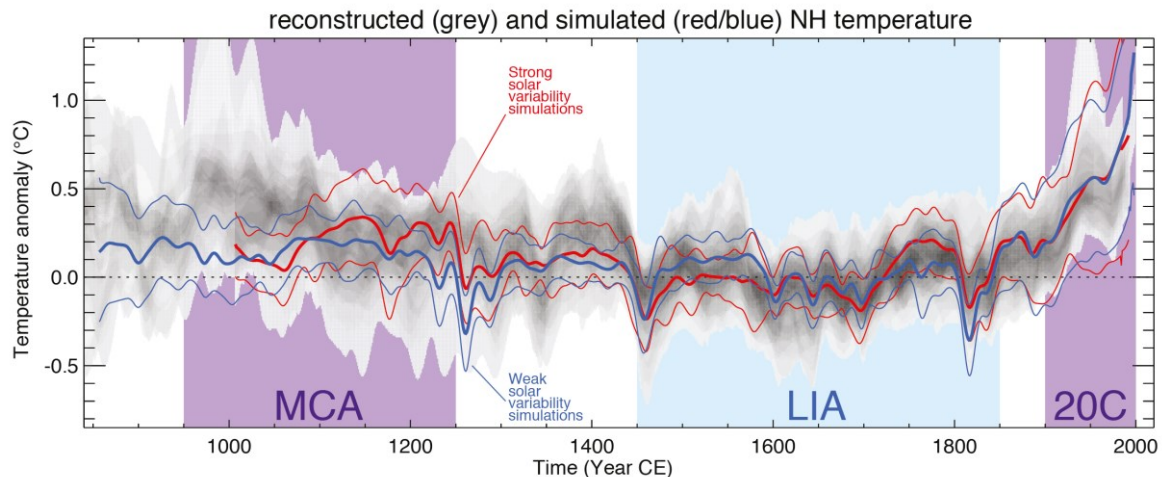


Figure 1 : Évolution des anomalies de température (reconstruction et simulation) dans l'hémisphère Nord au cours du dernier millénaire (Source : [IPCC WG1-AR5, 2013](#)).

Causes de l'OCM

Les causes précises de l'OCM sont encore difficiles à définir aujourd'hui étant donné la multitude de facteurs qui impactent le climat. Néanmoins, trois facteurs sont récurrents dans le discours de la communauté scientifique.

Circulations atmosphérique et océanique

Le climat de l'Europe de l'Ouest est fortement influencé par une organisation préférentielle des courants atmosphériques dans la région de l'Atlantique Nord, connue sous le nom de **d'oscillation nord-atlantique** (*North Atlantic Oscillation* ou NAO, en anglais). Cette oscillation correspond aux variations d'intensité entre l'anticyclone des Açores et la dépression d'Islande, deux systèmes de pression de surface qui peuvent se renforcer ou s'affaiblir simultanément. Une NAO positive se produit lorsque ces systèmes se renforcent, tandis qu'une NAO négative se produit lorsqu'ils s'affaiblissent. En phase positive, les changements dans la circulation atmosphérique entraînent un réchauffement et une augmentation des précipitations sur l'Europe du Nord et l'Amérique du Nord-Est, tandis que le sud-ouest du Groenland et le pourtour méditerranéen connaissent un déficit de précipitations et un refroidissement notable.

Le **Gulf Stream** est un courant océanique qui transporte de l'eau chaude en surface depuis le golfe du Mexique vers les côtes de l'Atlantique Nord avant de se diriger vers l'Europe du Nord-Ouest. De l'eau refroidie aux pôles et donc plus dense est également transportée plus en profondeur, créant ainsi un cycle. Le *Gulf Stream* représente une partie importante du système de circulation océanique mondial, connu sous le nom de **circulation thermohaline**, qui joue un rôle essentiel dans la régulation du climat mondial. Les vents, la température et la salinité de l'eau dans l'océan Atlantique peuvent l'influencer et les variations de ces paramètres peuvent modifier son intensité et sa trajectoire. De plus, des phénomènes météorologiques à grande échelle tels que la NOA peuvent également avoir un impact sur le *Gulf Stream* en modifiant les conditions atmosphériques qui influent sur sa circulation.

Enfin, les vents d'ouest participent également au système climatique de l'Atlantique en transportant des masses d'air plus ou moins chaudes et humides vers le continent européen. Ces vents sont générés par la rotation de la Terre, les gradients de pression atmosphérique, et les différences de température entre les régions équatoriales et polaires.

La Figure 2 illustre la circulation océanique en Atlantique avec, en rouge, les eaux de surface et, en bleu, les eaux qui ont plongé au fond des océans. Les deux systèmes de hautes (lettre « L » comme « *low pressure* ») et basses (lettre « H » comme « *high pressure* ») pressions, au niveau des Açores et de l'Islande respectivement, dont la différence renseigne sur les phases de la NAO

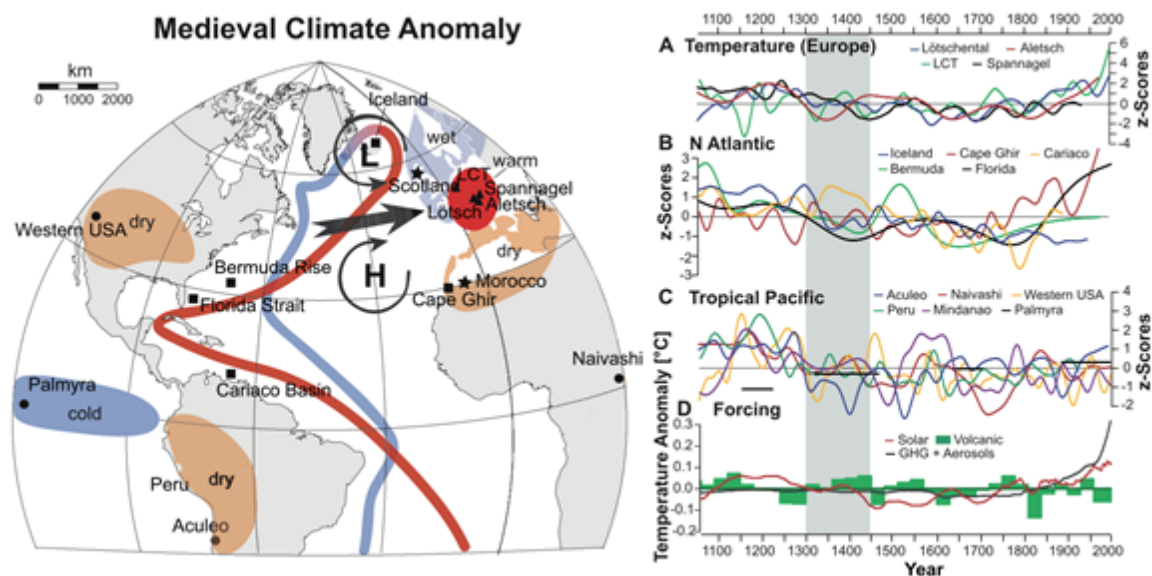


Figure 2 : À gauche, une modélisation de l'OCM à grande échelle. À droite, différentes localisations géographiques et séries chronologiques (1050-2000) des enregistrements des températures européennes. (A), des conditions de l'Atlantique Nord (B), des conditions du Pacifique tropical (C), et des forçages externes (D). (Source : [Trouet et al., 2009](#)).

et l'intensité des vents d'ouest sur l'Atlantique (flèche noire) sont également représentés. Selon les experts, l'OCM s'expliquerait par une phase intense de NAO positive qui, combiné à un renforcement du *Gulf Stream*, aurait apporté plus de chaleur à l'Europe de l'Ouest durant cette période.

Forçage radiatif⁶

La phase positive persistante de la NAO durant l'OCM semble être associée à des conditions dominantes de l'irradiation solaire ainsi qu'à une activité volcanique réduite. La Figure 2(D) indique un forçage solaire important lors de l'OCM, ce qui se traduit par le fait que l'activité solaire, c'est-à-dire la quantité d'énergie émise au travers du rayonnement solaire, était plus élevée que la moyenne. Plus d'énergie solaire était dès lors captée par la Terre, provoquant un réchauffement. Simultanément, on observe un forçage volcanique neutre voire faible. Cela signifie que peu de cendres et de poussières issues d'éruptions volcaniques étaient émises dans l'atmosphère, laissant de ce fait d'avantage les rayons du Soleil atteindre la surface terrestre, et induisant donc un réchauffement. Le relâchement de cet état océan-atmosphère particulier vers le LIA suggère une réorganisation notable des modèles de circulations océanique et atmosphérique à grande échelle. Notons également la nette différence entre le forçage des gaz à effet de serre⁷ à l'OCM et celui observé depuis la révolution industrielle. Cette différence est un témoin de l'impact de l'Homme sur le climat (Figure 2).

Déforestation

Enfin, les importantes opérations de défrichement durant le Moyen-Âge qui ont entraîné l'extension des terres cultivées aux dépens de zones non cultivées telles que les forêts, les landes et les marais pourraient également avoir contribué à l'OCM. En effet, la réduction générale de la couverture forestière en Occident, dont l'apogée se situe aux alentours des XIII^e et XIV^e siècles, aurait renforcé l'effet de serre. La diminution de la végétation aurait entraîné une baisse

⁶ Forçage radiatif : puissance radiative reçue réduite de la puissance radiative émise par un système climatique donné et induite par un facteur climatique donné.

⁷ Appelés « *GreenHouse Gases* (GHG) » en anglais.

d'absorption du dioxyde de carbone (CO₂) par le processus de photosynthèse, ce qui aurait mené à une augmentation de la concentration de CO₂ dans l'atmosphère. Le CO₂, étant un puissant gaz à effet de serre, cette augmentation aurait contribué à une élévation des températures. Notons toutefois que ce facteur a eu moins d'impact que les facteurs explicités précédemment.

Conclusion

L'épisode de l'Optimum Climatique Médiéval se distingue du réchauffement de l'ère industrielle sur plusieurs points. L'OCM est un phénomène à impact régional tandis que le réchauffement actuel se produit à l'échelle planétaire. Les causes des deux épisodes sont également différentes. L'OCM fut principalement dirigé par des facteurs naturels (circulations et forçages) tandis que le réchauffement de l'ère industrielle est dû aux émissions anthropiques de gaz à effet de serre. La mise en avant de l'OCM par les climatosceptiques comme argument contre le réchauffement climatique ne tient donc pas la route.

Pour en savoir plus...

- <https://uclouvain.be/fr/decouvrir/presse/actualites/les-cernes-des-arbres-montrent-qu-il-n-a-jamais-fait-aussi-chaud-au-cours-des-1200-dernieres-annees.html>
- <https://www.climat-en-questions.fr/reponse/anomalies-climatiques-par-myriam-khodri-pascal-yiou>
- <https://www.rtb.be/article/le-groenland-etait-vert-une-manipulation-historique-pour-attirer-les-colons-au-moyen-age-11236379>

Le changement climatique souffle-t-il sur les cyclones ?

Jeanne Strebelle

Master en sciences géographiques — orientation « Global Change »

Introduction

Parmi les événements extrêmes océaniques, il y a les cyclones, aussi appelés « ouragans » dans l'océan Atlantique et « typhons » dans l'océan Pacifique. Ces phénomènes d'une grande énergie qui se forment sur les océans, génèrent des pluies et des vents extrêmement violents, qui peuvent causer beaucoup de dégâts lorsqu'ils arrivent sur les terres.

Ces phénomènes climatiques qui peuvent être dévastateurs sont donc reliés au climat. Alors qu'actuellement le changement climatique n'est plus une spéculation, de nouvelles hypothèses se forment quant à l'impact de ces changements sur ce type de phénomènes extrêmes.

Pour comprendre l'impact général du changement climatique sur les cyclones, il est intéressant d'analyser l'impact qu'il aura sur leur intensité, leur fréquence ou encore leur localisation. Pour ce faire, il faut d'abord comprendre comment se forment ces cyclones.

Formation d'un cyclone

Lorsque la vitesse des vents dépasse 65 km/h, on parle de tempête et elle est appelée cyclone lorsque la vitesse des vents dépasse 119 km/h.

Un cyclone se forme lorsqu'il y a un ensemble de plusieurs conditions météorologiques spécifiques réunies. Une des conditions principales est la présence d'eau chaude (température supérieure à 26°C), ainsi qu'une zone de basse pression atmosphérique. Les vents vont donc converger vers cette zone. La température élevée de l'eau favorise son évaporation. Par conséquent, l'air chaud et humide remonte vers le haut de la troposphère où il va subir une détente, se refroidir et son humidité condenser pour former un nuage chargé d'eau. Cette condensation relâche la chaleur latente de vaporisation de l'eau dans l'atmosphère, ce qui entraîne une nouvelle baisse de pression atmosphérique et davantage de pluies et d'orages. Les masses d'air qui convergent vers la zone de basse pression vont être déviées par la force de Coriolis, c'est-à-dire par la rotation de la Terre, et un mouvement en spirale va se former, dans le sens antihoraire dans l'hémisphère Nord et dans le sens horaire dans l'hémisphère Sud.

Ceci est le développement de la circulation cyclonique, mais pour qu'un cyclone puisse être créé, il faut qu'une colonne d'air fermée de 30 à 50 km de diamètre soit formée. Au centre, l'air est relativement calme : c'est ce qu'on appelle l'œil du cyclone. Les vents vont donc s'élever en spirale le long de cette colonne, alors qu'à l'intérieur, l'air froid formé à 10-12 km d'altitude, redescend vers la surface de l'eau. Par compression, cet air froid va former une masse d'air chaud au-dessus de lui. Ce mécanisme d'air froid qui redescend et la formation d'air chaud en hauteur serait à l'origine de la création de l'œil du cyclone. La formation initiale de ce phénomène extrême est assez complexe et n'est pas encore complètement comprise.

Pour ce qui est de la trajectoire des cyclones, il est très difficile de la prédire. Une généralité peut être faite : ils se déplacent lentement vers l'ouest avec les vents alizés, tout en étant déviés vers le nord dans l'hémisphère Nord et vers le sud dans l'hémisphère Sud. Une fois arrivé sur les côtes d'un continent, le cyclone va perdre en intensité, car il n'est plus autant alimenté en vapeur d'eau.

Impact du changement climatique

Pour évaluer l'impact du changement climatique sur les cyclones, il est intéressant de se pencher sur les éventuels changements observés dans leur fréquence, leur intensité et leur localisation.

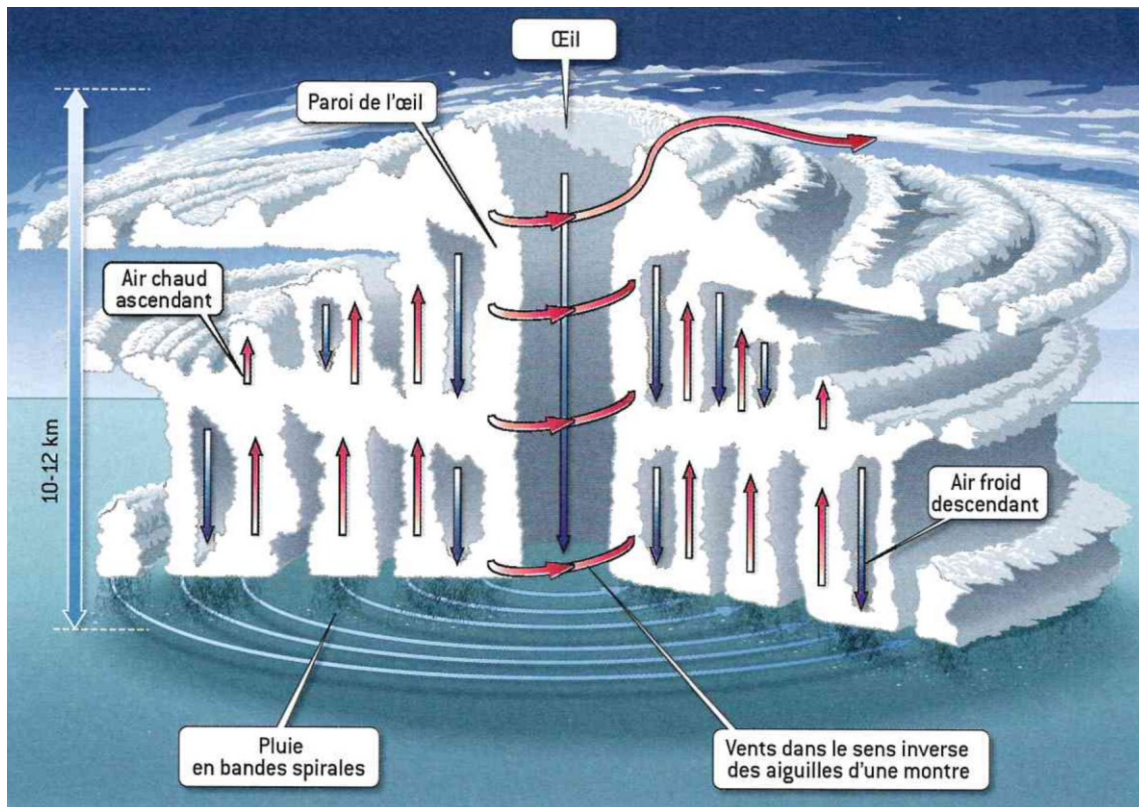


Figure 1 : Coupe schématique d'un cyclone dans l'hémisphère Nord (Source : R. Delmas, S. Chauzy, J.-M. Verstraete, H. Ferré, (2012) *Atmosphère, océan et climat*. Éditions Belin-Pour la Science).

Fréquence

À première vue, les relevés de cyclones depuis la fin du XIX^e siècle semblent indiquer une tendance à l'augmentation de leur fréquence. Cependant, il est important de noter qu'aucun enregistrement officiel n'est disponible avant une certaine période, ce qui peut limiter la fiabilité des données. C'est pourquoi une homogénéisation des données, c'est-à-dire un ajustement qui corrige les données disponibles pour tenir compte des cyclones non détectés avant l'ère de la télé-détection satellitaire (fin des années 1960), est nécessaire. Après cet ajustement, il apparaît qu'il n'y a pas eu d'augmentation significative de l'activité cyclonique au fil du temps. En ce qui concerne les prévisions futures basées sur des modèles, les conclusions sont variées : certains modèles prédisent une augmentation de l'activité cyclonique, tandis que d'autres prévoient des changements minimes, voire une diminution importante de la fréquence des cyclones.

Il faut aussi prendre en considération que les conditions météorologiques peuvent fortement varier d'une année à l'autre. Entre autres, lors des années El Niño, la présence de cyclones dans l'Atlantique est plus faible en raison du refroidissement des eaux.

On retrouve donc pour ce point un manque de consensus dans la communauté scientifique pour établir avec certitude un impact. Ce manque de consensus est causé en grande partie par le manque de données et d'archives disponibles : la période couverte par des données suffisantes n'excède pas 60-70 ans.

Intensité

Concernant l'intensité des cyclones, la communauté scientifique est d'accord pour dire que leur puissance et leur durée augmentent. Au cours des dernières décennies, on observe beaucoup plus de cyclones de catégories 4 et 5 (les plus fortes), c'est-à-dire, avec des vents allant à plus de 210 km/h. Cette augmentation pourrait être expliquée par deux facteurs. Premièrement, les océans se réchauffent en même temps que la planète. L'eau de surface est donc plus chaude, ce

qui accentue la production de la vapeur d'eau, qui est, comme vu précédemment, une des conditions principales à la formation de cyclones. Deuxièmement, la thermocline (l'étendue d'eau qui sépare les eaux chaudes de surface des eaux froides en profondeur) est de plus en plus épaisse. Avant, les vents forts parvenaient à mélanger la couche d'eau chaude avec la couche d'eau froide plus en profondeur, ce qui diminuait la température de l'eau en surface. Mais aujourd'hui, les eaux superficielles sont plus chaudes et donc moins denses. Il est donc plus difficile de les mélanger avec les eaux profondes. Une thermocline plus épaisse a pour conséquence que les vents ne brassent que de l'eau chaude, ce qui permet donc aux cyclones de conserver toute leur force voire de gagner de l'énergie. Ceci explique notamment que des cyclones peuvent prendre ou reprendre leur maximum d'intensité comme lors des cyclones Katrina et Rita en 2005.

Des observations récentes montrent aussi une tendance à l'augmentation des précipitations dans les cyclones. Cette tendance est simplement expliquée par le fait que l'air plus chaud peut contenir plus de vapeur d'eau et donc des quantités plus importantes qui vont précipiter.

Localisation

Aujourd'hui, les cyclones se forment principalement dans le nord-ouest de l'Atlantique et à l'ouest du Pacifique, mais on en retrouve aussi à l'est de ce dernier et dans l'océan Indien. Une tendance à la modification dans ces zones n'est pas clairement identifiée. Toutefois, bon nombre de scientifiques s'accordent sur le fait que le changement climatique influencera une nouvelle distribution spatiale des cyclones ; notamment suite au changement des températures de l'eau, certaines eaux vont avoir la température suffisante pour la formation de ces phénomènes extrêmes.

Conclusion

Les cyclones sont des événements extrêmes et complexes. En raison de leur rareté, il est difficile d'avoir des informations précises. De plus, le manque de données historiques et les variations naturelles du climat rendent l'analyse des changements de ces phénomènes océaniques extrêmes encore plus compliquée. Tout ceci rend l'analyse de l'impact du changement climatique sur les cyclones difficile à établir, notamment en ce qui concerne la fréquence et la localisation. Néanmoins, une certitude peut être établie : l'augmentation de l'intensification des cyclones. Il est donc important de continuer cette analyse, car ces phénomènes peuvent avoir des impacts dévastateurs, d'autant plus s'ils s'intensifient.

Pour en savoir plus...

- <https://www.geo.fr/environnement/changement-climatique-la-mise-en-place-dune-categorie-de-cyclone-inedite-suggeree-par-les-scientifiques-218702>
- <https://meteofrance.com/le-changement-climatique/observer-le-changement-climatique/cyclones-et-changement-climatique>
- <https://theconversation.com/avec-le-changement-climatique-des-cyclones-et-des-ouragans-plus-intenses-66862>
- <https://www.carbonbrief.org/major-tropical-cyclones-have-become-15-more-likely-over-past-40-years>

Les forêts européennes à l'épreuve de l'évolution rapide du climat

Valérien Authelet

Master en sciences géographiques — orientation « Global Change »

Introduction

Les forêts revêtent une importance cruciale en raison de leur capacité à fournir une gamme large et variée de services, tant directs qu'indirects, que l'on regroupe sous le terme de services écosystémiques. Parmi ceux-ci, la séquestration du carbone dans la biomasse par photosynthèse est un facteur clé particulièrement important dans la lutte contre le changement climatique. Avec 43,5 % du territoire européen couvert par des forêts et autres surfaces boisées, ces écosystèmes captent environ 7% des émissions totales de gaz à effet de serre de l'Union Européenne. Malgré leur longue histoire et leur capacité passée à évoluer face aux changements climatiques, la rapidité sans précédent du changement climatique actuel soulève des inquiétudes quant à la faculté des forêts à pouvoir y répondre. Ce rapport examine de près l'avenir des forêts européennes sous le régime du changement climatique et leur aptitude à s'y adapter. Il examine également les principales régions européennes, offrant ainsi une perspective détaillée sur les impacts potentiels, à la fois positifs et négatifs, que ces régions pourraient connaître.

Généralités

Les forêts devront s'adapter non seulement aux changements des variables climatiques moyennes mais également à l'augmentation accrue d'événements météorologiques extrêmes qui entraînent des conséquences bien plus impactantes sur leur croissance et survie. Il est possible d'envisager l'avenir des forêts avec une certaine précision bien que des incertitudes persistent à plusieurs niveaux. Premièrement, étant donné le caractère rare des événements extrêmes, il est difficile de prédire avec précision leur fréquence, leur intensité et leur localisation exacte. Ensuite, la modélisation d'ensemble, qui reprend la moyenne de l'intégralité des modèles, comporte une part d'incertitude non négligeable. De plus, chaque espèce d'arbre réagit différemment face à une perturbation donnée. Enfin, l'avenir des forêts et leur capacité d'adaptation dépendront essentiellement de la trajectoire que l'humanité choisira de suivre en matière de scénarios RCP.

L'élévation de la concentration de dioxyde de carbone (CO_2) dans l'atmosphère ne présente pas exclusivement des aspects négatifs. En effet, il a été observé que l'augmentation du CO_2 atmosphérique exerce un effet fertilisant sur la croissance des plantes. De plus, le réchauffement climatique induit un prolongement de la saison de croissance des végétaux. Ces deux facteurs contribuent à la séquestration du carbone dans la biomasse. Cependant, l'accroissement de la productivité à long terme reste incertain et varie selon les régions, notamment en raison des limitations imposées par le déficit en précipitations. De plus, la résurgence d'un événement extrême ou l'invasion par des espèces exotiques peut anéantir une superficie importante sur une période très courte.

La modification du climat rend les arbres plus sensibles aux invasions d'espèces d'insectes nuisibles pour deux raisons. Étant donné la rapidité du changement climatique actuel, les arbres ne prospèrent plus dans leurs conditions écologiques optimales et doivent s'adapter à ce changement. Comme le cycle de développement des arbres est lent comparativement au changement climatique, seules les essences d'arbres capables de résister à de telles perturbations survivront. Progressivement, la compétition entre les espèces deviendra de plus en plus intense, ce qui modifiera la composition actuelle des forêts : certaines essences supplanteront d'autres tandis que des essences ne pourront plus survivre dans les régions où le climat aura

évolué. De plus, le réchauffement climatique accélère le cycle de développement des insectes et les fait migrer vers des régions nordiques ce qui affectera davantage les arbres.

Différences régionales

En fonction des grandes régions européennes, les forêts ne seront pas impactées de la même manière.

En **région boréale**, la hausse des températures prolongera la période de croissance et favorisera la décomposition de la matière organique du sol, ce qui favorisera l'apport d'azote. La croissance augmentera du court au moyen terme, sauf dans les zones sèches. Des hivers plus doux peuvent réduire le durcissement hivernal des arbres et augmenter leur vulnérabilité au gel. Il y a également une possibilité de migration d'insectes exotiques vers ces régions.

En **région montagneuse**, tout comme en région boréale, les températures augmenteront plus rapidement que dans les autres régions. En général, il y aura une plus grande période de croissance, ce qui améliorera la productivité. La compétition entre les espèces augmentera, ainsi que les attaques par les insectes nuisibles. Les arbres adaptés aux températures plus froides migreront en altitude et seront remplacés par des arbres moins sensibles aux températures élevées.

En **région océanique**, le climat sera plus chaud et plus sec pendant l'été et plus humide pendant l'hiver. La croissance augmentera dans les zones non limitées en eau. Les effets les plus importants du changement climatique sur les forêts tempérées dépendront des facteurs comme le changement des régimes de perturbations telles que les tempêtes, la gravité des sécheresses et la sévérité des attaques par des insectes et des agents pathogènes.

En **région continentale**, le climat sera plus chaud, avec un peu plus de pluie en hiver et un peu moins en été. Les écosystèmes souffriront davantage de manque d'eau, surtout en été, puisque les précipitations risquent d'être inférieures à l'évapotranspiration. Il y aura aussi une multiplication d'attaques de nuisibles. La croissance diminuera dans ces régions et les forêts pourraient même devenir une source de carbone pour l'atmosphère.

Au sud de l'Europe, l'avenir du climat méditerranéen endommagera davantage les forêts. Les précipitations diminueront nettement en été et seront un peu plus importantes en hiver, et le climat sera encore plus chaud. Les événements extrêmes s'accroîtront et deviendront plus fréquents et risqueront d'endommager considérablement les écosystèmes. La productivité, déjà plus faible que dans les régions septentrionales, diminuera à l'avenir. Les invasions par des espèces exotiques y seront récurrentes. Les périodes de sécheresse sous une chaleur extrême accentueront la probabilité d'incendie ainsi que la désertification.

Adaptations et avenir des forêts européennes

Les projections suggèrent qu'entre un cinquième et un tiers des espèces européennes pourraient être exposées à un risque accru d'extinction si les températures moyennes mondiales augmentent de plus de 2 à 3 °C au-dessus du niveau préindustriel. On suggère que de 10 à 50 % des espèces végétales des pays européens disparaîtront probablement d'ici 2100 de leur emplacement actuel. Ce pourcentage augmentera davantage si la migration est restreinte en raison d'une fragmentation continue de l'environnement.

Les hauts lieux de biodiversité comme ceux qu'on retrouve en Méditerranée seront les plus touchés. En effet, les populations fragmentées dans les régions méditerranéennes semblent être moins adaptées génétiquement que les populations plus septentrionales. De plus, le climat deviendra de plus en plus aride, ce qui accentuera les feux de forêt et la désertification. Dans les zones de répartition les plus méridionales, certaines essences les plus répandues seront remplacées par des types de forêts plus xériques⁸ ou par des arbustes et une végétation herbacée. Toutes les forêts qui existent à l'heure actuelle vont migrer vers le nord à la recherche de leur optimum climatique. Les forêts de type méditerranéen vont tendre à se répartir dans des contrées plus nordiques et sont vouées à disparaître le long des côtes. Les forêts de résineux persis-

⁸ Xérique : adjectif qualifiant une plante vivant dans une région sèche.

teront dans le nord de l'Europe. Une compétition plus rude s'établira entre le chêne et le hêtre pour les régions de moyennes latitudes européennes. En bref, selon les prévisions, d'ici 2100, entre 20 et 60 % des superficies forestières en Europe seront devenues plus favorables à la croissance de forêts de chêne de type méditerranéen, à faible rendement tant productif qu'économique.

De manière générale, il semblerait que les feuillus soient plus résistants au changement climatique que les conifères. Il y aurait une tendance à l'expansion des feuillus sempervirents⁹ à croissance lente, ainsi qu'une augmentation du dépérissement et de la mortalité des conifères principalement dûes aux sécheresses. Parmi les feuillus, le hêtre commun est une espèce qui sera particulièrement affectée par le réchauffement climatique en raison de sa sensibilité aux sécheresses. L'allongement de la période de végétation du chêne intensifie la compétition entre ces deux espèces et entraîne progressivement une modification de la composition de la forêt. Les arbres ont la capacité de s'adapter à des perturbations, cependant cette capacité n'est pas infinie.

Contrairement aux forêts tropicales très diversifiées, les forêts tempérées possèdent généralement peu d'espèces, avec un nombre élevé d'arbres dominants. Ce nombre élevé d'espèces dominantes est un facteur-clé pour la résilience des écosystèmes. Les forêts sont capables de s'adapter à leur environnement grâce à leur diversité génétique et à leur capacité à migrer.

La ressource génétique des arbres est conséquente. En moyenne, les arbres maintiennent les niveaux les plus élevés de variation allozymique¹⁰ de tous les groupes de plantes. L'adaptation passe aussi bien par la plasticité phénotypique¹¹ que par la variabilité génétique. Cette variation génétique est capable de favoriser certains traits dans un environnement en mutation. Plus la population est grande et plus la variabilité génétique est élevée, plus la capacité adaptative est importante. Une population à faible plasticité génétique a une probabilité de mortalité bien supérieure. Certaines adaptations morphologiques se sont déjà produites. A titre d'exemple, une tendance à l'augmentation de la LMA¹² a été observée dans des gradients écologiques avec un stress hydrique accru. Certaines essences adoptent la défoliation¹³ en cas de sécheresse extrême pour limiter les pertes en eau. Cependant, une répétition de la défoliation augmente la probabilité de mortalité des arbres.

D'un autre côté, pour rester dans leur gamme de tolérance écologique, les arbres migreront vers des plus hautes latitudes et/ou altitudes. L'histoire postglaciaire de la migration des arbres forestiers en Europe suggère que les déplacements naturels de leur aire de répartition sont limités à 10 à 70 kilomètres par siècle. La migration va entraîner des changements dans la composition et la structure des peuplements forestiers et le remplacement d'espèces indigènes par des espèces exotiques plus compétitives.

Conclusion

En conclusion, l'avenir des forêts européennes demeure encore incertain. Afin de mieux anticiper les effets du réchauffement climatique sur les forêts, il est impératif d'approfondir nos connaissances à l'aide de modèles de végétation et de mener des études sur l'impact spécifique du changement climatique sur les essences principales. Cette démarche permettra d'adapter les essences forestières aux conditions écologiques changeantes.

Pour en savoir plus...

- Carbone 4 : <https://www.carbone4.com/carbone-climat-facteurs-determinants-forets>

⁹ Sempervirent : plante qui conserve ses feuilles tout au long de l'année.

¹⁰ Variation allozymique : elle se réfère à la diversité génétique au niveau des allèles, qui sont différentes formes d'un gène.

¹¹ Plasticité phénotypique : c'est la capacité d'un organisme à exprimer différents phénotypes suite à des changements dans son environnement.

¹² LMA : de l'anglais *Leaf Mass per Area* (masse par unité de surface foliaire), c'est une mesure de la masse de la feuille rapportée à son aire.

¹³ Défoliation : chute naturelle des feuilles.

- Rok-FOR : https://efi.int/sites/default/files/images/efi_rokfor_climate_change_a4_fra_14_01_07_internet.pdf
- Office National des Forêts : <https://www.youtube.com/watch?v=-dWjR238Syw>

Le pouvoir menaçant du méthane : accélérateur silencieux du réchauffement climatique

Seguy Valdo Saa Dongmo

Master en sciences géologiques

Le méthane, gaz à effet de serre notoire, joue un rôle significatif dans l'aggravation du réchauffement climatique. Le méthane (CH_4) est un gaz à effet de serre plus puissant que le dioxyde de carbone (CO_2) sur une période relativement courte. Ses sources d'émission incluent les activités humaines telles que l'agriculture (par exemple, l'élevage de bétail et la riziculture), l'exploitation des combustibles fossiles (comme le gaz naturel et le charbon) et les décharges. En raison de la situation géopolitique internationale actuelle, plusieurs pays de l'Union Européenne envisagent de diversifier leurs sources d'approvisionnement en gaz naturel par le gaz de schiste nord-américain.

Dans ce document, le gaz de schiste comme source d'émission de méthane sera examiné, en expliquant les fuites plus abondantes liées à sa nature ainsi que les méthodes d'extraction. Enfin, les différences entre les fuites de méthane dues à l'extraction et l'utilisation du gaz de schiste et celles dues au gaz conventionnel seront expliquées, mettant en évidence les risques environnementaux associés au gaz de schiste.

Le gaz de schiste comme source d'émission de méthane

Le gaz de schiste est un gaz naturel piégé dans des formations rocheuses de schiste. Son extraction implique la fracturation hydraulique, processus qui consiste à injecter de l'eau, du sable et des produits chimiques à haute pression dans les formations rocheuses pour libérer le gaz. Cette méthode de production est associée à des risques de fuites de méthane tout au long du processus. La fracturation hydraulique commence par le forage d'un puits vertical, suivi d'un forage horizontal dans la couche de schiste. Ensuite, un fluide de fracturation est injecté dans le puits sous pression pour fracturer la roche et libérer le gaz. Une fois la fracturation terminée, le gaz et les eaux de fracturation remontent à la surface.

Étude comparative des fuites de méthane du gaz naturel et du gaz de schiste

Les fuites de méthane peuvent survenir à différentes étapes de la production et de la distribution du gaz. Comparons les fuites de méthane du gaz de schiste et du gaz conventionnel : (ces données proviennent de deux formations de gaz de schiste et de trois formations de gaz de sable étanche aux États-Unis).

Achèvement des puits

Les puits de gaz de schiste ont tendance à avoir des taux de fuites plus élevés pendant l'achèvement en raison de la fracturation hydraulique. Pendant la période de reflux, qui implique la remontée en surface de gaz et d'eaux de fracturation, entre 0,6 % et 3,2 % de la production totale de gaz est émise sous forme de méthane. En moyenne, les pertes de gaz provenant des fluides de reflux s'élèvent à 1,6 %. De plus, pendant la phase de forage, environ 0,33 % de la production totale des puits est émise sous forme de méthane. En combinant les pertes associées aux fluides de reflux (1,6 %) et aux forages (0,33 %), il est estimé que 1,9 % de la production totale de gaz à partir d'un gaz de schiste non conventionnel sont perdues lors de l'achèvement des puits (Tableau 1).

Tableau 1 : Fuites de méthane lors l'exploitation de gaz naturel à partir de puits conventionnels et de formations de schiste, exprimées comme fraction de la quantité totale de méthane produit au cours du cycle de vie d'un puits

	Gaz conventionnel	Gaz de schiste
Émissions lors de l'achèvement du puits	0,01 %	1,9 %
Ventilation de routine et fuites d'équipement sur le site du puits	0,3 à 1,9 %	0,3 à 1,9 %
Émissions pendant le déchargement des liquides	0 à 0,26 %	0 à 0,26 %
Émissions pendant le traitement du gaz	0 à 0,19 %	0 à 0,19 %
Émissions pendant le transport, le stockage et la distribution	1,4 à 3,6 %	1,4 à 3,6 %
Émissions totales	1,7 à 6,0 %	3,6 à 7,9 %

(Source : Howarth et al., [Clim. Change, 2011](#))

Ventilation et fuites d'équipement

Les équipements utilisés dans l'extraction du gaz naturel peuvent présenter des fuites de méthane en raison de leur complexité et de leur entretien inadéquat. Les puits de gaz typiques comportent un nombre important (55 à 150) de connexions à divers équipements tels que des réchauffeurs, des compteurs, des déshydrateurs, des compresseurs, et des appareils de récupération des vapeurs. Ces équipements présentent un risque de fuite, et de nombreuses soupapes de surpression sont spécifiquement conçues pour libérer le gaz de manière délibérée. Les fuites provenant des pompes pneumatiques et des déshydrateurs constituent une part importante des émissions. Selon le GAO (*Government Accountability Office*, ou « Bureau de reddition des comptes du gouvernement des États-Unis d'Amérique »), entre 0,3 % et 1,9 % de la production totale d'un puits tout au long de sa durée de vie est perdue en raison de la ventilation de routine et des fuites d'équipement (Tableau 1).

Pertes pendant la transformation

Les processus de traitement et de transformation du gaz peuvent entraîner des émissions de méthane. En fonction de la qualité du gaz, aucun traitement n'est nécessaire avant transport (0 % de pertes) ; dans le cas contraire, on estime à 0,19 % des pertes liées au traitement.

Pertes de transport, de stockage et de distribution

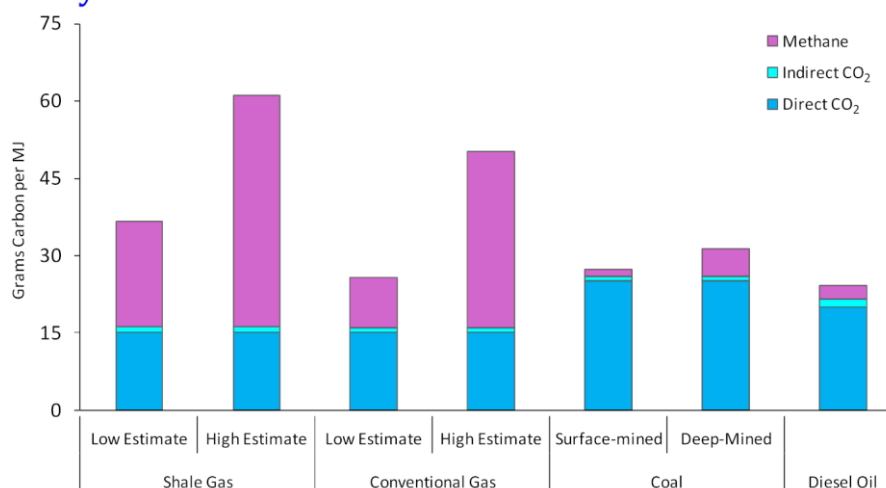
Les pipelines et les installations de stockage peuvent présenter des fuites de méthane, augmentant ainsi les émissions tout au long de la chaîne d'approvisionnement. Les estimations directes des pertes de distribution sont encore limitées. Cependant, l'on estime les pertes liées au transport, stockage et distribution, comme étant comprises entre 1,4 % (limite inférieure probable) et 3,6 % (Figure 1).

Empreintes carbone du gaz conventionnel et du gaz de schiste

En consolidant toutes les pertes estimées, nous constatons qu'au cours du cycle de vie d'un puits de gaz de schiste moyen, entre 3,6 % et 7,9 % de la production totale du puits est libérée dans l'atmosphère sous forme de méthane. Cela représente au moins 30 % de plus, voire potentiellement plus de deux fois les émissions de méthane pour le gaz conventionnel, estimées à entre 1,7 % et 6 %. Il est important de noter que le CH₄ est un gaz à effet de serre beaucoup plus puissant que le CO₂, mais sa durée de vie dans l'atmosphère est dix fois plus courte, ce qui signifie que son impact sur le réchauffement climatique diminue plus rapidement.

Afin de comparer le potentiel de réchauffement global (PRG) du CH₄ et celui du CO₂ de manière précise, il est essentiel de prendre en compte un horizon temporel spécifique.

20-year time horizon



100-year time horizon

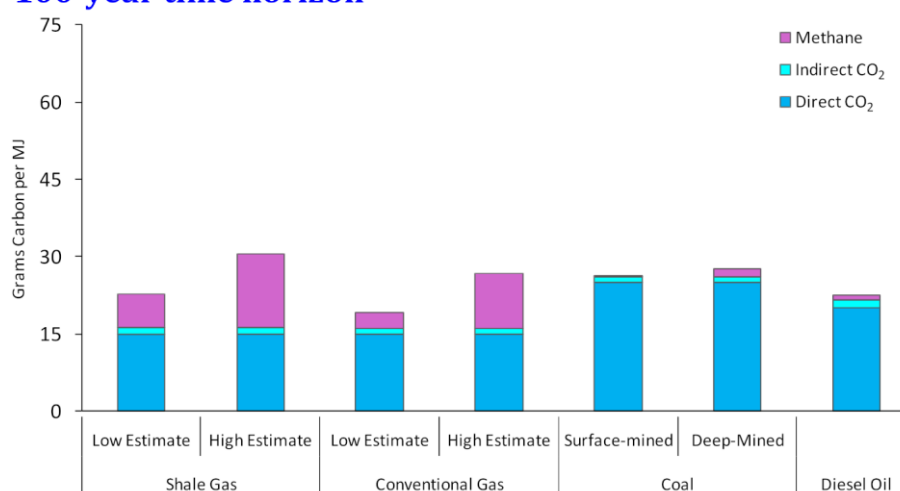


Figure 1 : Comparaison des émissions de gaz à effet de serre du gaz de schiste, du gaz naturel conventionnel et des émissions directes et indirectes du CO₂. (Source : Howarth et al., [Clim. Change, 2011](#))

Sur un horizon de 20 ans, le méthane représente la majeure partie de l'empreinte carbone¹⁴ du gaz de schiste, contribuant de 1,4 à 3 fois plus que les émissions directes de CO₂ (Figure 1). À cette échelle de temps, l'empreinte carbone du gaz de schiste dépasse celle du gaz conventionnel de 22 à 43 %. Bien que la contribution du méthane reste significative sur 100 ans, son impact diminue en raison de la durée de vie plus courte du méthane dans l'atmosphère, comparée à celle du CO₂. Sur cette période plus longue, l'empreinte carbone du gaz de schiste reste supérieure, de 14 à 19 %, par rapport celle du gaz conventionnel (Figure 1).

Conclusions

Il a été montré que le gaz de schiste est plus polluant que le gaz conventionnel en raison des taux de fuites de méthane associées à son extraction, à son traitement et à sa distribution plus élevés (30 % à plus de 100 %). La fracturation hydraulique, bien que technologiquement avancée, pré-

¹⁴ L'« empreinte carbone » représente ici les émissions totales de gaz à effet de serre liées au développement et à l'usage d'un gaz, exprimées en équivalent-CO₂ (c.-à-d., en quantité de CO₂ ayant le même potentiel de réchauffement que les quantités de CH₄ en question) par unité de quantité d'énergie finale générée.

sente des risques environnementaux significatifs, en contribuant de manière importante aux émissions de méthane. Le méthane est un puissant gaz à effet de serre avec un potentiel de réchauffement global bien supérieur à celui du dioxyde de carbone, en particulier dans les premières décennies après son émission. Les efforts pour réduire les fuites de méthane dans le cadre de l'extraction du gaz de schiste sont essentiels pour atténuer l'impact environnemental de cette source d'énergie fossile.

Pour en savoir plus...

- Risque potentiels liés à la production du gaz de la roche mère
<https://doi.org/10.18356/b5d087ec-fr>
- Rémy Mosseri et Catherine Jeandel (dir.) L'énergie à découvert (<https://books.openedition.org/editionscnrs/10893>), et plus particulièrement les chapitres 3 et 4 de la troisième partie, ainsi que les chapitres 2, 3 et 4 de la huitième partie ;
- Wikipédia – Empreinte carbone : https://fr.wikipedia.org/wiki/Empreinte_carbone
- Bureau du Plan – L'empreinte carbone des régions de la Belgique : <https://www.plan.be/publications/publication-2312-fr-l-empreinte-carbone-des-regions-de-la-belgique>

Le changement climatique : un ennemi invisible pour la santé mondiale

Sasha Kolm

Master en sciences géographiques — orientation « Global Change »

Hausse des températures maximales et minimales, élévation du niveau des mers, augmentation de la température des océans, allongement des périodes d'aridité et de sécheresse, ainsi que le recul et la fonte des glaciers : autant de conséquences évidentes du changement climatique ! Cependant, certaines conséquences du changement climatique ne sont pas aussi manifestes, comme par exemple les impacts qu'il a sur la santé mondiale.

Le changement climatique se traduit comme un risque majeur lorsque nous évoquons le sujet de la santé publique. Nous constatons que d'année en année, il y a de plus en plus de liens qui sont établis entre le changement climatique et la santé, révélant des risques importants pour le bien-être humain. Le changement climatique ne fait pas qu'aggraver certaines conditions de santé, il crée également de nouvelles conditions.

Ainsi, nous pouvons relever plusieurs facteurs de stress liés au changement climatique, ces derniers ayant différents résultats sur la santé. Le stress lié aux fortes chaleurs implique une mortalité et une morbidité plus importantes, ainsi qu'une augmentation des cas de troubles cardiovasculaires, respiratoires et neurologiques. Le stress lié aux événements météorologiques extrêmes entraîne des décès, des blessures et des maladies infectieuses. Le changement climatique joue aussi un rôle important sur les maladies à transmission vectorielle, influençant la propagation de maladies comme le paludisme, la dengue, le chikungunya¹⁵, ou encore les maladies transmises par les tiques. D'autres stress liés au changement climatique peuvent être identifiés, tels que les maladies d'origine alimentaire et hydrique, comme le choléra et les infections gastro-intestinales. Ajoutons à cela la sécurité alimentaire, qui peut être parfois défaillante. Enfin, l'augmentation de la pollution atmosphérique augmente les maladies respiratoires telles que l'asthme, les maladies cardiovasculaires ou encore les décès prématurés. Tous ces différents stress peuvent être accompagnés d'un stress mental, comme des troubles de stress post-traumatique, de l'anxiété, des troubles d'adaptation ou encore des dépressions.

Changement climatique

Dans ce travail, nous nous focaliserons sur les impacts du changement climatique sur l'augmentation des maladies respiratoires, en mettant particulièrement l'accent sur les allergies. Pour commencer, il est crucial de bien appréhender le processus du changement climatique au sein de l'atmosphère. Il est généralement admis que les températures de la surface terrestre et de l'atmosphère augmentent, comme en témoignent le réchauffement des océans, la fonte des glaciers, le recul de la glace de mer dans l'Arctique, la diminution de la couverture neigeuse dans l'hémisphère Nord, et l'élévation du niveau de la mer.

Comme souligné dans les récents rapports du GIEC (Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat), « la majeure partie de l'augmentation observée des températures moyennes mondiales depuis le milieu du XXe siècle est très probablement due à l'augmentation constatée des concentrations anthropiques de gaz à effet de serre [...] » Le dioxyde de carbone (CO₂) se positionne en tant que principal gaz à effet de serre d'origine humaine dans l'atmosphère. Sa concentration dans l'atmosphère a augmenté de plus de 35 % entre 1850 et 2005. Au cours des deux dernières décennies, environ 75 % des émissions anthropiques de CO₂ dans l'atmosphère proviennent de la combustion de combustibles fossiles, tandis que les chan-

¹⁵ Le paludisme (ou malaria) ainsi que la dengue et le chikungunya sont des maladies infectieuses transmises par les piqûres de certains moustiques.

gements d'utilisation des terres, notamment la déforestation, expliquent le reste. Ces tendances se reflètent également pour d'autres gaz à effet de serre tels que le méthane (CH₄) et le protoxyde d'azote (N₂O).

Impacts sur la santé

Ainsi, tous ces changements liés à l'atmosphère, à l'océan et au climat ont un impact significatif sur l'être humain, notamment en ce qui concerne les maladies respiratoires et les allergies.

Ces modifications sont à l'origine d'un réchauffement de l'atmosphère, entraînant une augmentation de la production de la biosphère. Les températures plus élevées provoquent une floraison et une pollinisation précoces, ainsi qu'un prolongement de la période de pollinisation pour des espèces produisant du pollen à la fin de l'hiver et au début du printemps, comme les cyprès, les frênes et les bouleaux. Une analyse approfondie des données mondiales sur le pollen a révélé une prolongation de la période pollinique (avec une moyenne de 0,9 jours par an) et une augmentation de la quantité de pollen au cours des deux dernières décennies. Cependant, l'augmentation des températures terrestres et atmosphériques n'est pas la seule à influencer la libération de pollen dans l'air. Les variations du rayonnement solaire, des précipitations et de l'humidité impactent également la création et le transport du pollen dans l'air. En raison d'une exposition accrue aux pollens, la population devient plus susceptible de développer des allergies.

Parallèlement à l'élévation des températures, il convient de souligner l'influence significative des niveaux accrus de dioxyde de carbone dans l'atmosphère sur la stimulation de la croissance végétale. Cette augmentation des concentrations de CO₂ contribue à intensifier la libération de pollen et d'allergènes dans l'air, tout en accentuant l'allergénicité du pollen. En conséquence, ce phénomène augmente le risque global de réactions allergiques au sein de la population exposée.

Malheureusement, le changement climatique ne se limite pas à l'augmentation de la production de pollen et à l'allongement de la saison pollinique. Il est important de noter que les concentrations croissantes de gaz à effet de serre et d'autres particules contribuent également au développement des allergies. Ces gaz à effet de serre et particules se lient aux grains de pollen et aux différentes particules végétales de petite taille. Cette liaison entraîne des modifications au niveau de l'allergénicité des grains de pollen en altérant leurs parois et leurs compositions protéiques. Ce phénomène de pollution peut également abaisser le seuil de réactivité bronchique (la réaction des tubes respiratoires dans les poumons de manière sensible et excessive), voire intensifier l'irritation des muqueuses nasales ou oculaires chez les individus sensibles. Ces polluants induisent donc une modulation des réactions chimiques, accentuant ainsi l'impact sur la santé respiratoire.

Populations les plus vulnérables

Actuellement, les allergies touchent plus de 13 % de la population mondiale. Mais également 20 à 30 % de la population des pays développés souffre d'allergies respiratoires.

Les populations les plus vulnérables sont probablement celles vivant en milieu urbain, exposées de manière plus significative à la pollution, aux divers gaz et particules qui se lient aux grains de pollen. Ces populations urbaines font face à un dilemme, car bien que les villes plantent fréquemment des arbres pour atténuer les îlots de chaleur urbains, ces mêmes arbres peuvent contribuer à une augmentation du pollen.

Les changements climatiques, marqués par l'allongement de la saison de croissance, facilitent également la migration vers le nord d'espèces végétales envahissantes en Europe, particulièrement celles qui libèrent du pollen allergène. Cette expansion de nouveaux allergènes peut intensifier la sensibilisation locale, c'est-à-dire le processus de développement de sensibilité ou d'allergie suite à une exposition à ces allergènes. Un exemple pertinent est observé avec l'herbe chiffon en Europe, dont la propagation est principalement attribuée aux transports et aux activités agricoles. Cependant, le changement climatique offre des conditions propices à la colonisation de nouvelles zones par cette plante envahissante. Ainsi, des individus non allergiques au pollen pourraient développer une allergie, conséquence de l'intrusion de plantes invasives facili-

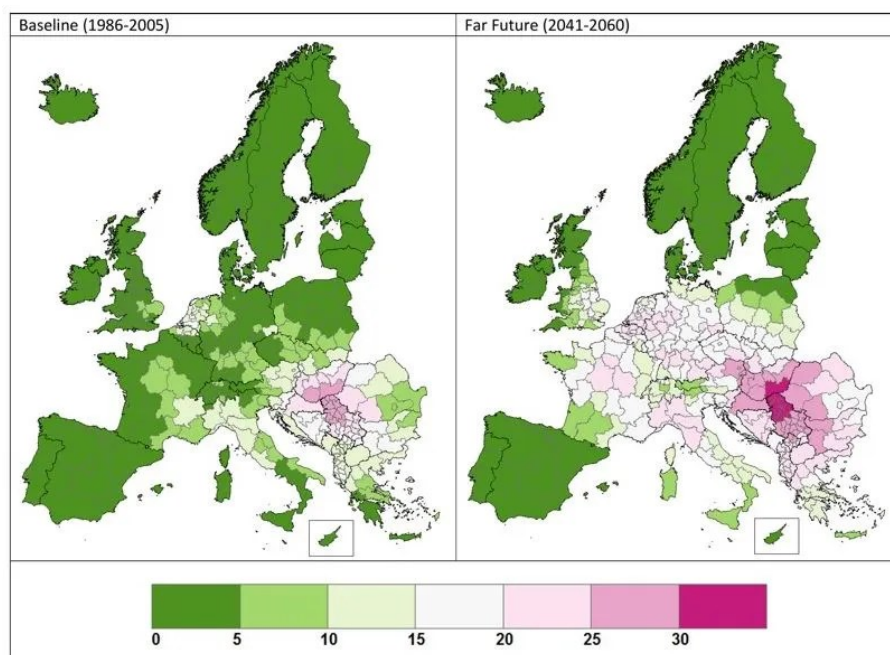


Figure 1 : Pourcentage modélisé de population sensibilisé au pollen d'herbe chiffon à la base (*gauche*) et à l'avenir en supposant un scénario d'émissions modérées de gaz à effet de serre (RCP 4.5 ; à *droite*) (Source : [Lake et al., EHP 2018](#))

tée par les changements climatiques. Comme illustré sur la Figure 1, d'ici 2060, le pourcentage de la population sensibilisée au pollen d'herbe chiffon va considérablement augmenter, surtout dans des pays d'Europe de l'Ouest et d'Europe centrale.

Solutions

Face à ces divers impacts du changement climatique sur les maladies respiratoires, notamment les allergies au pollen, plusieurs solutions sont envisageables. Parmi celles-ci, certaines sont d'ordre général et contribuent également à atténuer le changement climatique. Ces solutions incluent :

- la réduction de l'utilisation des combustibles fossiles et contrôler les émissions des véhicules ;
- la diminution de la circulation privée dans les villes en améliorant les transports publics et en encourageant la marche à pied.

En ce qui concerne spécifiquement les allergies, d'autres mesures peuvent être mises en œuvre, telles que la plantation d'arbres non allergènes dans les zones urbaines, en tenant compte des projections des changements climatiques. Cependant, l'élimination des arbres allergènes n'est pas une solution viable, car elle entraînerait une perte de biodiversité ainsi que des services écosystémiques. Des méthodes de contrôle chimique et mécanique pourraient être envisagées pour faire face à ces nouvelles plantes et pollens invasifs.

À l'échelle individuelle, des solutions peuvent également être mises en place, telles qu'un diagnostic précis et un traitement adéquat des allergies au pollen. En effet, cette affection est souvent sous-diagnostiquée et mal ou non traitée. Par ailleurs, des réflexes simples peuvent être adoptés pendant la saison des allergies au pollen, comme éviter de rester à l'extérieur, porter des lunettes de Soleil, ne pas faire sécher les vêtements à l'extérieur, ou encore maintenir les fenêtres fermées.

Conclusion

Comme évoqué précédemment, le changement climatique engendre de nombreux facteurs de stress, mais dans ce document, nous nous concentrons spécifiquement sur les allergies liées au

pollen, exacerbées par les changements climatiques. Il est important de noter que cette question représente seulement une petite partie des problèmes de santé causés par le changement climatique. Cependant, sur ce seul sujet, le changement climatique a des impacts significatifs, qui méritent une attention particulière, car cela pourrait affecter un nombre plus important de personnes que l'on pourrait imaginer !

Pour en savoir plus...

- National Geographic : <https://www.nationalgeographic.fr/environnement/la-saison-des-allergies-durera-deux-fois-plus-longtemps-a-la-fin-du-siecle>
- OMS : <https://www.who.int/fr/news-room/fact-sheets/detail/climate-change-and-health>
- Observatoire européen du climat et de la santé : <https://climate-adapt.eea.europa.eu/fr/observatory/evidence/health-effects/aeroallergens/pollen>