

LE PETIT  
ILLUSTRÉ  
CLIMAT

# LE CLIMAT

Regards croisés de chercheurs



LA DÉPÊCHE  
DU MIDI

4,90 €

n°52  
COLLECTION  
PETIT ILLUSTRÉ

cnrs

# On s'engage pour celles et ceux qui s'engagent.

Sylvie, Stéphane, Zora...  
Ils sont tous agents du service public, tous engagés pour l'intérêt des autres.

Chez MGEN, on s'engage à leurs côtés en les accompagnant globalement, de la prévention des risques pour leur santé physique et mentale à leur prise en charge en établissement de santé MGEN, en passant par le remboursement de leurs frais médicaux.

MGEN. Première mutuelle des agents du service public.  
On s'engage mutuellement.



La banque coopérative  
de la Fonction publique

CASDEN Banque Populaire - Société Anonyme Coopérative de Banque Populaire, à capital variable - Siège social : 1 bis rue Jean Wiener 71420 Champs-sur-Marne - Siren n° 784 273 776 - RCS Meaux - Immatriculation ORIAS n° 07 027 138 - BFCF - Société anonyme à direction et conseil de surveillance au capital de 170 384 630 euros - Siège social : 35, avenue Pierre Mendès France - 75201 Paris Cedex 13 - Siren n° 493 455 042 - RCS Paris - Immatriculation ORIAS n° 08 045 100 - Credit photo : © Romari Jehanno - Conception : Insigni 2021 - Merci à Jenny, enseignante chercheuse d'avoir prêté son visage à notre campagne de communication.

« COMME MOI,  
REJOIGNEZ LA CASDEN,  
LA BANQUE DE LA FONCTION  
PUBLIQUE ! »

Jenny, Enseignante chercheuse

La CASDEN est partenaire du CNRS Occitanie Ouest.

Pour plus d'informations, contactez :  
Valérie Maria, animatrice régionale CASDEN  
06 77 31 56 81 (appel non surtaxé, coût selon votre opérateur)  
valerie.maria@casden.banquepopulaire.fr



casden.fr



Retrouvez-nous  
chez

BANQUE  
POPULAIRE **+X**



Chères lectrices et lecteurs,

**C'**est avec un grand plaisir que nous vous présentons ce nouveau numéro du « Petit Illustré » consacré au climat. À Toulouse, le CNRS a choisi de rassembler au sein du 14<sup>e</sup> ouvrage de notre collection de Petits Illustrés, les nombreuses expertises scientifiques issues de nos laboratoires pour en faire une référence sur ce thème très présent dans notre quotidien. Quelque 20 laboratoires du CNRS présents en Occitanie Ouest, par la diversité des recherches qu'ils mènent, font ici avancer notre compréhension de la situation climatique et de son devenir. Dans ce numéro, coédité avec La Dépêche du Midi, plusieurs scientifiques du GIEC, chercheurs et chercheuses, ont pris la plume pour partager leurs connaissances et découvertes. Vous découvrirez comment le climat a évolué au fil du temps, les défis actuels auxquels nous sommes confrontés, ainsi que les perspectives possibles. Un focus particulier est également fait sur notre région, l'Occitanie, mettant en lumière des terrains de recherches proches de nous et des initiatives locales en matière de climat.

Plus de 50 scientifiques ont participé à ce numéro, et je les remercie chaleureusement pour leur travail de rédaction, qui donne à comprendre, au gré de propos accessibles, et fondés sur des travaux de recherche actuels, combien l'ensemble des sciences apporte des données essentielles pour mieux appréhender le thème du climat dans sa globalité.

Nous espérons que cet ouvrage vous éclairera et favorisera une meilleure prise de conscience de chacun d'entre nous pour trouver l'adaptation de nos modes de vie. Bonne lecture à toutes et à tous.

**Jocelyn Méré**  
Délégué régional CNRS Occitanie Ouest

# SOMMAIRE

Face au risque climatique, l'engagement des scientifiques est un devoir moral, éthique, humaniste ..... p.2-5

## Le passé ..... p.6-7

- Quelle a été l'influence humaine sur le climat des derniers 150 ans ? ..... p.8-9
- Les grottes, mémoires des climats de surface ..... p.10
- 3200 ans avant nous, les premiers migrants climatiques ..... p.11
- La longue route des données vers la compréhension du changement climatique ..... p.12
- Les moules, des archives biologiques pour comprendre l'impact des climats passés ..... p.13
- Quel est l'impact de l'humain dans la disparition d'oiseaux insulaires ? Une réponse par l'ADN ..... p.14
- Du pollen fossile pour lire l'histoire des paysages européens ..... p.15
- L'océan, régulateur majeur de la composition atmosphérique et du climat planétaire ..... p.16-17

## Le présent ..... p.18-19

- Le GIEC : comment la science mondiale construit un consensus scientifique sur le climat ..... p.20-21
- Pas d'histoires d'eaux sans capteurs citoyens ..... p.22
- Modéliser le climat pour comprendre et anticiper ..... p.23
- Inégalités sociales, inégalités climatiques : une même injustice ..... p.24
- Les glaciers en sursis : un quart de siècle de fonte accélérée ..... p.25
- Face au carbone, les puits naturels à bout de souffle ..... p.26
- Quand le climat et la fragmentation des habitats menacent les écosystèmes ..... p.27
- La santé cognitive des abeilles comme indicateur écologique ..... p.28
- Climat et toxines : la peau des pêcheurs en danger ..... p.29
- Le Grand Nord sous pression ..... p.30
- Mieux prévoir l'océan en combinant modélisation et observation ..... p.31
- Les mécanismes de l'inaction écologique ..... p.32-33



## Le futur ..... p.34-35

- Événements météo extrêmes : à quoi faut-il s'attendre ? ..... p.36-37
- Une mission spatiale révolutionnaire pour mesurer la biomasse des forêts ..... p.38
- Impact du réchauffement climatique sur la biodiversité : un lézard... comme acteur ..... p.39
- Numérique et environnement : limiter l'impact en changeant nos pratiques ..... p.40
- Les modèles climatiques, outils clés pour comprendre le futur ..... p.41
- Ce que la chimie de l'environnement nous dit sur l'état de la planète ..... p.42
- Plantes et climat : une adaptation sous l'angle de la génétique et des mathématiques ..... p.43
- Comment l'économie peut guider vers la neutralité carbone ..... p.44
- Le changement climatique en France : quels scénarios à l'horizon 2100 ? ..... p.45

## Occitanie, chaud devant ! ..... p.46-47

- Les Pyrénées : le château d'eau menacé ..... p.48-49
- Des lacs à la loupe ..... p.50
- Quand les plantes participent à l'évolution des cours d'eau ..... p.51
- Le thermomètre végétal du climat : le cas de l'Adour ..... p.52
- La vigne et le vin face au changement climatique ..... p.53
- La mémoire de la terre ..... p.54
- Surchauffe urbaine et refuges climatiques ..... p.55

# Face au risque climatique, l'engagement des scientifiques est un devoir moral, éthique, humaniste

Le thermomètre s'est encore affolé en cet été 2025 en France ; ailleurs, les aléas climatiques se multiplient. Mais au-delà des faits d'actualité sur ces extrêmes souvent inédits mais assurément prévisibles et donc attendus, c'est la légitimité même de la parole scientifique qui vacille. Entre dérives climatiques et offensives contre la recherche, ce texte interroge les fondements mêmes de notre capacité collective à résister. Face aux attaques contre les savoirs, à l'inaction ou au déni, Christophe Cassou rappelle l'urgence d'un nouveau contrat social comme réponse à la question majeure de l'emballement climatique.



## CONTRIBUTION


**Christophe Cassou,**  
Laboratoire de Météorologie  
Dynamique, auteur principal  
du 6<sup>e</sup> et 7<sup>e</sup> rapport du GIEC

Les émissions de gaz à effet de serre ne baissent toujours pas ; l'objectif de limiter le réchauffement planétaire à 1,5°C, inscrit dans l'Accord de Paris, est inatteignable. Où allons-nous atterrir ? 2°C ? Entre 3°C et 4°C ? Depuis le dernier rapport du Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat (GIEC) en 2021, les mises à jour régulières des indicateurs géophysiques égrainent des vagues de chaleur toujours plus fréquentes et intenses, des sécheresses accrues dans certaines régions contrastant avec des pluies diluviennes dans d'autres, des méga-feux désormais annuels, une hausse du niveau de la mer qui s'accélère, etc. De ces aléas toujours plus sévères,

c'est tout le vivant qui souffre ; les écosystèmes, aussi bien sur terre que dans les mers, mais aussi les sociétés humaines alors déstabilisées. Et dans ces sociétés, ce sont souvent les plus vulnérables et les plus exposés qui deviennent les victimes collatérales d'un monde fondé sur l'accaparement et la prédation — un monde d'inégalités.

## Des preuves qui dérangent

Les sciences de la durabilité qui embrassent les enjeux de climat, de santé, la gestion durable des écosystèmes, de justice environnementale pointent précisément les responsabilités différenciées en matière de risques environnementaux mais aussi les capacités d'agir différenciées



dans la lutte contre les effets du changement climatique et la protection de la biodiversité. Ces sciences-là sont aujourd'hui les cibles d'une guerre éclair sans précédent contre les savoirs et la connaissance, aux États-Unis de manière brutale mais aussi en Europe et en France, de manière plus sournoise, mais redoutablement efficaces. Ces sciences dérangent car elles sont claires, trop claires pour leur laisser l'expression libre.

En effet, par les preuves factuelles qu'elles avancent, en géosciences mais aussi dans le champ des sciences humaines et sociales, elles prouvent sans équivoque que les activités humaines sont intégralement responsables du changement climatique. Ces sciences dénoncent

l'incompatibilité avec les enjeux environnementaux, des modes de vie et visions du monde de certains acteurs de pouvoir. Elles interrogent l'habitabilité pour toutes et tous si les transformations socio-économiques et politiques tardent et si les réflexes de développement antérieurs et en cours ne sont pas abandonnés.

En matière de climat, nous sommes passés du climato-scepticisme qui consistait à mettre un écran de fumée entre savoir et société, à du climato-obscurantisme ou climato-bellicisme qui se matérialise par des attaques frontales sur la fabrique même de la science. Non seulement, on

casse le thermomètre en supprimant l'accès aux données ou en n'assurant plus leur continuité et pérennité mais, en même temps, on brise celles et ceux qui lisent le thermomètre.

### La vigilance s'impose

Aux États-Unis, des chercheurs et chercheuses sont intimidés dans un climat de peur qui se généralise, avec une menace décomplexée sur la liberté académique à travers des purges, la censure sur certains mots ou disciplines, des interdictions de parler à la presse, de communiquer avec des collègues étrangers, ou tout simplement de publier. Mais en France aussi, la vigilance s'impose avec des germes perceptibles de rupture dans le contrat science-société. Les scientifiques deviennent une menace ; à quand leur criminalisation ? Quand on attaque l'Anses (l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail), l'Ademe (l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie), quand des instituts sont murés comme l'INRAE (l'Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement) le fut en 2024, quand le CNRS est régulièrement stigmatisé, quelle signification ? Quelle interprétation du silence des politiques ? L'accès aux savoirs produits par la science est une garantie des droits, notamment dans les contentieux environnementaux qui s'appuient sur les faits et rapports scientifiques, mais aussi en matière de santé publique. Sciences et savoirs sont les sentinelles de la bonne santé d'un régime démocratique.

La crispation autour des enjeux climat et biodiversité était attendue. Tant que l'on était dans les intentions et les



objectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre suite à l'Accord de Paris de 2015, tout allait bien. Quand nous sommes passés à la phase d'implémentation des mesures en 2022-2023 après la parenthèse Covid, les stratégies d'obstruction (désinformation, chantage économique, fragmentation géopolitique, etc.), qui visent à saper la dynamique de transformation qui menace directement des intérêts privés et des privilèges, se sont multipliées. Elles ruissellent au niveau citoyen par tous les canaux, politiques, économiques, médiatiques, pour attiser des craintes, certaines légitimes dans des périodes de grands bouleversements, pour faire émerger un clivage artificiel et au final maintenir le *statu quo*.

Dans ce contexte, nous, scientifiques du climat ou plus largement des sciences de la durabilité,

n'avons d'autre choix que de rester déterminés. Nous avons besoin d'une science indépendante, plurielle et de qualité dans la diversité, pour s'attaquer aux nombreux verrous qui subsistent à la fois dans le monitoring et la compréhension des processus climatiques (dynamique des calottes polaires, circulations océaniques, événements extrêmes, etc.), la modélisation, l'attribution des phénomènes climatiques aux activités humaines, les projections climatiques (présence de point de bascule, déclinaison régionale des effets du changement climatique, etc.).

### L'indispensable médiation scientifique

Les sciences humaines et sociales sont essentielles pour incarner les changements géophysiques futurs dans le quotidien des citoyens et des citoyennes et des décideurs, avec un enjeu de communication sur l'efficacité des leviers d'action à mettre en place et sur l'équité. Un nouveau contrat social est indispensable pour lutter contre le changement climatique. Parce que nos responsabilités et nos capacités d'agir sont différenciées, les messages, les choix et les arbitrages politiques doivent distinguer les publics, et nous avons besoin d'accompagner cette dynamique en portant les faits scientifiques objectifs, robustes, dans la transparence et l'impartialité, comme aide à la décision – une des missions cardinales des scientifiques. Le défi pour nos instituts ne serait-il pas de favoriser ces nouveaux métiers de médiation scientifique ?

La demande de la société est forte en matière de cli-

mat à la fois sur les données mais aussi sur les méthodes et cadres d'utilisation ; en réponse, les services climatiques se développent aujourd'hui. Ce rapprochement science/société est essentiel pour mettre le fait scientifique au cœur de la décision publique. Il s'agit de lutter contre la désinformation, qui devient la norme, et les lobbys que l'on voit s'exprimer tous les jours davantage au Parlement, de manière décomplexée en matière agricole, par exemple. Cette demande de science ne fera que croître en particulier sur les enjeux d'adaptation aux effets du changement climatique.

La France s'est dotée d'un plan d'adaptation qui se base sur une trajectoire de référence de réchauffement aboutissant à +4°C à l'échelle métropolitaine. Les indicateurs géophysiques (chaleurs extrêmes, nombre de jours de nuits tropicales, sécheresses, etc.) indiquent que la France ne pourra pas relever le défi sans transformation profonde et majeure de ses modes de vie. La parole du scientifique sera essentielle dans les espaces de délibération pour contrer les discours lénifiants nourrissant l'illusion d'adaptation sans casse à des niveaux de risques extrêmes dans une France à +4°C, ou conduisant à de la mal-adaptation.

La parole du scientifique sera cruciale pour rappeler aussi que le succès de l'adaptation est conditionné à la réussite de l'atténuation, c'est-à-dire à l'atteinte de la neutralité carbone. L'engagement du scientifique dans un contexte de risques croissants et menaçants est un devoir moral, éthique, humaniste.

Ce *Petit illustré* apporte des regards croisés sur ces enjeux. 🌍



# Le passé

-4,6 milliards d'années ➔ -3200 ans



**-2,3 milliards d'années**  
premières glaciations  
(traces fossiles unicellulaires)

**-540 millions d'années :**  
émergence d'organismes  
multicellulaires au Cambrien

**-445 et -310 millions  
d'années :** glaciations  
fini-Ordovicien et  
Permo-Carbonifère,  
respectivement

**-34 et -5 millions  
d'années :**  
installation du froid  
au pôle Sud et au pôle  
Nord, respectivement

**-2,4 millions d'années :**  
premier représentant  
documenté du genre Homo

**-5200 ans :** début de  
l'impact humain sur la  
végétation européenne

**-3200 ans :** premiers migrants  
climatiques (fin âge de Bronze)

# L



## CONTRIBUTION

**Jean-Michel Hupé,**  
France, Amériques, Espagne,  
Sociétés, Pouvoirs, Acteurs

**Jean-Paul Bobin,**  
journaliste

Le changement climatique contribue, avec les autres impacts écologiques des activités humaines, à perturber l'environnement dans lequel les civilisations humaines se sont déployées depuis plusieurs millénaires. Des approches en sciences humaines et sociales aident à comprendre pourquoi les réactions ne sont pas à la hauteur face à cette menace inédite pour l'humanité. Le sociologue Stanley Cohen a étudié comment des réalités inconfortables (génocide, holocauste) pouvaient être évitées ou éludées ; aujourd'hui, ce sont des milliards de personnes dont la vie est menacée par les activités responsables du réchauffement climatique. Stanley Cohen a identifié trois formes de déni par celles et ceux qui perpétuent des atrocités ou en sont témoins sans rien faire : littéral, interprétatif et d'implication.

Le déni littéral consiste à nier l'existence de ce qui nous dérange : « le réchauffement climatique n'existe pas », « il n'est pas dû aux activités humaines ». Une telle attitude ne s'explique guère par la psychologie. Le rôle des énergies fossiles dans le réchauffement climatique était bien compris au XX<sup>e</sup> siècle et considéré comme une menace sérieuse dès les années 70 par des scientifiques et au plus haut niveau politique. Mais renoncer aux énergies fossiles remet en cause des intérêts puissants, voire la logique même du système capitaliste. À partir des années 70, le climato-scepticisme a été produit par les entreprises des énergies fossiles, alliées à des entrepreneurs, des politiques et même des universitaires dont le pouvoir était menacé par le changement nécessaire de système socio-économique.

*Suite du texte page 18*

# Quelle a été l'influence humaine sur le climat des derniers 150 ans ?

**Le climat des 150 dernières années a été très influencé par les activités humaines, qui sont responsables de la quasi-totalité du réchauffement observé depuis le XIX<sup>e</sup> siècle en moyenne planétaire. L'influence humaine sur le climat est désormais généralisée : elle touche toutes les composantes du système climatique, les échelles régionales (dont le climat de la France) et affecte déjà la fréquence et l'intensité de nombreux événements extrêmes.**



## CONTRIBUTION

Aurélien Ribes,  
Centre national de recherches  
météorologiques

**D**e combien le climat s'est-il déjà réchauffé ? Quelles sont les causes de ce réchauffement et dans quelle mesure les activités humaines y ont-elles contribué ? Voici des questions clés pour la compréhension de l'évolution récente du climat. Ces questions sont traitées par les études dites de détection (mise en évidence) et d'attribution (quantification du rôle des différentes causes) du changement climatique.

La température moyenne planétaire est souvent étudiée pour décrire les variations récentes du climat. Il s'agit d'une moyenne statistique, sur l'ensemble du globe terrestre, de la tempé-

rature de l'air à proximité de la surface – soit la même température que celle donnée dans des bulletins météo. Cette variable présente l'avantage d'avoir été relativement bien mesurée, depuis longtemps, et d'être un bon indicateur du changement climatique.

### L'évolution récente est claire

Le tableau ci-contre à droite, extrait du sixième rapport d'évaluation du GIEC (2021), montre qu'au cours de la décennie 2011-2020, la température moyenne planétaire était 1,1°C plus élevée qu'au cours de la période préindustrielle (1850-1900). Différents types d'études montrent que la quasi-totalité de ce réchauffement (1,1°C) est due aux activités humaines. Les facteurs naturels (dont variations de l'activité solaire, éruptions volcaniques majeures, variabilité naturelle du climat) jouent peu. Dit autrement, le climat de la planète n'aurait pas dû se réchauffer, au cours de cette période précise, en l'absence de la perturbation majeure induite par l'humanité.

Parmi les différentes activités humaines, l'émission de gaz à effet de serre (GES) a induit un réchauffement de 1,5°C, en partie masqué par l'effet refroidissant des émissions d'aérosols

(-0,4°C). Regardé en termes d'espèces chimiques, le CO<sub>2</sub> joue un rôle prépondérant (+0,8°C), devant le méthane (+0,5°C), et les nombreuses autres espèces. La remise à jour régulière de ces chiffres suggère que le réchauffement induit par l'humain a continué d'augmenter au cours des dernières années, pour s'élever en 2024 à +1,35°C, soit une valeur très proche de l'objectif le plus ambitieux des Accords de Paris (1,5°C).

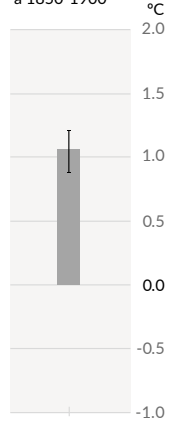
Le même type d'analyse réalisé à l'échelle de la France métropolitaine suggère que l'influence humaine est déjà responsable d'une hausse de température d'environ 1,9°C (en 2024). Le réchauffement observé au cours de la dernière décennie (2015-2024) est plus élevé encore, à +2,2°C, suggérant que la variabilité naturelle a plutôt renforcé le réchauffement anthropique sur la période récente.

Outre la température moyenne, de nombreux indicateurs sont désormais affectés par l'influence humaine ; comme les étendues de glace ou de neige, le cycle de l'eau, la température des océans, le niveau de la mer, etc., et ce dans toutes les composantes du système climatique. Pour chacun de ces indicateurs, l'évolution récente est claire, et l'influence humaine y contribue de façon bien établie.

# Réchauffement observé et rôle des activités humaines

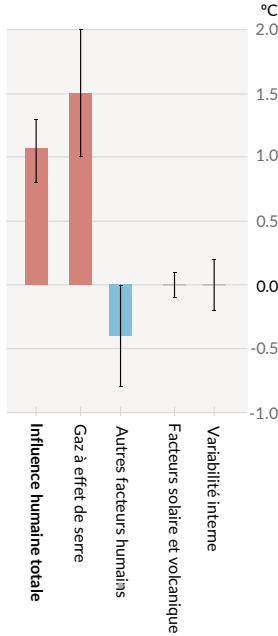
## Réchauffement observé

2010-2019 par rapport à 1850-1900

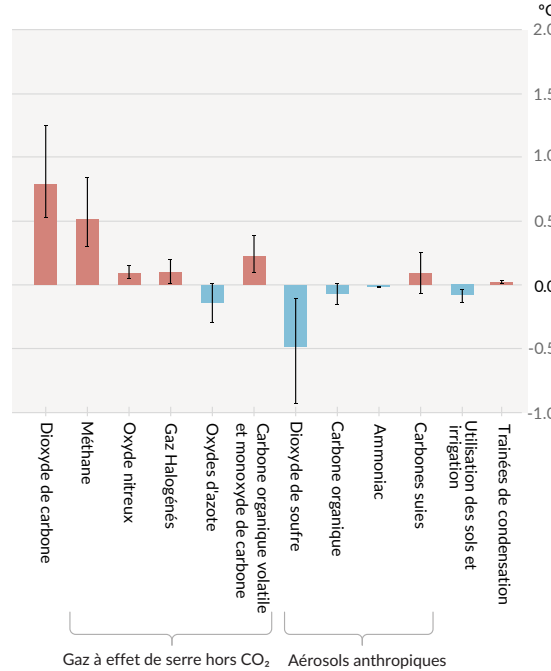


## Contributions de différentes causes au réchauffement

Contributions agrégées



Contributions de différents forçages radiatifs\*



← Contributions estimées au réchauffement observé au cours de la décennie 2010-2019 par rapport à 1850-1900.

\* Un forçage radiatif positif tend à réchauffer le système (plus d'énergie reçue qu'émise), alors qu'un forçage radiatif négatif va dans le sens d'un refroidissement (plus d'énergie perdue que reçue).

**Gauche :** réchauffement climatique observé (augmentation de la température à la surface du globe) et sa fourchette très probable.

**Centre :** changements de température attribués à l'influence humaine totale, aux changements des concentrations de gaz à effet de serre, à d'autres facteurs humains (aérosols, ozone, changement d'affectation des terres), aux facteurs solaires et volcaniques, et à la variabilité interne du climat. Les moustaches (traits noirs) indiquent les fourchettes probables.

**Droite :** changements de température dus aux différentes composantes de l'influence humaine, y compris les émissions de gaz à effet de serre, d'aérosols et leurs précurseurs ; les changements d'utilisation des terres et irrigation ; les traînées de condensation de l'aviation.

Les moustaches indiquent des fourchettes très probables.

Source : Figure adaptée du résumé pour décideurs du sixième rapport du GIEC (groupe de travail 1).

Enfin, l'influence humaine est désormais très claire sur l'évolution de plusieurs types d'événements extrêmes. L'intensification des extrêmes chauds (canicules, nuits tropicales, etc.), des épisodes de fortes précipitations, des sécheresses du sol, ainsi que la diminution des vagues de froid, sont déjà des conséquences de

l'influence humaine sur le climat. La science permet désormais d'établir un lien direct entre les émissions de GES passées et l'intensité de certains événements extrêmes particuliers. Les dégâts causés, amenant bientôt peut-être la possibilité de dédommagements ou de justice climatique. ⑤

# Les grottes, mémoires des climats de surface



## CONTRIBUTION

**Laurent Bruxelles,**  
Travaux et recherches  
archéologiques sur les cultures,  
les espaces et les sociétés

**L**e climat régit une grande partie des phénomènes qui se produisent à la surface de la terre : façonnage des paysages, dynamique des océans et même évolution des organismes vivants. Pourtant, remonter le temps pour avoir une idée précise des climats passés n'est pas simple ! Bien sûr, on sait reconnaître certains traits caractéristiques dans le paysage mais comment être plus précis ?

Les glaces, les dépôts marins ou lacustres sont de bons enregistreurs qui vont fournir aux spécialistes toute une série d'indicateurs (pollens, isotopes, poussières, etc.). Ils documentent cependant une grande surface et l'on a besoin parfois de savoir ce qu'il s'est passé dans une région bien précise, par exemple pour faire le lien avec des changements biologiques ou des adaptations culturelles. Pour cela, on peut

Composée de géomorphes et de géoarchéologues, une équipe de recherche s'intéresse à l'évolution des formes du paysage mais aussi aux sociétés qui les ont occupées. De fait, le climat intervient à tous les niveaux de ses recherches, que ce soient les phénomènes d'érosion, les variations climatiques (humide/sec, froid/chaud) mais aussi les comportements humains face à ces changements. C'est donc par le prisme de l'interdisciplinarité qu'elle aborde cette question en mobilisant des enregistrements en surface mais aussi dans les grottes.

mobiliser d'autres enregistreurs, uniques et protégés dans l'obscurité des grottes. Le goutte-à-goutte qui permet la formation des stalactites et des stalagmites provient de la surface, juste au-dessus de la grotte, et donne donc une information locale.

Mais depuis quelques années, les chercheurs ont découvert dans les grottes une nouvelle source d'information : les guanos. Ce sont les déjections des chauves-souris qui, chaque soir, chassent à l'extérieur et reviennent gavées d'insectes. L'intérêt est que leur collecte ne concerne que quelques kilomètres autour de la grotte et qu'une fois accumulé, le guano se conserve très bien. On y trouve alors des pollens, des restes d'insectes, de nombreux isotopes d'une richesse sans égal qui donnent une idée non seulement du climat, mais aussi des paysages et des activités humaines alentours. Voilà de quoi compléter avec précision les informations paléogéographiques à grande échelle en intégrant les particularités locales qui nous concernent au premier chef. Des scientifiques toulousains mènent ce type de recherche en mission à travers le monde, au Botswana par exemple. 📍



↑ Grotte de Chipongwe, en Afrique. © Laurent Bruxelles

# 3 200 ans avant nous, les premiers migrants climatiques



## CONTRIBUTION

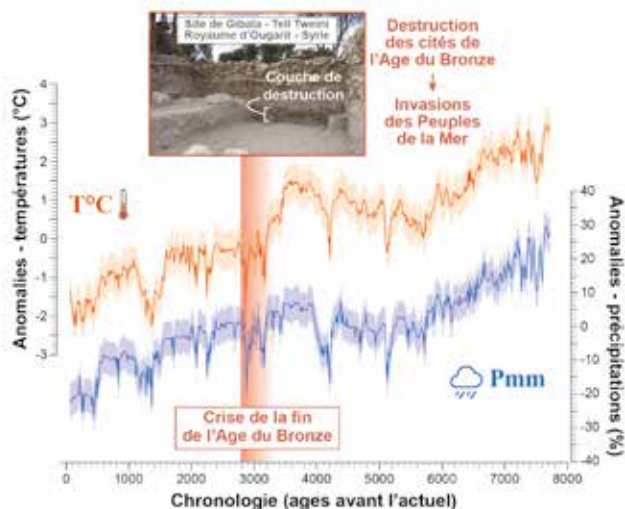
David Kaniewski, Frédéric Luce  
et Thierry Otto,  
Centre de recherche sur la biodiversité  
et l'environnement

Les historiens et historiennes observent depuis longtemps un lien entre le climat et le destin des civilisations. À Toulouse, les recherches en paléoenvironnements s'intéressent notamment aux relations complexes entre l'évolution du climat et le développement des sociétés méditerranéennes depuis des millénaires. Les catastrophes naturelles telles que les sécheresses, les inondations et les mauvaises récoltes plongent régulièrement les populations dans le chaos. Les changements climatiques, sur le long terme, peuvent participer au déclin voire la disparition de sociétés pourtant florissantes comme ce fut le cas pour l'Empire romain. Mais la période entourant la fin de l'Âge du Bronze, il y a 3 200 ans, est peut-être le meilleur exemple de l'interaction explosive entre dérèglement climatique et bouleversements des sociétés.

Les recherches en paléoenvironnement à Toulouse sont axées sur les relations complexes entre l'évolution du climat et le développement des sociétés méditerranéennes depuis des millénaires. Au cœur se trouve l'étude de la manière dont les sociétés anciennes ont perçu et réagi face à des événements climatiques puissants qui ont redirigé leurs trajectoires.

À la fin de l'Âge du Bronze, les royaumes de la Méditerranée se sont tous effondrés. Des guerriers mystérieux, les Peuples de la Mer, ont envahi et détruit toutes les cités prospères depuis la Grèce jusqu'à l'Égypte. Pendant 300 ans, les écritures vont disparaître, le commerce maritime va s'arrêter et même l'Égypte pharaonique va s'effondrer. Durant cette période, la biodiversité a été impactée, avec une réduction drastique du nombre d'espèces. Un changement climatique important qui s'est produit à cette époque a sans doute contribué à ces bouleversements. Le froid et la sécheresse ont anéanti les récoltes, affaiblissant

les populations, créant des épisodes de famine. Les peuples n'auraient pas eu d'autres choix que de migrer, abandonnant des territoires devenus trop secs afin de chercher des terres plus fertiles pour s'installer, créant des conflits à leur arrivée avec les populations locales qui subissaient la même situation. Le climat a, sans doute, poussé ces peuples à migrer massivement, déstabilisant l'ensemble des structures politiques et plongeant les royaumes dans le chaos. Ces peuples, les Peuples de la Mer, pourraient être considérés aujourd'hui comme les premiers migrants climatiques enregistrés dans l'Histoire. 📍



Reconstruction des anomalies de températures et de précipitations en Méditerranée orientale depuis 8 000 ans. La crise de l'Âge du Bronze qui a précipité les royaumes dans le chaos correspond à une période froide et sèche qui a bouleversé les moyens de subsistance des peuples méditerranéens et engendré des migrations massives, il y a 3 200 ans.

© D. Kaniewski/CRBE/OMP

# La longue route des données vers la compréhension du changement climatique



## CONTRIBUTION

**Samuel Morin,**  
Centre national de recherches  
météorologiques

**L**e climat se définit par la gamme des conditions météorologiques qui peuvent être rencontrées en un lieu donné. Ceci s'établit classiquement sur la base de données météorologiques observées sur une longue période, généralement trente ans. Pour détecter un changement climatique, il est donc nécessaire de disposer d'au moins soixante ans de données. La collecte systématique de ces données, réalisée avec patience par des générations de météorologues, est essentielle pour comprendre l'évolution du climat, et aboutir à la production de séries climatiques de référence.

Les méthodes de mesure météorologique ont considérablement évolué depuis plusieurs décennies, passant de techniques manuelles à des stations automatisées, complétées par des observations radar et satellitaires. Cependant, malgré la richesse des informations fournies par ces tech-

**Depuis plus d'un siècle, météorologues et scientifiques collectent des informations pour suivre l'évolution du climat. Les méthodes et outils ont évolué, et les réanalyses climatiques de ces données permettent de reconstruire avec précision le climat du passé.**

nologies, les séries de mesures restent souvent trop courtes et disparates pour une analyse climatique complète.

Les réanalyses permettent de combiner diverses observations et modèles météorologiques pour reconstituer les conditions météorologiques depuis 1950, et d'estimer le climat et son évolution, en tout lieu sur Terre. Les scientifiques à Toulouse travaillent sur des réanalyses couvrant l'Europe depuis 1960 et produisent actuellement une réanalyse pour la France à une résolution

kilométrique. Ces études exploitent pleinement les données disponibles et seront bientôt complétées par des approches d'intelligence artificielle, mais elles sont affectées par des biais induits par l'hétérogénéité spatio-temporelle des observations utilisées. Toutefois, les longues séries de données conventionnelles resteront indispensables pour fournir des informations de référence sur l'évolution du climat, enrichies par les avancées scientifiques et technologiques dans les domaines météo et climat. 📍

↓ Un agent du CNRM réalise des mesures grâce à la station météo au sol, sur un bord de Seine, durant la campagne Paname 2022. © Cyril FRÉSILLON / CNRM / CNRS Images



# Les moules, des archives biologiques pour comprendre l'impact des climats passés



## CONTRIBUTION

Clio Der Sarkissian,  
Centre d'anthropobiologie  
et de génomique de Toulouse

Les changements climatiques affectent la biodiversité des océans. Pour mieux comprendre comment cette biodiversité s'adapte, les scientifiques ont identifié un excellent modèle d'étude : les moules. Ces dernières jouent un rôle écologique important en soutenant d'autres espèces de leurs écosystèmes, ont une grande valeur commerciale et vivent dans des environnements côtiers variés. Selon les populations, la forme de leur coquille varie. L'objectif de l'équipe de recherche est donc de démêler les facteurs à l'origine de ces variations, que ces facteurs soient génétiques ou environnementaux (pH, température, salinité).

Les chercheurs et les chercheuses s'intéressent non seulement aux moules que l'on connaît aujourd'hui sur nos côtes (et parfois dans nos assiettes), mais aussi à celles du passé. On retrouve

Les scientifiques étudient les variations morphologiques et génomiques des moules dans le temps et dans l'espace grâce aux techniques d'ADN ancien et de morphométrie 3D. En retraçant comment les moules se sont adaptées aux changements climatiques passés, les équipes de recherche essaient d'apporter des éléments pour prédire leurs réponses aux changements présents et futurs, ainsi que leurs conséquences écologiques et commerciales.

leurs coquilles conservées dans les collections des muséums, dans des carottes de sédiments ou encore dans d'anciennes « poubelles » mises au jour par des fouilles archéologiques. Certaines de ces coquilles ont plus de 6 000 ans, et toutes sont utilisées comme témoins des changements climatiques. Des optimisations techniques sont nécessaires pour analyser à la fois l'ADN et la forme de ces coquilles, notamment l'extraction d'ADN fortement dégradé avec le temps ainsi que l'analyse

morphologique haute résolution à partir de scans de microtomographie 3D. De telles approches multidisciplinaires, permettront de mieux comprendre les liens entre environnement et adaptations morphologiques et génomiques dans l'espace et le temps. Il sera alors possible de mieux anticiper la réponse de la biodiversité marine face aux changements d'aujourd'hui et de demain, et d'essayer de prédire les effets sur les écosystèmes côtiers et sur la consommation humaine. 📌



↑ Spécimens historiques de coquilles de moules au Muséum d'histoire naturelle du Danemark, Copenhague.

©Clio Der Sarkissian



↑ Acquisition des scans 3D de coquilles de moules par micro-tomodensitométrie aux rayons-X.

©Clio Der Sarkissian



↑ Modèle 3D d'une coquille de moule.

©Clio Der Sarkissian

# Quel est l'impact de l'humain dans la disparition d'oiseaux insulaires ?

## Une réponse par l'ADN



### CONTRIBUTION

**Catherine Thèves,**  
Centre d'anthropobiologie et de  
génomique de Toulouse  
**Ben Warren,**  
Institut de systématique, évolution,  
biodiversité, Muséum national  
d'histoire naturelle, Paris



↑ Sources du matériel utilisé pour la série chronologique génétique. De gauche à droite : os fossile pré-humain, spécimens de musée, prélèvements de sang d'oiseaux actuels.  
© À gauche et au milieu : Ben Warren. À droite : Dubi Shapiro

Le monde traverse actuellement une crise environnementale marquée par un déclin jusqu'à la disparition de nombreuses espèces ; selon les scientifiques, l'activité humaine est en cause. Dans les Mascareignes (îles de l'Océan Indien), l'ADN pré-humain de plusieurs espèces menacées d'oiseaux permettra de mieux mesurer cet impact.

**L**es espèces rares sont-elles devenues rares uniquement à cause des activités humaines ou étaient-elles déjà plus rares que d'autres avant le premier contact avec l'homme ? L'ADN, le code génétique d'un organisme, contient des informations sur la taille de sa population passée. Cependant, dans la plupart des régions du monde, l'humain affecte la nature depuis 100 000 ans et il est très difficile d'obtenir de l'ADN fiable à partir de spécimens aussi anciens.

Les îles de La Réunion, Maurice et Rodrigues (les Mascareignes), situées dans l'océan Indien, sont restées des environnements vierges jusqu'à l'arrivée des navires européens, il y a environ 400 ans. Après l'arrivée de l'humain, les chan-

gements environnementaux ont été exceptionnellement sévères, incluant des changements climatiques locaux dus à la disparition drastique des forêts. Dès lors, de nombreuses espèces des Mascareignes sont aujourd'hui éteintes ou menacées.

Cette arrivée étant récente, des spécimens de musée et des ossements fossiles d'oiseaux couvrent toute la durée des activités humaines. En partenariat avec le Muséum national d'histoire naturelle de Paris, le laboratoire à Toulouse prélève de l'ADN sur ces fossiles et spécimens de musée. L'ADN se dégradant rapidement après la

mort de l'organisme, cette tâche nécessite un environnement dédié. Mais en concentrant les molécules, l'équipe de recherche a obtenu de l'ADN pré-humain de plusieurs espèces menacées.

Cet ADN devrait permettre de mieux comprendre l'importance des facteurs humains par rapport aux facteurs naturels dans le déclin des espèces d'oiseaux menacées d'extinction. Il devrait aussi fournir des informations importantes liées à la crise environnementale actuelle, en expliquant pourquoi certaines espèces déclinent alors que d'autres continuent à prospérer. 🍌

# Du pollen fossile pour lire l'histoire des paysages européens

En étudiant les pollens fossiles, les scientifiques retracent 12 000 ans d'évolution des paysages européens. Cette lecture du passé éclaire l'impact combiné du climat et des sociétés humaines sur la biodiversité, et guide les actions écologiques d'aujourd'hui.



## CONTRIBUTION

Florence Mazier,  
Géographie de l'environnement

Les changements climatiques et l'utilisation des terres sont les principaux moteurs de la perte de biodiversité, mais leur impact a évolué au fil des siècles. À partir de grains de pollen fossiles, conservés dans les sédiments de plus de 1 600 sites à travers l'Europe (lacs et tourbières), des scientifiques de Toulouse explorent les paysages de ce continent et sa diversité floristique au cours des 12 000 dernières années<sup>1</sup>.

Entre 12 000 et 5 200 ans en arrière, l'impact humain restait faible. Les paysages étaient dominés par des forêts de bouleaux et de feuillus, avec une diversité relativement stable. Cependant, à partir de 5 200 ans, l'expansion des espaces ouverts a progressivement fait reculer les forêts mixtes, marquant une intensification des activités humaines et créant une mosaïque paysagère variée. Dès 1 700 ans, l'agriculture a modifié la végétation de

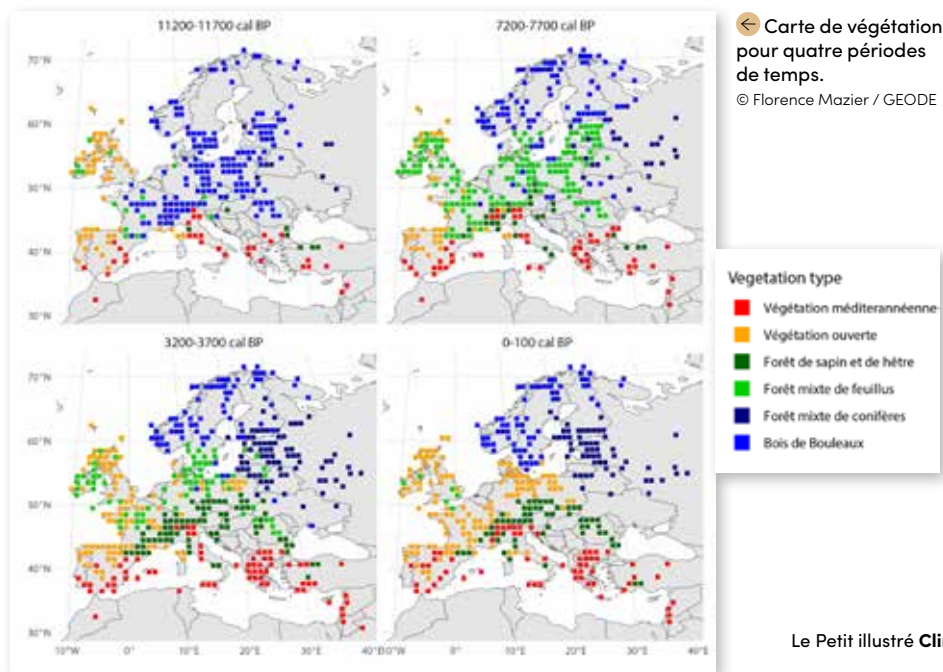
manière plus marquée, réduisant la diversité et homogénéisant les paysages européens.

L'analyse des interactions entre climat, usage des terres et biodiversité permet de mieux comprendre les changements environnementaux actuels et de concevoir des stratégies pour restaurer des écosystèmes résilients. Les résultats montrent que l'impact humain a commencé dès 5 200 ans avant aujourd'hui, avec un pic de pression entre 1 200 et 1 700 ans BP (Before Present). À la fin de l'holocène, près de 60 % des modifi-

cations de la végétation étaient dues aux activités humaines.

Enfin, l'étude du dernier interglaciaire (entre 129 000 et 116 000 ans) révèle une végétation hétérogène, dominée par des habitats ouverts, façonnés par des perturbations locales et la mégafaune. Un élément remettant en question l'idée de forêts fermées et offrant des perspectives pour la conservation et le ré-ensauvagement des écosystèmes modernes.

1. Ces recherches sont menées dans le cadre du projet ITN Terranova.



# L'océan, régulateur majeur de la composition atmosphérique et du climat planétaire



## CONTRIBUTION

Anny Cazenave,  
Catherine Jeandel,

Laboratoire d'études en géophysique  
et océanographie spatiales

### Un millefeuille liquide

Les courants marins transportent des masses d'eau qui se différencient par leur température (T) et leur teneur en sel (S), qui déterminent leur densité : une eau froide est plus dense qu'une eau chaude ; une eau plus salée est plus dense qu'une eau qui l'est moins. Tel un millefeuille, les masses d'eau s'empilent entre fond et surface, des plus denses aux plus légères. Ce millefeuille liquide est mu par les courants marins, tel le Gulf Stream qui se forme dans le golfe du Mexique, tourne vers le nord depuis le sud de la Floride et traverse l'Atlantique en direction des côtes norvégiennes.

**La régulation du climat planétaire par l'océan repose sur deux mécanismes : la circulation générale océanique et la vie marine. L'imbrication des deux joue un rôle majeur sur la composition de l'atmosphère.**

### La vie dans l'océan

L'océan est le siège d'une vie intense, qui se développe en assimilant les nutriments dissous (carbone, azote, phosphate, calcium, silice) et les métaux, très peu concentrés mais essentiels. Le phytoplancton assimile ces nutriments grâce à l'énergie solaire, via le mécanisme de la photosynthèse. Il alimente ainsi du zooplancton brouetteur, qui nourrit à son tour les poissons et donc l'humanité. La vie en surface des mers fournit une ressource alimentaire majeure tout en transformant du carbone dissous en matière solide.

Ce carbone est présent dans l'atmosphère sous forme de gaz carbonique,  $\text{CO}_2$ . Il se dissout dans l'eau. Une partie de la matière solide ainsi formée chute vers les profondeurs à la mort des organismes. Une fraction de cette « neige marine » est redissoute en chemin par des bactéries. La matière qui atteint le fond est enfouie dans les sédiments marins. De la surface aux abysses, ce mécanisme qui séquestre du  $\text{CO}_2$  est appelée « pompe biologique du carbone ». Les flux naturels de  $\text{CO}_2$  échangés entre atmosphère et océan sont de l'ordre de 90 gigatonnes par an. L'océan joue donc un rôle clé dans le climat terrestre. On évalue que, sans ce mécanisme de séquestration, la concentration de  $\text{CO}_2$  dans l'atmosphère serait le double de ce qu'elle est aujourd'hui. 🌍

Ce courant s'écoule sur une épaisseur atteignant 1 200 m, transportant des eaux chaudes et relativement salées en raison de leur origine. En montant vers le nord, ces eaux refroidissent et se densifient : dans les mers nordiques et celle du Labrador, elles plongent « en cascade » vers les profondeurs. Les nouvelles eaux ainsi formées, froides et salées, repartent vers le sud en longeant les côtes des Amériques entre 1 300 et 3 500 m de profondeur. Autour de 40 degrés de latitude sud, elles s'infléchissent vers l'est et tournent autour de l'Antarctique pour irriguer les océans Indien et Pacifique. Elles reviennent en surface, essentiellement par les détroits d'Indonésie, le cap de Bonne-Espérance et remontent l'océan Atlantique, pénètrent le golfe du Mexique, et puis tout recommence...

En moyenne, ce ballet prend mille ans. Ces transports sont gigantesques, le courant autour de l'Antarctique représente 140 fois le débit de toutes les rivières du monde ! Ce gigantesque tapis roulant permet d'échanger de la chaleur et de l'eau entre atmosphère et océan, entre latitudes basses et hautes. Ces échanges conditionnent notre climat actuel, stable depuis environ 10 000 ans, soit la fin de la dernière grande glaciation. Le couple océan/atmosphère est donc un régulateur essentiel du climat de la Terre.



## Quand l'océan se réchauffe, la mer monte

À cause de l'accumulation de gaz à effet de serre dans l'atmosphère, due aux activités humaines (majoritairement du dioxyde de carbone, suite à la combustion des énergies fossiles et la déforestation), la Terre est aujourd'hui dans un état de déséquilibre énergétique : elle renvoie moins d'énergie vers l'espace qu'elle n'en reçoit du Soleil. De la chaleur s'accumule dans le système climatique et la Terre se réchauffe. On estime que sur les 50 dernières années, 90 % de ces excès de chaleur sont stockés dans l'océan. Les 10 % restants servent à réchauffer la basse atmosphère et les surfaces continentales ainsi qu'à faire fondre la banquise arctique, les glaciers et les calottes polaires (Antarctique et Groenland). Conséquence directe du réchauffement de l'océan (qui se dilate) et de la fonte des glaces continentales : la mer monte. Cette hausse est mesurée en routine depuis plus de trente ans

par une constellation de satellites artificiels. En moyenne, la mer s'est élevée de 10 cm sur cette période mais deux à trois fois plus dans certaines portions des océans tropicaux, affectant les îles basses et parfois très peuplées qui occupent ces régions. Quelle que soit la trajectoire future des émissions de gaz à effet de serre, la mer continuera à monter au cours des prochains siècles en raison de la chaleur déjà stockée dans l'océan et de la longue durée de vie des gaz à effet de serre déjà émis dans l'atmosphère. Mais pour rester optimiste, rappelons que la mer montera moins vite si l'on réduit nos émissions ; et prévoir, c'est déjà s'adapter. En France, l'actuel Plan national d'adaptation au changement climatique propose diverses mesures pour minimiser les impacts négatifs du changement climatique sur les populations et les territoires à risque. Alors, on s'y met tous et toutes !

# Le présent

de 1850 → 2021



**1850 :**  
début de la révolution industrielle

---

**1950 :** premier modèle atmosphérique

---

**Depuis 1950 :**  
augmentation massive des émissions de CO<sub>2</sub>

---

**1988 :**  
création du GIEC

---

**Depuis 2000 :**  
fonte accrue des glaciers

---

**2021 :**  
record de température enregistrée en Europe (48,8°C en Sicile, Italie)

# A



## CONTRIBUTION

Jean-Michel Hupé,  
France, Amériques, Espagne,  
Sociétés, Pouvoirs, Acteurs

Jean-Paul Bobin,  
journaliste

lors que des changements climatiques historiques, bien moindres que le changement actuel, ont pu fortement perturber des civilisations, le déni interprétatif consiste à nier non pas le changement climatique mais sa gravité. Ce déni s'appuie depuis les années 70 sur deux promesses complémentaires : économique et technologique. Le discours économique n'a eu de cesse de promouvoir la croissance économique (basée en partie sur les énergies fossiles) qui, en rendant les sociétés plus riches, devraient leur permettre de trouver plus tard et à moindre coût des « solutions » (miracles) pour résoudre les problèmes. Les économistes ont la foi qu'il existe toujours une solution technologique à condition d'y mettre le prix. Alors que le rythme des innovations peut donner l'illusion que c'est le cas, la complexité du système Terre, des écosystèmes et des sociétés est en fait bien trop grande pour qu'on sache comment intervenir pour « réparer » le climat ou les écosystèmes. Mais la technologie peut permettre à une élite de faire sécession et de se protéger à la fois des aléas climatiques et, par la force, des populations laissées à l'abandon. Une autre forme de perversion interprétative est la mode de l'« éco-anxiété », qui renvoie à une détresse face aux dangers climatiques et écologiques, certes légitime mais qu'on devrait gérer individuellement pour ne pas trop en souffrir. Le terme est dépolitisant, en invisibilisant à la fois les pouvoirs économiques et politiques qui détruisent activement nos conditions de vie et les autres émotions que cela suscite, comme la colère ou l'indignation.

Suite du texte page 35

# Le GIEC : l'articulation internationale des sciences du climat pour un consensus scientifique

Depuis sa création, le GIEC a rassemblé des milliers de scientifiques provenant de dizaines de disciplines pour synthétiser les connaissances sur le climat. Le GIEC fournit une aide objective à la décision via un portfolio de solutions techniques, sociétales et fondées sur la Nature. Il vise à limiter les risques et menaces sur l'habitabilité de la planète pour toutes et tous, dus à un climat qui chauffe vite, trop vite.



## CONTRIBUTION

**Christophe Cassou,**  
Laboratoire de Météorologie  
Dynamique, auteur principal  
du 6<sup>e</sup> et 7<sup>e</sup> rapport du GIEC

les enjeux climatiques. Ses rapports portent sur trois volets : les causes géophysiques du changement climatique en cours et les futurs possibles ; les conséquences du changement climatique et les risques associés pour les écosystèmes et les sociétés humaines ainsi que les stratégies d'adaptation ; les leviers dits d'atténuation ou de décarbonation visant à diminuer les émissions de gaz à effet de serre pour limiter le réchauffement planétaire. Le GIEC a rendu son 6<sup>e</sup> rapport en 2023 et débute son 7<sup>e</sup> cycle.

### Son cadre

Le GIEC ne produit pas de recherche et ne fait pas de recommandations ; il fait une synthèse et une analyse critique des articles scientifiques les plus récents dans le but de fournir un socle commun de connaissances pour le monde entier et tous les acteurs (politiques, grands groupes industriels et économiques, finances, syndicats, éducation, ONG etc.) impliqués dans les enjeux climatiques. Exhaustivité, objectivité, rigueur, robustesse et transparence sont les piliers du processus d'écriture des rapports, qui se conclut par un « résumé à l'intention des décideurs » d'une

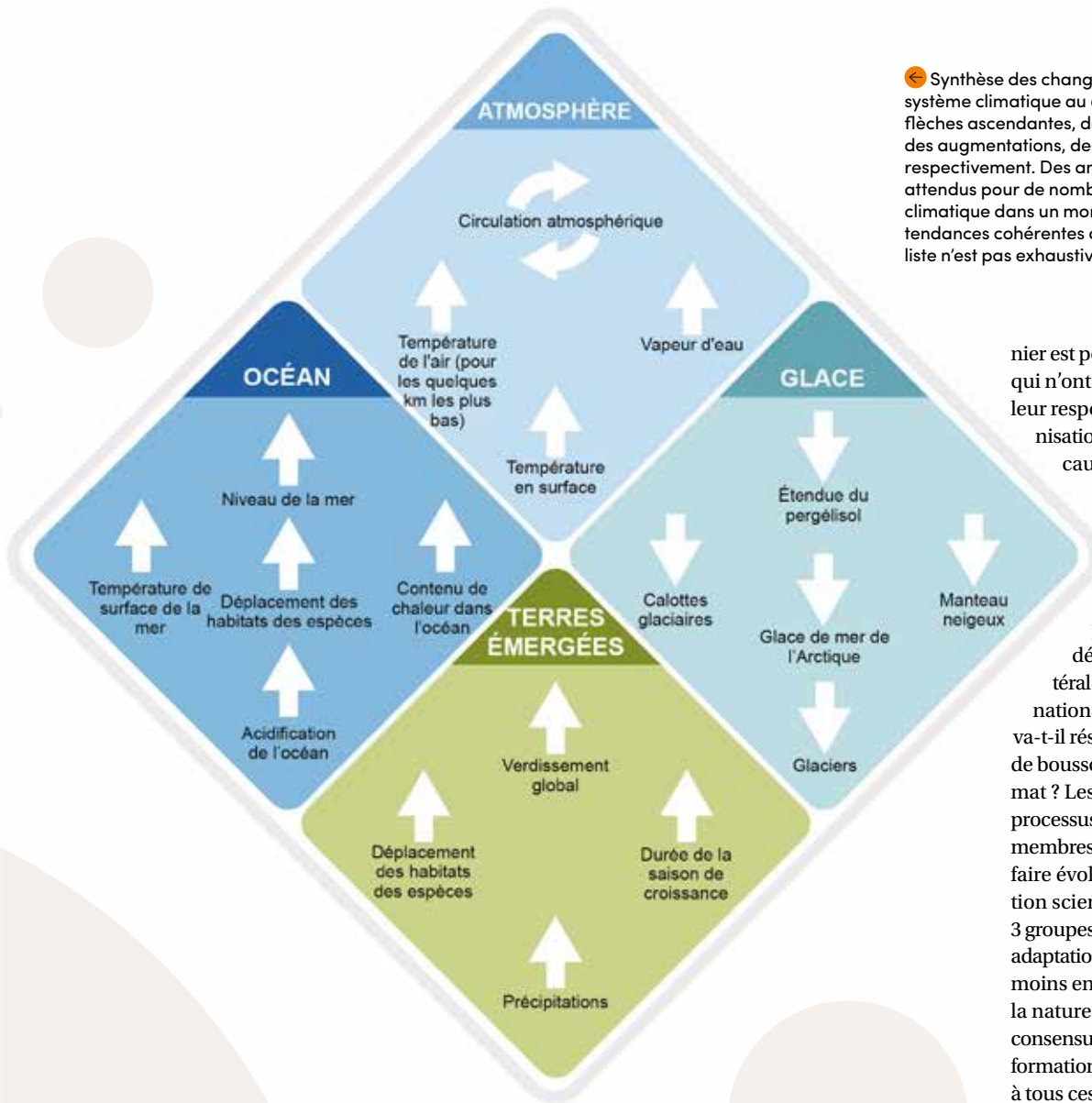
quarantaine de pages dont la formulation, et par là même le contenu, sont approuvés mot à mot et à l'unanimité par les représentants des 195 États membres.

C'est l'ensemble de ce processus dit de distillation – de l'écriture par une assemblée de 782 scientifiques pour le 6<sup>e</sup> rapport, à l'approbation en présence des chercheurs et des politiques – qui fait toute la force des conclusions du GIEC. Les travaux du GIEC consistent à rendre accessible un consensus scientifique, fondé sur la synthèse de la littérature scientifique internationale et endossé par tous les États sans exception. Les conclusions du GIEC ne peuvent en ce sens ni être comparées à celles d'une étude scientifique unique, ni être assimilées à des avis ou opinions. Il importe de préciser que, lors des séances d'approbation du résumé, le résultat scientifique n'est jamais remis en cause en tant que tel. Les échanges entre scientifiques et délégués aboutissent le plus souvent à des clarifications. En revanche, certaines reformulations peuvent amoindrir considérablement la portée politique des conclusions du rapport, dans un jeu diplomatique et géostratégique subtil. Ce der-

**L**e Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du climat (GIEC) est un organe international créé par les Nations Unies en 1988. Les 195 États de l'ONU en sont membres et il regroupe environ 800 co-auteurs scientifiques de toutes nationalités.

### Ses missions

Le GIEC a pour mission de produire de manière périodique une évaluation de l'information scientifique, technique et socio-économique disponible dans la littérature scientifique en lien avec



← Synthèse des changements significatifs observés dans le système climatique au cours des dernières décennies. Les flèches ascendantes, descendantes et circulaires indiquent des augmentations, des diminutions et des changements, respectivement. Des analyses indépendantes des changements attendus pour de nombreuses composantes du système climatique dans un monde qui se réchauffe montrent des tendances cohérentes avec le réchauffement. Notez que cette liste n'est pas exhaustive. © IRPCC

nier est porté en particulier par les pays pétroliers qui n'ont aucun intérêt à voir pointer clairement leur responsabilité, les pays du Nord dont l'organisation économique est clairement remise en cause, ou encore par des alliances de circonstances de pays qui visent à retarder l'action.

### Ses défis actuels

On observe actuellement que les principales puissances mondiales se détournent du cadre de dialogue multilatéral porté par les grandes organisations internationales telle que l'ONU. Comment le GIEC va-t-il résister à cette dynamique et garder le rôle de boussole qu'il assure lors des négociations climatiques ? Les dangers d'ingérence politique dans le processus internes du GIEC sont grands. Les États membres ont aussi la volonté manifeste de ne pas faire évoluer le cadre d'évaluation de l'information scientifique depuis toujours partitionné en 3 groupes distincts (géophysique/constat, risque/adaptation, solution/atténuation), alors qu'il est de moins en moins adapté pour intégrer aux mieux la nature systémique des enjeux. Quel poids du consensus scientifique dans un contexte de désinformation qui se généralise ? Le GIEC survivra-t-il à tous ces obstacles ?

# Pas d'histoires d'eaux sans capteurs citoyens



## CONTRIBUTION

Vincent Raimbault,  
Laboratoire d'analyse et d'architecture  
des systèmes

La Terre est une machine complexe où chaque élément – océans, forêts, atmosphère, glaciers... – est relié aux autres. Quand l'un bouge, tout le reste peut vaciller. Pour mieux comprendre ce grand tout, il faut donc l'observer, le mesurer, le décortiquer. Et c'est là qu'entrent en scène... les capteurs !

Ils mesurent une donnée – la température, la salinité, la pression – et la transforment en un signal compréhensible par les humains. À Toulouse, au laboratoire, des chercheurs et des chercheuses concentrent leurs efforts sur un domaine particulièrement sensible au changement climatique : l'hydrosphère, soit l'ensemble des eaux de la planète, depuis les rivières de nos campagnes jusqu'aux profondeurs des océans.

Pas facile cependant d'observer un univers aussi immense et agité. L'océan, à lui seul, couvre

Pour comprendre le fonctionnement de la Terre, les scientifiques doivent s'appuyer sur des observations et des mesures d'une grande variété de paramètres. Les capteurs sont au cœur de l'acquisition de ces données : ils permettent de mesurer des observables allant de la température de l'eau à la vitesse du vent, en passant par le comptage d'espèces, la détection de polluants, la composition de l'eau...

70 % de la surface terrestre et plonge en moyenne à 3 680 mètres de profondeur. Sans parler des marées, des courants, des tempêtes... Un vrai défi pour la recherche scientifique !

Face à cette immensité, les scientifiques sont en infériorité numérique. La solution ? Multiplier les capteurs... et les rendre accessibles à tous en développant de petits capteurs autonomes, simples, économiques, conçus pour être utilisés par les citoyens et les citoyennes eux-mêmes. Une façon d'impliquer chaque personne dans la surveillance des ressources en eau – un enjeu crucial, notamment en Occitanie.

Cerise sur le gâteau : ces capteurs nouvelle génération sont fabriqués à partir de composants électroniques prévus à l'origine pour des objets du quotidien comme les montres connectées. Grâce à l'impression 3D haute résolution, ils deviennent étanches et prêts à plonger.

Avec ces capteurs citoyens, l'équipe de recherche fait le pari d'une science plus ouverte, plus agile, au service de tout le monde. Pour mieux observer l'eau, et mieux préserver notre planète bleue. 🍷



↑ Prototype de sonde multiparamètres, vue ici du côté mesure optique avec les capteurs d'oxygène dissous, de chlorophylle et de turbidité de l'eau.

© Vincent Raimbault /  
LAAS-CNRS

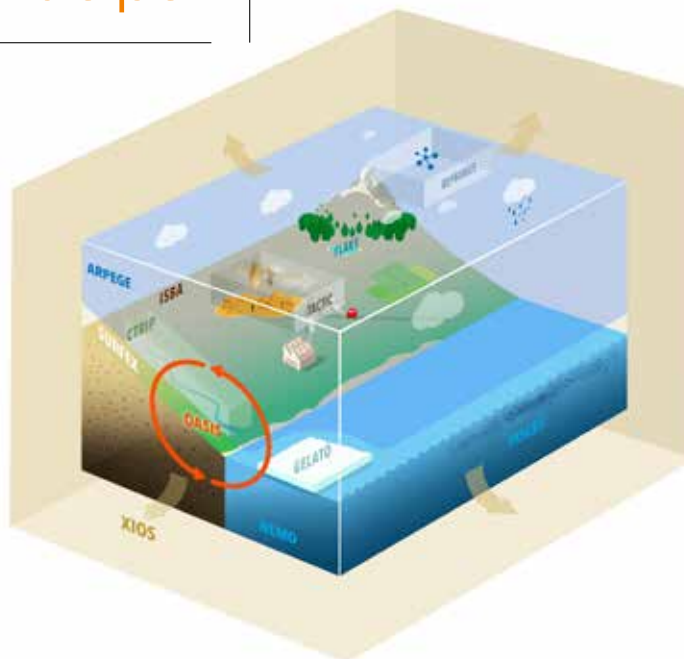
# Modéliser le climat pour comprendre et anticiper

Pour comprendre le climat et anticiper ses évolutions, les scientifiques s'appuient sur un outil numérique central : le modèle climatique.



## CONTRIBUTION

Aurore Valdoire,  
Centre national de recherches  
météorologiques



← Schématisation  
des processus pris  
en compte dans un  
modèle de climat  
© CNRM/OMP

Un modèle de climat est un programme informatique qui fournit une représentation du système climatique terrestre. Dans le monde réel, le climat est le résultat d'un équilibre qui s'établit entre l'océan et l'atmosphère. Sur les océans, la banquise joue un rôle majeur de régulateur en empêchant une partie de l'énergie reçue par le soleil de pénétrer dans l'océan. De même, la végétation sur les continents modifie la façon dont le sol va pouvoir échanger de la matière avec l'atmosphère. Un modèle de climat est donc une représentation de ces milieux relativement différents et vise à comprendre les interactions entre eux. Il est basé sur les connaissances scientifiques de la physique, de la chimie et de la biologie, et sur la capacité à convertir ses connaissances en programme informatique.

Les modèles de climat sont utilisés pour étudier l'impact de perturbations dans un milieu contrôlé, mais leur développement est devenu une activité scientifique à part entière. En effet, ce sont des outils complexes pensés pour reproduire les processus les plus importants du système climatique. Mais comment savoir ce qu'il est important de représenter ? Les premières générations des modèles complets, qui représentent les interactions entre les principaux milieux, datent de la fin du XX<sup>e</sup> siècle. Depuis, les modé-

lisateur les ont constamment affinés et complexifiés pour inclure des processus qu'ils jugent clefs. Comprendre quels processus sont vraiment importants pour améliorer les modèles ou même analyser les défauts des modèles et essayer de les relier à des processus mal représentés, permet de faire progresser notre compréhension du système climatique lui-même et fait partie de la recherche actuelle. Ainsi les modèles de climat sont à la fois des outils de compréhension et, en même temps, ils concentrent nos connaissances. 📌

# Inégalités sociales, inégalités climatiques : une même injustice

**Les plus riches polluent le plus, les plus pauvres subissent : la justice environnementale passe aussi par la justice sociale. Cette question des inégalités environnementales entre les différents groupes sociaux est au cœur de recherches menées à Toulouse.**



## CONTRIBUTION

**Marianne Blanchard,**  
Centre d'étude et de recherche,  
travail organisation pouvoir

**P**eut-être avez-vous déjà entendu parler de l'Anthropocène, terme désignant l'entrée dans une nouvelle ère géologique, caractérisée par l'impact des activités humaines sur le système planétaire. Pourtant, tous les êtres humains sont loin d'être responsables : de fait, il y a un lien très fort entre les inégalités environnementales et les inégalités sociales. Les premières sont multiples : elles peuvent désigner l'inégale responsabilité dans la dégradation de notre environnement, ou encore à l'inégale exposition et capacité à faire face à ses conséquences. Quant aux inégalités sociales, elles renvoient d'abord aux inégalités économiques, mais aussi aux styles de vie.

Si l'on considère uniquement la crise climatique, les groupes sociaux les plus riches à l'échelle

mondiale sont de loin les plus émetteurs en gaz à effet de serre. Les deux tiers du réchauffement climatique depuis 1990 peuvent être attribués aux 10 % les plus riches (dont le revenu mensuel est au minimum de 3 200 €) ! En effet, ils ont des modes de vie et de consommation très énergivores (voyages en avion, etc.) ; en outre, ils investissent souvent leur épargne dans des industries très polluantes (pétrole...). Leur rôle est également symbolique, puisqu'ils proposent des modèles de réussite fondés sur la consommation, incitant le reste de la population à vouloir les imiter.

Principaux responsables, les plus aisés sont pourtant les moins vulnérables face aux catastrophes climatiques. Ceci est vrai à l'échelle mondiale : les pays les plus pauvres sont généralement les plus exposés aux risques climatiques, eux qui ont de surcroît une moindre capacité à y faire face via des infrastructures adaptées. Mais c'est aussi vrai à l'échelle locale : par exemple, lors des canicules en France, les habitants des quartiers urbains défavorisés sont plus fortement touchés par des températures extrêmes, du fait de l'absence d'espaces verts (qui produit des îlots de chaleur), et n'ont souvent pas les moyens de partir « se mettre au vert ».

Alors, justice climatique et justice sociale, même combat ?

Alors, justice climatique et justice sociale, même combat ?

📍 Photo aérienne prise à Recife, capitale de l'État du Pernambouc au Brésil. De chaque côté de la rivière, deux réalités sociales. © Adobe stock



# Les glaciers en sursis : un quart de siècle de fonte accélérée

**En réponse au réchauffement global, les glaciers fondent sur l'ensemble de la planète. Conséquences : ils contribuent à la montée du niveau marin. Les risques glaciaires sont accentués et le rôle de château d'eau naturel dans certains bassins versants est remis en cause.**



## CONTRIBUTION

**Etienne Berthier,**  
Laboratoire d'études en géophysique  
et océanographie spatiales

**N**otre planète compte plus de 200 000 glaciers repartis partout sur Terre, avec une concentration aux hautes altitudes et dans les régions polaires. Si tous les glaciers fondaient, le niveau moyen des mers monterait de 30 cm environ. C'est un stock d'eau plutôt modeste par rapport aux deux grands inlandsis (étendue de glace recouvrant un continent) que sont le Groenland et l'Antarctique, qui contiennent l'équivalent de 7 m et 68 m de niveau des mers.

Mais contrairement aux inlandsis, les glaciers sont proches des populations et impactent directement leur ressource en eau. Un glacier est en effet un véritable château d'eau naturel qui stocke sous forme de neige et de glace en hiver et rend cette ressource en été (sous forme d'eau de fonte) au



moment où les populations et écosystèmes en ont le plus besoin. C'est dans les vallées arides comme celles d'Asie centrale ou des Andes, au pied de hautes montagnes englacées, que ce rôle hydrologique est le plus important. Les glaciers constituent parfois une véritable menace pour les populations, par exemple quand les vastes lacs qui se forment suite au recul glaciaire se déversent brutalement dans les vallées via des crues dévastatrices.

de trois piscines olympiques chaque seconde ! Aussi ils contribuent à 20 % de la hausse actuelle du niveau des mers. En moins d'un quart de siècle, les géants glacés ont perdu 5 % de leur volume total. Les Alpes détiennent le triste record de la fonte la plus rapide, avec une perte de près de 40 % de leur volume de glace. Dans les Pyrénées, un glacier disparaît chaque année et la chaîne de montagne ibéro-française ne comptera plus de glaciers dans seulement dix ans, au mieux quinze... 🍷

👉 La fonte des glaciers fait peser le risque d'une élévation du niveau des mers, provoquant inondations côtières, déplacements de populations et perturbations des écosystèmes.

© Adobe stock

À Toulouse, les scientifiques ont exploité l'imagerie satellitaire pour dresser la première cartographie planétaire des évolutions glaciaires depuis l'an 2000. En réponse au réchauffement global, les glaciers fondent à une vitesse vertigineuse, l'équivalent

# Face au carbone, les puits naturels à bout de souffle



## CONTRIBUTION

Sarah Berthet, Christine Delire,  
Centre national de recherches  
météorologiques

Le carbone est un élément chimique clef de la vie sur terre, il est indispensable au fonctionnement de toutes les cellules vivantes. Les différents compartiments du système composant la Terre (les océans, l'atmosphère et les surfaces continentales) absorbent et/ou relâchent du carbone sous plusieurs formes, comme le dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) ou le méthane ( $\text{CH}_4$ ). De ce fait ils participent tous au « cycle du carbone », c'est-à-dire aux échanges ou au stockage de carbone entre les compartiments du système terre.

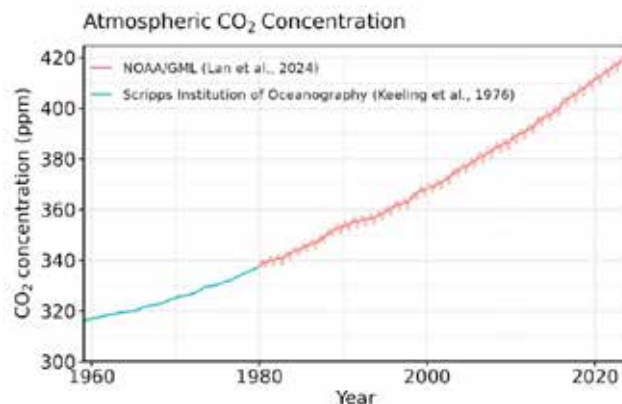
À Toulouse, un modèle numérique du climat mondial est développé. Grâce à cet outil, les scientifiques tentent de représenter l'intégralité de ce cycle du carbone, afin de réaliser des projections climatiques (au profit du GIEC, ou du Global Carbon Project). Le suivi des concentrations atmosphériques en  $\text{CO}_2$  et en  $\text{CH}_4$  est crucial, car ces deux gaz piègent une partie du rayonnement infra-rouge que la Terre envoie dans l'espace, et contribuent à augmenter la température de la sur-

face terrestre. L'évolution de cet « effet de serre » est critique pour les organismes vivants sur terre.

La concentration atmosphérique en  $\text{CO}_2$  a crû de 52 % depuis la période préindustrielle (1850). La combinaison des plus longues séries d'observations de  $\text{CO}_2$  réalisées en environnement non-perturbé par la pollution directe (graphique ci-dessous) montre que la concentration en  $\text{CO}_2$  est passée de 316 parties par million (ppm) en 1959 à 419 ppm en 2023. Elle dépassait déjà 427 ppm en février 2025.

Cette forte augmentation est due aux activités humaines, et en particulier à l'utilisation massive d'énergie issue de combustibles fossiles (charbon, pétrole, gaz), à la fabrication du ciment et à la déforestation. Toutes ces consommations ont relâché 40,9 Peta-grammes (où 1 Peta-g équivaut

à 1 000 000 000 000 grammes) de  $\text{CO}_2$  dans l'atmosphère en 2024. Heureusement dans le même intervalle de temps (l'année 2024) l'océan global a absorbé et stocké 10,6 Pg $\text{CO}_2$ , et la végétation et les sols des continents 8,4 Pg $\text{CO}_2$ , ce qui a permis de retirer 19 Pg $\text{CO}_2$  de l'atmosphère. Toutefois la capacité d'absorption des réservoirs océaniques et continentaux n'est pas infinie, et l'accumulation du dioxyde de carbone les mène à saturation. Une fois ces deux réservoirs saturés, le  $\text{CO}_2$  s'accumulera d'autant plus rapidement dans l'atmosphère, et augmentera d'autant plus l'effet de serre. Il est donc nécessaire de limiter nos émissions de  $\text{CO}_2$  afin de limiter l'effet de serre et le réchauffement climatique, et de protéger la capacité des océans et des continents à absorber du carbone. 📌



Augmentation de la concentration atmosphérique moyenne en  $\text{CO}_2$  (ppm). Ces mesures en surface ont été acquises par le Scripps Institution of Oceanography de 1958 à 1979 à l'observatoire du Mauna Loa et aux stations du pôle Sud. Les données à partir de 1980 sont réalisées par la NOAA/GML.

Source : Global Carbon Project

# Quand le climat et la fragmentation des habitats menacent les écosystèmes



## CONTRIBUTION

Jose Maria Montoya,  
Station d'écologie théorique  
et expérimentale

Imaginez une chaîne alimentaire composée d'algues mangées par de petits invertébrés, mangés à leur tour par des poissons. C'est un écosystème en équilibre. Même si les populations fluctuent, toutes les espèces prospèrent.

En outre, l'écosystème fournit des services qui sont bénéfiques pour la société, comme la purification de l'eau et la séquestration du dioxyde de carbone.

Maintenant, avec l'augmentation des températures en raison du réchauffement climatique, cela modifie les besoins physiologiques de toutes les espèces observées. Les poissons mangent trop de proies invertébrées, ce qui entraîne une croissance massive des algues, réduisant ainsi la clarté de l'eau. L'écosystème perd son équilibre.

Mais les effets du réchauffement climatique se manifestent en tandem avec ceux de la fragmentation des habitats. Si l'écosystème est isolé, certains

Le changement climatique et la fragmentation de l'habitat sont deux des plus grandes menaces pour la biodiversité et les écosystèmes au niveau mondial. Un groupe de recherche a développé une nouvelle théorie pour prédire les effets individuels et combinés du réchauffement et de la fragmentation sur la biodiversité, la dynamique des communautés et le fonctionnement des écosystèmes, et l'a testée expérimentalement en utilisant l'installation unique du Metatron aquatique.

déséquilibres entre les populations de prédateurs et de proies peuvent entraîner l'extinction de populations locales. En revanche si l'écosystème est relié à d'autres écosystèmes, la population locale disparue peut être sauvée par l'immigration.

Malheureusement, nous en savons très peu sur les effets combinés du réchauffement climatique et de la fragmentation de l'habitat. L'équipe de recherche basée à Moulis (Ariège) tente de combler cette lacune en utilisant des approches complémentaires. Tout d'abord, les scientifiques

développent des modèles mathématiques pour acquérir de l'intuition et générer des prédictions. Ensuite, des expériences manipulant le réchauffement et la fragmentation, utilisant l'installation unique du Metatron aquatique, sont développées pour tester ces prédictions. Le groupe de recherche a constaté que le réchauffement dans les écosystèmes isolés tend à avoir des effets plus néfastes sur la biodiversité et les services écosystémiques que le réchauffement dans les écosystèmes interconnectés. 🍷



Les effets du réchauffement climatique et de la fragmentation sur la biodiversité et les écosystèmes sont testés expérimentalement dans le Métatron aquatique de Moulis. Les chercheurs et les chercheuses manipulent la température et les connexions spatiales entre les bassins qui contiennent des dizaines d'espèces, depuis les algues jusqu'aux poissons.

© Cyril Fresillon / SETE / CNRS Images

# La santé cognitive des abeilles comme indicateur écologique

À Toulouse, des scientifiques mesurent l'impact invisible des pollutions sur la biodiversité, grâce à des tests cognitifs sur les abeilles.



## CONTRIBUTION

Mathieu Lihoreau,  
Centre de recherche sur  
la cognition animale

**D**es scientifiques de notre région étudient l'intelligence des insectes. Un de leurs objectifs est de comprendre comment l'apprentissage et la mémoire permettent aux animaux de s'adapter aux perturbations environnementales. Et, plus généralement, quelles seraient les conséquences de déficits cognitifs pour la biodiversité.

Récemment, les recherches sur les dangers des pesticides pour les abeilles ont montré l'importance du comportement animal comme indicateur de santé des écosystèmes. Car, même si des individus sont exposés à de faibles doses (qui ne tuent pas), une perturbation comportementale, même minime, peut avoir des effets en cascade

dramatiques. Dans le cas des abeilles, si les butineuses s'égarent à cause de pertes de mémoire, les colonies ne sont plus nourries et les plantes ne sont plus pollinisées...

Pour étudier ces effets, les éthologues à Toulouse développent des systèmes automatisés qui mesurent la santé cognitive des abeilles. Ils mènent des études dans des sites où la dégradation environnementale est bien caractérisée, comme récemment dans la préfecture de Fukushima (Japon), tristement célèbre pour son accident nucléaire de 2011.

En collaboration avec l'Autorité de sûreté nucléaire et de radioprotection et l'université de Fukushima, les scientifiques comparent les capacités d'apprentissage des abeilles le long d'un gradient de radio-contamination au césium 137. Les premiers résultats montrent des déficits cognitifs chez les insectes dans les zones les plus contaminées, ce qui suggère un dysfonctionnement de tout l'écosystème.

Ces travaux confirment l'importance de ne pas rouvrir au public les zones d'exclusion proches de la centrale. Ils valident également de nouvelles méthodes pour étudier les risques environnementaux, applicables à d'autres contextes où les sources de pollutions sont moins bien caractérisées. 🐝



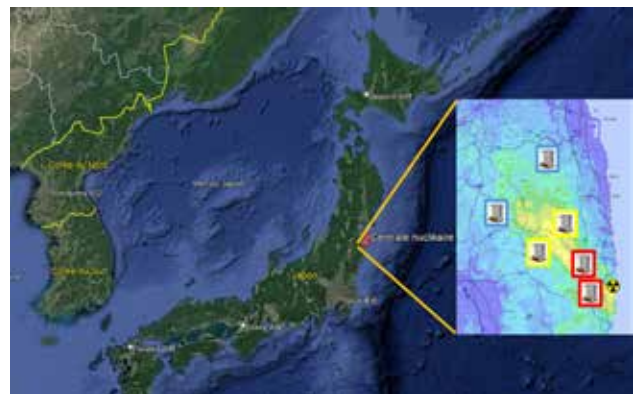
↑ Test cognitif automatisé sur le terrain. L'écran (au premier plan) montre une abeille en train de se faire tester dans la machine (au deuxième plan).

© Mathieu Lihoreau



↻ Abeille domestique marquée avec un code ArUco pour identification individuelle par les caméras du test cognitif automatisé.

© Blandine Mahot-Castaing



↑ L'étude est réalisée dans la préfecture de Fukushima au Japon, le long d'un gradient de radio-contamination (jaune = fort débit de dose).

© Mathieu Lihoreau

# Climat et toxines : la peau des pêcheurs en danger



## CONTRIBUTION

Etienne Meunier, Leana Gorse,  
Institut de pharmacologie et de  
biologie structurale

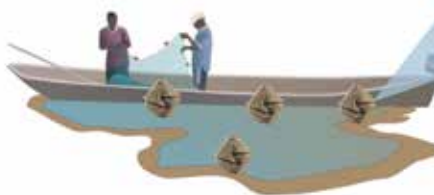
**D**ans ce contexte, en 2020-2021, plus d'un millier de pêcheurs sénégalais ont développé une mystérieuse maladie de peau, caractérisée par une inflammation sévère et une nécrose cutanée. Un consortium de scientifiques a tenté d'identifier la cause de cette maladie énigmatique, connue sous le nom de « La mystérieuse maladie des pêcheurs ».

L'hypothèse d'un agent microbien ou d'un polluant a été vite écartée après analyse des eaux de mer. En revanche, l'étude des échantillons des coques de bateaux et des filets de pêche a permis d'identifier une toxine marine, la Portimine-A, produite par la microalgue *Vulcanodinium rugosum*. Auparavant absent des côtes sénégalaises, cet organisme a probablement bénéficié à la fois de

Le succès du développement et du maintien d'une espèce vivante dépend de sa capacité à s'adapter à la pression de son environnement (microbes, pollution...). Ainsi, notre organisme développe-t-il depuis des millénaires des outils afin de détecter et d'éliminer ces dangers. Cependant, avec l'accélération brutale du changement climatique, de nouvelles menaces, jusqu'alors absentes de notre environnement direct, émergent rapidement. Cela pose la question de la capacité de nos organismes humains à répondre efficacement à ces nouvelles menaces.

Illustration des conséquences de l'exposition des pêcheurs sénégalais à la microalgue *Vulcanodinium rugosum*, qui produit la toxine Portimine-A.

©Etienne Meunier/Léana Gorse (CNRS, IPBS, Université de Toulouse, 2025).  
© Image générée avec le logiciel Biorender.com (Licence Etienne Meunier/Léana Gorse)



conditions environnementales modifiées, mais également du trafic maritime pour s'implanter dans un environnement autrefois hostile, ce qui constitue un axe de recherche actuel important.

Pour comprendre le lien entre cette microalgue et l'inflammation de la peau observée chez les pêcheurs, les scientifiques ont découvert que la Portimine-A est détectée par un récepteur immunitaire, NLRP1, dans des modèles de peau humaine mais également chez les pois-

sons. Cette suractivation du récepteur NLRP1 par la toxine marine entraîne une inflammation incontrôlée, à l'origine des graves problèmes de peau observés.

Ainsi, les changements globaux environnementaux rapides révèlent une augmentation des risques pour la santé humaine due à l'émergence de toxines jusqu'alors absentes de notre environnement direct, posant la question de notre adaptation à de nouvelles menaces déjà présentes. 📌

# Le Grand Nord sous pression



## CONTRIBUTION

Laure Gandois, Sophia Hansson,  
Gaël Leroux,  
Centre de recherche sur la  
biodiversité et l'environnement

**L**es écosystèmes arctiques, aux hautes latitudes, peuvent sembler à l'abri de l'impact des activités humaines. Pourtant, ils sont fortement menacés, notamment par les changements climatiques. Ceux-ci y sont bien plus intenses : les températures pourraient y augmenter quatre fois plus vite qu'ailleurs, et les chutes de neige et de pluie se modifier fortement. En conséquence, les écosystèmes évoluent très rapidement : la végétation change, les populations animales se déplacent ou peinent à survivre. Le sol, normalement gelé en permanence, dégèle, provoquant des bouleversements dans les cycles chimiques, la stabilité et l'aspect du terrain. En somme, le fonctionnement global des écosystèmes est perturbé, mais on connaît encore mal la vitesse et l'ampleur de ces transformations.

Le réchauffement rend aussi accessibles de nouveaux espaces, favorisant le transport, le tou-

**Le réchauffement climatique transforme en profondeur les écosystèmes arctiques (Scandinavie, Groenland, Canada, Russie), la végétation et la faune. Les pergélisols (sols gelés) dégèlent, ce qui modifie le cycle des nutriments. Les activités humaines qui s'intensifient engendrent des pollutions croissantes. Les scientifiques tentent de comprendre l'ampleur de ces changements pour anticiper leurs conséquences.**

risme, ainsi que l'exploitation des ressources minières et énergétiques. Bien que la situation soit complexe, ces activités risquent d'intensifier la pollution — à la fois par d'anciens contaminants (pétrole, gaz, métaux), mais aussi par de nouveaux polluants émergents comme les plastiques.

Pour évaluer ces impacts, les scientifiques mènent des campagnes de terrain : ils prélèvent des échantillons de sol, d'eau, de végétation, d'insectes ou de poils d'animaux pour étudier l'accumulation de nutriments et de contaminants, et leurs effets sur la faune et l'écosystème. Ils utilisent aussi des carottes de sol, de tourbière, ou de sédiments comme archives naturelles pour comparer le passé et présent, pour mieux prévoir le futur. L'ensemble de ces travaux vise à améliorer les connaissances sur le devenir de ces écosystèmes sensibles du Grand Nord, afin d'aider les autorités à prendre des décisions plus éclairées et durables. 📍



📍 Canada. Tourbières gelées polygonales. Une évolution des paysages (formation de nouveaux écosystèmes aquatiques) en lien avec le dégel du pergélisol.

© L. Gandois

📍 Au Groenland, un paysage de toundra bien sec, avec un crâne de boeuf musqué au premier plan.

© S. Hansson



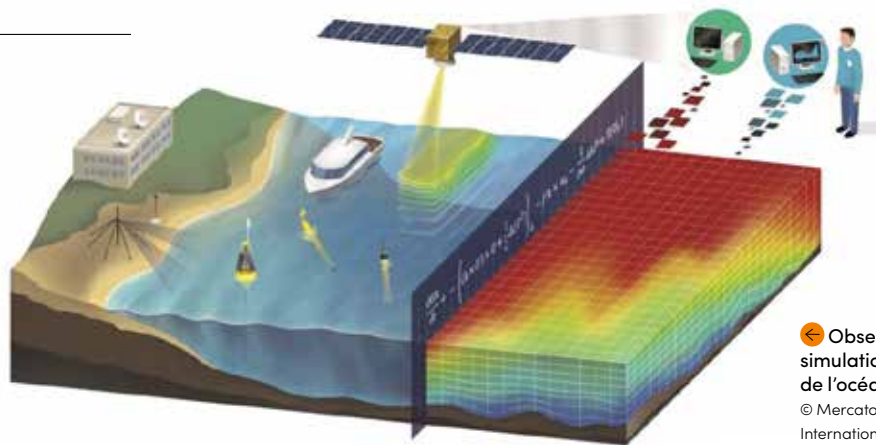
# Mieux prévoir l'océan en combinant modélisation et observation

La prédiction de l'évolution des océans repose sur deux éléments complémentaires : des simulations numériques, qui restent imparfaites, et des observations de l'état actuel ou passé de l'océan. Les recherches en assimilation de données ont pour objectif de combiner au mieux ces deux sources d'information. Cette fusion permet d'estimer plus précisément l'état de l'océan et de réduire les incertitudes, afin d'améliorer la qualité des prévisions.



CONTRIBUTION

Ehuarn Simon,  
Institut de recherche en informatique  
de Toulouse



← Observations et simulation numérique de l'océan  
© Mercator Océan International

Des problèmes relatifs à la surveillance de l'environnement et la prévision de son évolution ont conduit au développement de modèles complexes de l'océan, de leur biogéochimie, de la glace de mer, ainsi que ses interactions avec l'atmosphère. Néanmoins, ces modèles sont incertains et présentent des erreurs liées aux approximations théoriques sur lesquelles ils sont construits, à la discrétisation des équations depuis un maillage de l'océan conduisant à un modèle numérique utilisé sur des supercalculateurs, et au choix des résolutions utilisées.

Par ailleurs, la prévision de l'évolution de l'océan au cours du temps nécessite de connaître

l'état de celui-ci à l'instant présent. Pour cela, une source d'information réside dans les observations dont les scientifiques disposent, tant *in situ* que satellitaires. Leur distribution spatio-temporelle est incomplète et hétérogène (l'intérieur de l'océan est peu observé, par exemple), leur support varie de la mesure quasi-punctuelle aux échelles de plusieurs dizaines de kilomètres, et elles présentent des erreurs liées à la précision des instruments de mesure.

Les méthodes d'assimilation de données visent à combiner de manière optimale l'information hétérogène et incertaine issue des modèles, d'une

part, et des observations, d'autre part, en vue de reconstituer l'état du système océan. Cette combinaison permet de réduire les incertitudes associées à la prévision de son évolution.

Mené à Toulouse, un travail de recherche en informatique conduit à résoudre des problèmes d'optimisation en très grande dimension (jusqu'à des milliards de variables), visant à réduire l'écart entre la prédiction du modèle et les observations, à quantifier l'incertitude de cet état estimé, et ce de manière répétée au cours du temps. Il s'agit bien, au final, d'établir le plus précisément possible les prévisions de l'évolution de l'océan. 🌊

# Les mécanismes de l'inaction écologique

Un duo de scientifiques analyse les freins profonds qui nourrissent l'inaction face à l'urgence écologique. Comment rompre cette « trajectoire tragique » ?



## CONTRIBUTION

**Guillaume Carbou,**  
laboratoire Sciences, philosophie,  
humanités

**Jean-Michel Hupé,**  
France, Amériques, Espagne, Sociétés,  
Pouvoirs, Acteurs

**P**our atteindre les objectifs internationaux en matière environnementale et limiter la catastrophe en cours, des transformations rapides et profondes sont nécessaires dans tous les secteurs : modèles économiques, aménagement de l'espace, systèmes alimentaires, relations internationales et modes de vie, surtout dans les pays riches comme la France. L'objectif est de réduire massivement notre consommation d'énergie et de matériaux. Ce constat, consensuel dans la littérature scientifique, révèle que nos sociétés sont actuellement dans une situation d'inaction, car de tels changements radicaux n'ont pas lieu. Ils ne sont même pas envisagés, que ce soit dans les parlements, dans les cercles de dirigeants écono-

miques, ou dans la vie quotidienne. Le résultat est sans appel : les indicateurs mondiaux climatiques et environnementaux se dégradent sans cesse.

### Remettre en cause les intérêts établis

Les sciences humaines et sociales apportent des éclairages pluriels sur les mécanismes qui maintiennent nos sociétés sur cette trajectoire tragique. L'histoire et la sociologie des techniques montrent par exemple que des réseaux de dépendances

(à la voiture, au pétrole, au numérique...) verrouillent les marges de manœuvre. Ainsi, l'aménagement de l'espace rural ou la persistance de projets (auto)routiers condamnent à l'usage de la voiture. D'autres travaux pointent des blocages d'ordre psychosocial : la difficulté collective à changer de modèle socio-économique serait alimentée par les imaginaires dominants diffusés dans notre société. La foi dans la capacité des technologies à « nous sauver » ou la promesse

⬇ La dépendance à la voiture, contrainte par les réseaux autoroutiers, limite les possibilités d'actions écologiques. ©lpo's Sojourn, 2006





◀ L'action écologique doit parfois devenir activisme quand elle remet en cause des intérêts établis : le mouvement de désobéissance civile « Ende Gelände » occupe ici une mine de charbon en Allemagne.

©Rikuti, 2016.

protéger pour maintenir leur position dominante.

Ainsi, ce que l'on nomme inaction est aussi bien alimenté par des « mécanismes impersonnels » (comme notre dépendance à l'automobile), que par des forces dominantes qui refusent activement le changement (comme l'industrie automobile qui cherche à défendre son modèle économique). La période politique actuelle est d'ailleurs claire sur ce point : le Backlash (« contre-offensive ») anti-écologique est puissant dans de nombreux pays et se caractérise par des reculs législatifs, le désengagement de grands groupes industriels de leurs promesses climatiques, la diffusion médiatique de discours anti-scientifiques assumés, ou encore la répression violente des mouvements écologistes.

Un premier cap à suivre pour « sortir de l'inaction » serait donc de reconnaître la nécessaire conflictualité de toute « action » écologique à la hauteur des enjeux. Si notre société doit être transformée en profondeur, ce qui n'est pas discutable pour pouvoir maintenir l'habitabilité de la planète pour l'ensemble de la population mondiale, il est inévitable de devoir remettre en cause des intérêts établis. ●

du bonheur dans le consumérisme, largement promus par la publicité ou les industries culturelles, sont ainsi de puissants moteurs d'inaction écologique.

Une partie des sciences sociales explique également l'inaction par le poids de l'organisation capitaliste : concurrence, course au profit, marchandisation, etc. aboutissent à promouvoir des activités rentables mais insoutenables

(Fast fashion, véhicules SUV, publicité, promotion immobilière...) et à marginaliser les alternatives. Ce fonctionnement produit également des inégalités vertigineuses qui verrouillent les structures sociales. En effet, les travaux en sciences politiques montrent que les acteurs ayant accumulé de la richesse et du pouvoir via les logiques du capitalisme (énergie fossile, productivisme, extractivisme, colonialisme, etc.) tendent à les

# Le futur

2030 → 2100



**2030** : objectif de réduction des émissions de CO<sub>2</sub>

**2050** : engagement de neutralité carbone par l'Union européenne

**2100** : prédiction de +4°C en France (par rapport à la période préindustrielle)

**2100** : prédiction de +7,7 jours avec températures caniculaires (>35°C) en France (par rapport à la période 1976-2005)

**2100** : prédiction de -19 % du cumul estival de précipitations (par rapport à la période 1976-2005)

**2100** : augmentation prévue du nombre de réfugiés climatiques

L'



#### CONTRIBUTION

**Jean-Michel Hupé,**  
France, Amériques, Espagne,  
Sociétés, Pouvoirs, Acteurs

**Jean-Paul Bobin,**  
journaliste

obstacle le plus difficile à surmonter est le déni d'implication, où les faits ne sont pas vus comme obligeant moralement à l'action : je sais que ça existe, ça me touche et pourtant je ne fais rien. Scientifiques et enseignants qui s'expriment sur le climat sont régulièrement confrontés à cette question : que doit-on faire ? Un sentiment d'impuissance est très largement répandu, y compris chez des personnes qui ont pourtant un certain pouvoir. Le cadre individualiste de nos sociétés y est pour beaucoup, qui tend à réduire la question à « que puis-je faire à moi tout seul ? ». La spécialisation des connaissances est également problématique, si l'on ne considère que la magnitude des phénomènes physico-géo-bio-chimiques du système Terre sans faire le lien avec les activités humaines, leur histoire, les intérêts et les rapports de domination. Même si toute l'humanité devrait être également concernée par le défi climatique et être solidaire, ne serait-ce qu'en pensant à ses enfants, cela n'est évidemment pas le cas. Il y a des « ennemis ». À partir du moment où l'on réalise que le changement climatique est un problème également politique, il s'agit de mobiliser les capacités d'action politique, c'est-à-dire les moyens de s'organiser collectivement. Et de résister contre l'oppression à la fois psychologique (sentiment d'impuissance construit par l'individualisme, dont l'approche par l'éco-anxiété) et physique contre les personnes qui luttent sur les enjeux environnementaux. C'est sans doute ce qu'ont compris des chercheurs et chercheuses qui s'engagent dans la désobéissance civile.

# Événements météo extrêmes : à quoi faut-il s'attendre ?

**Le changement climatique intensifie les événements météorologiques extrêmes comme les canicules, les pluies intenses, les sécheresses ou les feux de forêt. En s'appuyant sur des observations et des modèles de climat, les scientifiques à Toulouse analysent l'évolution de ces phénomènes en France. Leurs travaux permettent d'anticiper les risques à venir dans un climat plus chaud.**



## CONTRIBUTION

Cécile Caillaud, Julien Cattiaux,  
Centre national de recherches  
météorologiques

**C**anicules, pluies intenses, sécheresses, tempêtes... les événements météorologiques extrêmes font régulièrement la Une de l'actualité, notamment parce qu'ils causent des dommages sur les sociétés ou l'environnement. On demande souvent aux scientifiques comment le changement climatique affecte ces événements : les rend-il plus fréquents ? Plus intenses ? À quoi faut-il s'attendre à l'avenir ? Voici quelques éléments de réponse.

Pour étudier l'évolution récente des événements extrêmes, les scientifiques s'appuient sur des données d'observations de température, précipitations, vent, etc. Pour documenter l'évolution

future, ils font appel à des expériences de modélisation numérique : sous différentes hypothèses d'évolution des gaz à effet de serre, les modèles sont capables de simuler plusieurs trajectoires climatiques jusqu'en 2100. L'étude des événements extrêmes requiert des analyses statistiques ; on s'intéresse typiquement à des probabilités de dépasser des seuils, ou à des niveaux de retour.

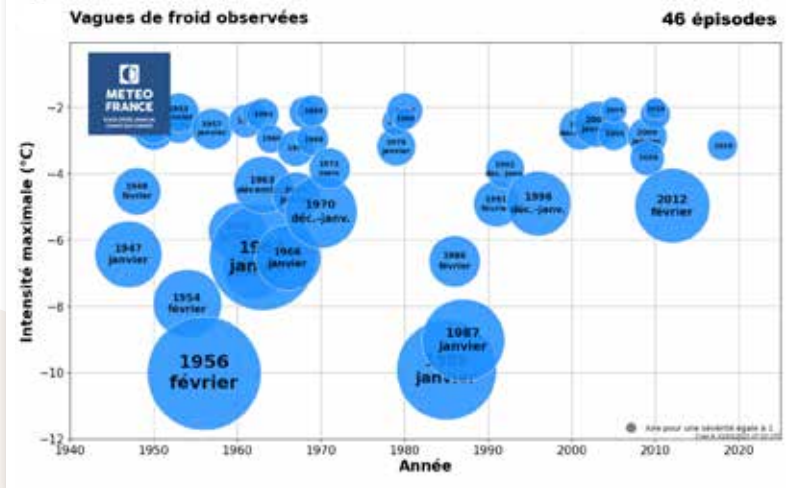
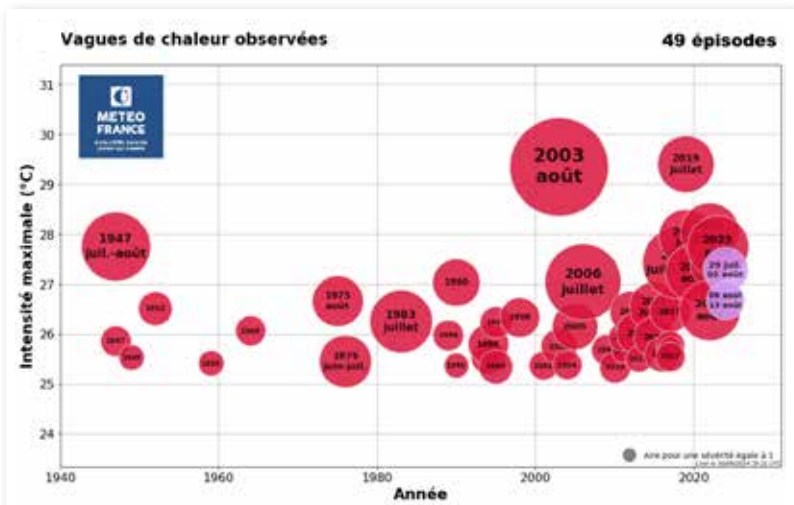
### Fin des grands froids historiques

L'évolution des extrêmes de température est la plus facile à appréhender : dans un climat qui se réchauffe, on s'attend à avoir plus de canicules et moins de vagues de froid. C'est ce que l'on observe à l'échelle du globe, à la fois dans les données passées et simulations futures. En France, par exemple, 26 des 49 vagues de chaleur recensées par Météo-France entre 1947 et 2024 se sont produites après 2010, contre seulement 4 des 46 vagues de froid. Dans un monde réchauffé de 2°C, on estime que la France connaîtrait en moyenne cinq fois plus de jours de vagues de chaleur, et deux fois moins de jours de gel. Les températures des canicules de 2003 ou 2022

seront donc plus fréquentes à l'avenir, tandis que celles des grands froids historiques (1956, 1963) sont désormais quasi impossibles.

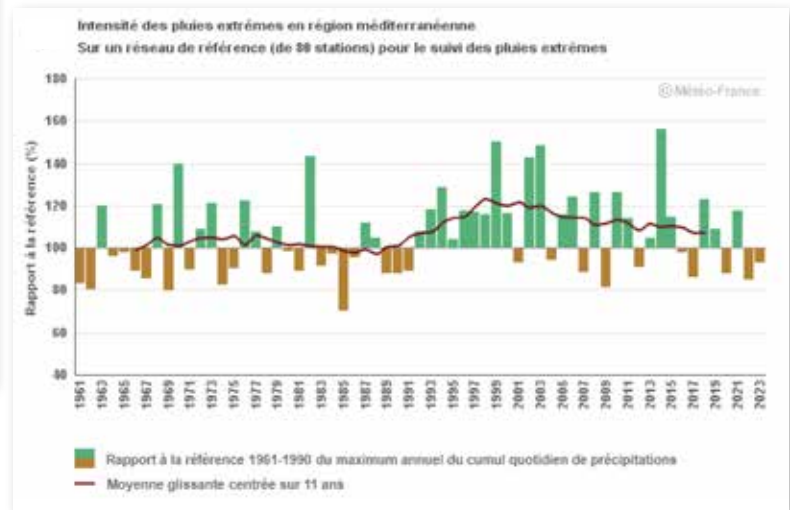
L'évolution des extrêmes hydrologiques est liée à un principe de thermodynamique, dit de Clausius-Clapeyron, qu'on peut simplifier ainsi : un air plus chaud peut contenir plus de vapeur d'eau. Le cycle de l'eau s'intensifie avec le réchauffement climatique : les épisodes pluvieux peuvent mobiliser plus d'eau dans l'atmosphère, et les épisodes secs peuvent évaporer davantage. On observe déjà à la fois une augmentation des précipitations intenses et des sécheresses qui sont aujourd'hui deux fois plus fréquentes qu'en 1960, en France. Un monde plus chaud de 2°C s'accompagnera en France d'une intensification des épisodes de pluies intenses de l'ordre de 10 %, et d'événements de sécheresse du sol plus nombreux, plus intenses, et plus longs, qui pourront toucher la quasi-totalité des régions françaises.

Autre conséquence de l'augmentation de température qui accentue la sécheresse de la végétation : l'aggravation du risque météorologique de feux de forêt et de végétation. Dans un monde à



↑ En France, l'augmentation des vagues de chaleur, la diminution des vagues de froid et l'augmentation des précipitations extrêmes sont déjà observées. Sur ces deux tableaux, les vagues de chaleur et de froid identifiées par Météo-France entre 1947 et 2024, classées par année et par intensité. La taille des bulles indique la sévérité de l'épisode, combinant intensité et durée.

↓ Évolution du maximum annuel du cumul quotidien de précipitations sur le pourtour méditerranéen. On distingue une tendance à la hausse sur l'ensemble de la période, ainsi qu'une grande variabilité d'une année sur l'autre. © Météo-France.



+2°C, le nombre de jours avec un risque élevé de feu doublera en France et pourra concerner des régions peu touchées jusqu'à présent.

### Vers des simulations plus précises

L'effet du changement climatique sur d'autres phénomènes extrêmes reste un sujet d'étude. Par exemple, les projections climatiques n'indiquent pas de signal clair concernant l'évolution de fréquence ou d'intensité des tempêtes des moyennes latitudes. Connaître la réponse au changement climatique de phénomènes de plus petite échelle (orages, pluies intenses en quelques heures, grêle, rafales) nécessite de mettre en œuvre des simulations climatiques kilométriques. Ces développements sont en cours dans les équipes de recherche et permettront prochainement d'éclairer l'évolution future de ces extrêmes. 📌

# Une mission spatiale révolutionnaire pour mesurer la biomasse des forêts



## CONTRIBUTION

**Thuy Le Toan,**  
Centre d'études spatiales  
de la biosphère

Les forêts, véritables « poumons verts de la Terre », absorbent chaque année environ 30 % du dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) présent dans l'atmosphère et le stockent sous forme de biomasse. Cependant, leur dégradation et leur disparition, causées notamment par les incendies et la déforestation, provoquent la libération du CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère. Or, le manque de données exhaustives sur leur biomasse, notamment dans les forêts tropicales, limite la compréhension des scientifiques sur les impacts qui en découlent sur le climat.

Le satellite Biomass, lancé en orbite par l'Agence spatiale européenne (ESA) le 29 avril 2025, devrait combler ce manque de connaissances. Pour cela, il fallait un capteur révolutionnaire capable de sonder une canopée dense de forêt tropicale jusqu'à 40 à 50 m de hauteur. Le système pro-

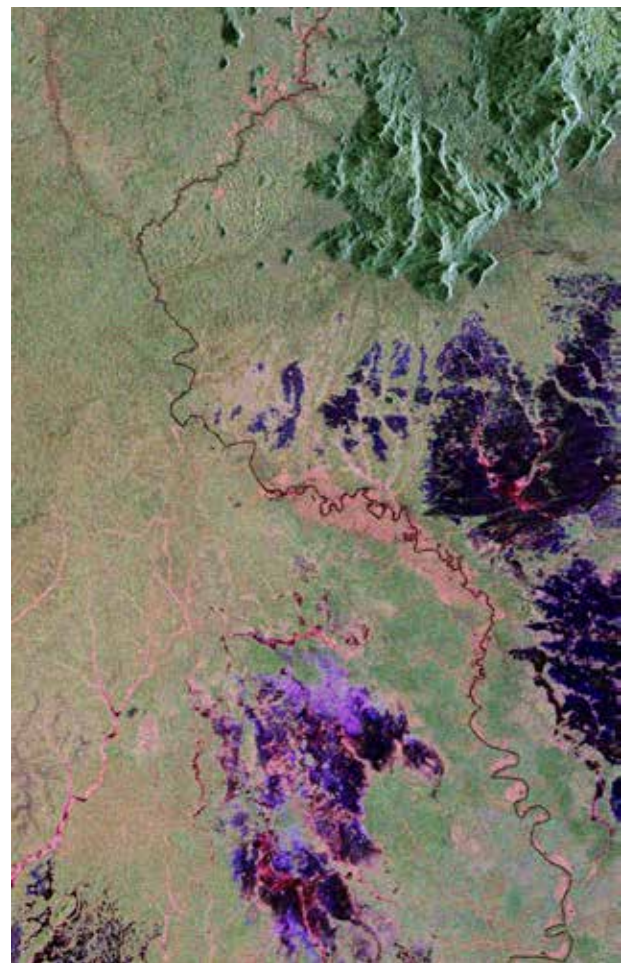
posé à l'ESA est un radar imageur fonctionnant à une longueur d'onde de 70 cm, la plus longue possible pour l'observation de la Terre. Là où l'imagerie optique s'arrête au sommet de la canopée, les signaux radar du satellite Biomass pénètrent profondément dans le couvert pour interagir avec les branches et les troncs, où se trouve la majeure partie de la biomasse.

Pour cartographier avec précision la biomasse, ainsi que la hauteur de la canopée et la topographie sous-jacente, une technique innovante a été mise en œuvre : la tomographie radar. Cette technique utilise plusieurs images acquises sous différents angles pour générer un modèle 3D de la forêt.

Les scientifiques prévoient d'utiliser les données Biomass pour estimer les stocks et les flux de carbone terrestre et prédire leur variation dans un environnement modifié par le climat et l'activité humaine. Les résultats permettront de mieux définir des mesures de préservation et de gestion durable de la forêt comme puits de carbone, mais aussi comme réserve de biodiversité. 📍

➔ Première image prise par le satellite Biomass le 22 mai 2025, qui offre une vue inédite de la forêt amazonienne du nord du Brésil. Elle confirme sa capacité à pénétrer la forêt dense, à mesurer sa biomasse et à détecter la forêt inondée ou la topographie sous-jacente. © ESA

Lancé par l'Agence spatiale européenne, le satellite Biomass observe les forêts pour estimer la quantité de carbone qu'elles stockent. L'analyse des données collectées aidera à mieux définir des stratégies de préservation et de gestion durable des forêts, à la fois comme puits de carbone et réservoirs de biodiversité.

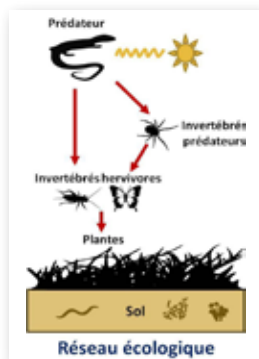


# Impact du réchauffement climatique sur la biodiversité : un lézard... comme acteur



## CONTRIBUTION

**Léa Beaumelle, Julien Côté, Emma Fromm, Lucie Zinger,**  
Centre de recherche sur la biodiversité et l'environnement  
**Elvire Bestion,**  
Station d'écologie théorique et expérimentale



Le Métatron (Station d'Écologie Théorique et Expérimentale du CNRS de Moulis, ANAEE France)  
© Q. Benard

Lézard vivipare (*Zootoca vivipara*)  
© E. Bestion

↑ Effets en cascade du climat sur la chaîne alimentaire étudiée

Le changement climatique modifie la physiologie et le comportement des espèces, mais aussi leurs interactions avec les autres espèces. Il peut donc avoir des effets en cascade, se propageant à chaque maillon des chaînes alimentaires, et au final influencer le fonctionnement des écosystèmes (par exemple le cycle des nutriments, la productivité végétale, etc.). Avec une telle interdépendance d'effets, il est difficile de prédire les conséquences du changement climatique sur les milieux naturels.

C'est le défi que les scientifiques tentent de relever grâce au projet européen Ecofeed<sup>1</sup>. Pour cela, le Métatron — un dispositif expérimental situé en Ariège, où sont simulées les conditions climatiques futures — est utilisé. Il est composé

de grands enclos recréant un habitat naturel dont le prédateur apex (ou superprédateur), au sommet de la chaîne alimentaire, est le lézard vivipare (*Zootoca vivipara*).

Les scientifiques y observent comment les effets d'un réchauffement de 1 à 2°C se propagent sur la diversité des invertébrés, des plantes et des organismes du sol, et si ces effets dépendent de la présence ou l'absence du lézard. Ils démontrent qu'en absence du lézard, le réchauffement augmente la diversité végétale via un effet négatif sur les insectes herbivores, relâchant ainsi la prédation sur les plantes.

En présence du lézard, c'est l'inverse : le

réchauffement diminue la diversité végétale et celle des champignons du sol. L'explication de l'équipe de recherche est la suivante : en climat plus chaud, les lézards consomment plus d'invertébrés prédateurs (par exemple les araignées), ce qui augmente la diversité de leur proies herbivores (par exemple les grillons), et accroît la pression de prédation sur les plantes, affectant leurs champignons symbiotiques. Ces résultats illustrent l'importance de prendre en compte les réseaux écologiques pour prédire les impacts du climat futur. 🦎

1. Ecofeed : Modification des interactions éco-évolutives dans un climat plus chaud, projet ERC.

# Numérique et environnement : limiter l'impact en changeant nos pratiques



## CONTRIBUTION

**Georges Da Costa, Patricia Stolf,**  
Institut de recherche en informatique  
de Toulouse

**L**e numérique est partout dans notre quotidien : plateformes sur Internet, réseaux sociaux, vidéos en ligne, intelligence artificielle, applications et objets connectés, etc. On désigne souvent le numérique comme une solution au réchauffement climatique. En réalité, il a sa part de responsabilité. Son matériel nécessite des métaux rares qui ne sont pas infinis et des ressources pour sa fabrication (énergie et eau par exemple). Son utilisation consomme de l'énergie. En fin de vie, son matériel pollue et il est difficile de le recycler.

Une équipe de recherche à Toulouse travaille sur l'impact du numérique sur l'environnement et sur le changement d'usages du numérique. Plutôt que de l'utiliser en consommant moins d'énergie, pourquoi ne pas utiliser le numérique autrement ?

Des études ont montré que lorsqu'une appli-

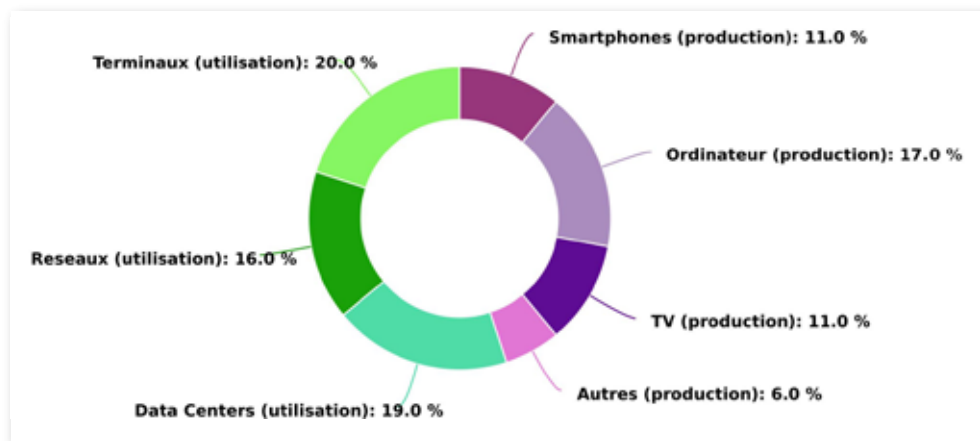
cation est optimisée, les gains obtenus sont rapidement dépassés par un usage accru du service : c'est l'effet rebond. Par exemple, un téléphone dont la consommation serait optimisée pour visionner une vidéo servira à visionner davantage de vidéos et de meilleure qualité ce qui, à la fin, consomme plus.

Pour éviter la course au « toujours plus », il est important de mesurer l'impact de l'usage du numérique, d'informer l'utilisateur, l'utili-

Une équipe de scientifiques à Toulouse travaille depuis plusieurs années sur l'impact du numérique sur l'environnement. Elle a commencé par travailler sur l'amélioration des performances, puis a intégré des sources d'énergie renouvelables (panneaux solaires, éoliennes). Désormais, elle travaille sur le changement d'usages du numérique.

satrice sur ce qui est consommé et de repenser nos usages en éliminant l'inutile. Écouter de la musique sur des applications sans flux vidéo, désactiver le lancement automatique de vidéos, éviter de stocker des données inutiles, paramétrer les vidéos en simple définition, recycler ses appareils, et en utiliser des recyclés, sont des exemples de bonnes pratiques. Questionnons-nous : avons-nous réellement besoin de gadgets connectés ? Allons vers un usage plus sobre du numérique. 🌱

📌 Distribution mondiale de la consommation énergétique du numérique par poste pour la production (45 %) et l'utilisation (55 %) en 2017. Source : Lean ICT, The Shift project 2018



# Les modèles climatiques, outils clés pour comprendre le futur



## CONTRIBUTION

**Roland Séférian,**  
Centre national de recherches  
météorologiques

Les modèles de climat sont des outils numériques sophistiqués qui simulent les interactions entre l'atmosphère, l'océan, les surfaces terrestres et la cryosphère. Fondés sur les lois de la physique, de la chimie et de la biologie, ils sont déployés sur des supercalculateurs (ordinateurs très puissants) pour comprendre et prévoir l'évolution du climat.

Deux grandes sources d'incertitude limitent les prévisions climatiques : l'incertitude liée aux conditions initiales (sensibilité chaotique du système), l'incertitude liée aux forçages futurs (par exemple, l'évolution des émissions de gaz à effet de serre). Ces sources d'incertitudes constituent la différence majeure entre la prévision météorologique et les projections climatiques et contraignent les capacités prédictives des modèles.

Les conditions aux limites, en mathématique, constituent un pilier de la modélisation clima-

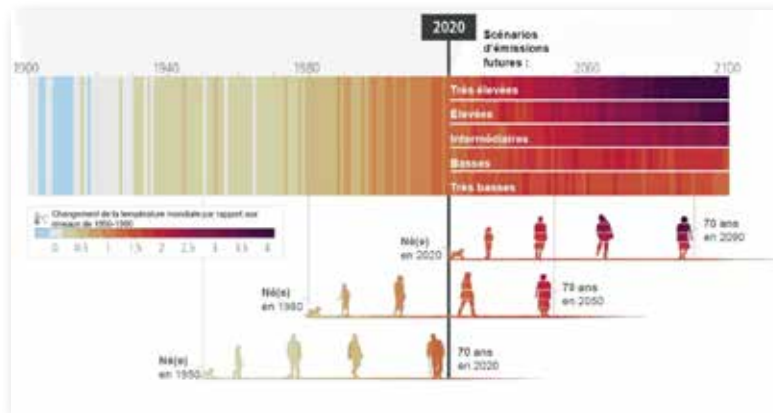
tique car elles ne sont pas modélisées mais imposées comme données externes au modèle. Dans le cas de projections climatiques, elles permettent de raconter des histoires possibles du développement de l'humanité et de ses émissions de gaz à effet de serre. Un des paradigmes profonds de la modélisation du climat est de traiter l'humanité et ses actions comme une composante externe au système climatique.

À ces deux sources, on peut ajouter l'incertitude liée aux modèles eux-mêmes. C'est-à-dire qu'un modèle de climat n'a pas vocation à représenter tous les processus environnementaux et physiques de manière exhaustive, il se concentre

Comment anticiper les effets du changement climatique si l'on ne peut ni les mesurer ni les prévoir ? Les modèles climatiques, fondés sur les lois de la physique, de la chimie et de la biologie, permettent de simuler l'évolution du climat en tenant compte de multiples facteurs. Malgré certaines incertitudes, ils fournissent des projections fiables qui aident à orienter les décisions pour s'adapter et atténuer les impacts du réchauffement global.

sur les échelles temporelles et les processus pertinents pour l'étude du climat et de son évolution. Habituellement l'enveloppe temporelle pour les modèles de climat se situe entre l'heure et la centaine d'années. Cela exclut les processus très lents tel que la tectonique des plaques. Néanmoins, les modèles de climat se sont enrichis au cours des générations par la compréhension des processus clés gouvernant l'évolution du climat.

Malgré ces incertitudes, les modèles fournissent des projections robustes des grandes tendances climatiques à long terme, essentielles pour orienter les politiques d'adaptation et d'atténuation (Figure ci-dessus).



← Projections de température sur la période passée et selon différents scénarios futurs de gaz à effet de serre.

Source : IPCC AR6 SPM1 ; (adapté)  
Traduction @BonPote

# Ce que la chimie de l'environnement nous dit sur l'état de la planète

Les écosystèmes terrestres sont fortement perturbés par les activités humaines et les crises climatiques. Pour comprendre ces impacts, la biogéochimie étudie les transferts d'éléments entre le sol, les plantes et l'atmosphère. À Toulouse, les équipes de recherche analysent ces échanges à l'aide d'outils innovants, allant des traceurs chimiques à la biosurveillance par des plantes.



## CONTRIBUTION

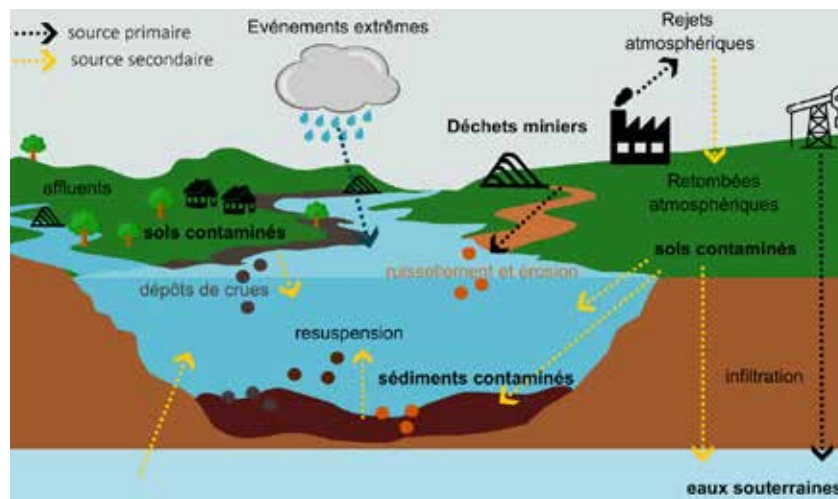
Eva Schreck,  
Géosciences environnement Toulouse

La communauté scientifique définit la « zone critique » comme l'enveloppe externe de notre planète, siège de réactions chimiques entre l'air, l'eau et les roches, mais surtout porteuse de la biodiversité. Or, cette zone est soumise à des modifications accrues ces dernières décennies sous l'effet de l'action anthropique, en lien avec le changement climatique. C'est pourquoi les scientifiques étudient l'état de santé des écosystèmes terrestres et travaillent sur la question des cycles biogéochimiques : processus de transfert des éléments entre les grands réservoirs. À Toulouse, les équipes de recherche utilisent des outils novateurs pour révéler les perturbations des milieux naturels (forêts) ou très impactés (zones minières). Parmi ces outils, certains sont très techniques tels que l'identification de marqueurs géochimiques et isotopiques, témoins du fonctionnement du milieu, parfois

dégradé suite à un incendie ou encore modulé en fonction de l'écologie d'une zone humide.

D'autres outils se basent par exemple sur la biosurveillance des écosystèmes affectés par des activités extractives via des plantes épiphytes (se nourrissant exclusivement de ce que contient l'atmosphère) pour connaître la qualité de l'air inhalé par les populations. Au sein d'un écosystème, il est nécessaire de déterminer la biodisponibilité des nutriments ou des polluants, pour estimer

leur transfert, mobilité et potentielle toxicité pour l'environnement et la santé. Aussi, il est important d'inclure les habitantes et les habitants d'un site dans l'étude menée car la dimension sociale éclaire l'interprétation des résultats biogéochimiques. À terme, ces travaux contribueront de concert à une meilleure connaissance des processus en jeu aux interfaces de la zone critique, pour nous aider à maîtriser notre impact sur l'environnement et agir pour favoriser la résilience des écosystèmes. 🌱



Transferts biogéochimiques au sein de la zone critique en environnement minier.

© Marie Heydon

# Plantes et climat : une adaptation sous l'angle de la génétique et des mathématiques

Face à un climat de plus en plus variable, agronomes et généticiens collaborent pour mieux comprendre le fonctionnement des plantes et améliorer leur adaptation. En combinant observations, modélisation et innovations génétiques, ils cherchent à concevoir des cultures plus résilientes, en lien avec les nouvelles pratiques agricoles.



## CONTRIBUTION

**Pierre Casadebaig,**  
Agroécologie, innovations, territoires  
**Nicolas Langlade,**  
Laboratoire des interactions  
plantes-microbes-environnement

**A**fin que les cultures continuent à répondre aux besoins des agriculteurs et de la société dans un contexte de climat de plus en plus variable, et souvent défavorable à la croissance des plantes en été, les scientifiques étudient comment les plantes se développent, mais aussi la manière de les cultiver. Pour le tournesol par exemple, l'amélioration génétique du rendement potentiel d'environ 1 % par an ne suffit plus face à la variabilité climatique. Heureusement, les plantes sont capables de s'adapter : un même génome s'exprime différemment selon les conditions de culture. Cette propriété, cette plasticité, leur a notamment permis de coloniser de



← Comment les cultures composent-elles avec la variabilité du climat ? Quel rendement, par exemple, pour le tournesol ?  
© Mike Lynch

nouveaux environnements naturels, et les scientifiques cherchent à en tirer parti.

Comme l'eau et le  $\text{CO}_2$  transitent par des pores des feuilles (stomates), si une plante régule sa transpiration, sa photosynthèse sera réduite. L'observation automatisée de cette régulation sur la plateforme de phénotypage montre que lorsque le sol devient sec, certaines variétés continuent de croître, alors que d'autres économisent l'eau, mais réduisent leur croissance.

Ces deux stratégies sont intéressantes, mais

comment prévoir la meilleure au moment du semis ? Pour cela, les scientifiques construisent des modèles mathématiques pour prédire le fonctionnement des plantes. Ces outils permettent d'orienter la sélection des variétés les plus prometteuses dans les environnements actuels et futurs. Ainsi, agronomes et généticiens unissent leurs efforts pour améliorer les cultures, diversifier l'offre variétale et l'adapter aux nouvelles pratiques agricoles, afin d'identifier des alternatives face au changement climatique. 📌

# Comment l'économie peut guider vers la neutralité carbone

À Toulouse, l'analyse des comportements des pouvoirs publics, des entreprises et des consommateurs permet d'identifier les leviers les plus efficaces pour accélérer la transition écologique. Taxation, réglementation, information sont trois outils particulièrement étudiés.



## CONTRIBUTION

Stefan Ambec,  
Toulouse School of  
Economics-Research

Atteindre la neutralité carbone à l'horizon 2050 nécessite de réduire drastiquement nos émissions de CO<sub>2</sub>, au point que les émissions résiduelles soient absorbées par les écosystèmes (forêts, pâturages, océans). Comment y arriver ? Quels sont les outils que préconise l'économie ?

Les solutions sont connues : investir dans les énergies décarbonées (éolien, solaire, etc.), sortir de la dépendance aux énergies fossiles, améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments... Mais encore faut-il savoir comment mettre en place ces solutions. Les économistes recommandent trois outils.

Premièrement des outils réglementaires restreignant les technologies utilisées. Par exemple, interdire les chaudières au fioul ou la location des logements au DPE classé G. Les outils éco-

nomiques s'appuient quant à eux sur les prix pour modifier les comportements. La taxe carbone accroît le prix des carburants, ce qui incite à prendre moins souvent sa voiture. Le malus CO<sub>2</sub> augmente le prix des voitures énergivores, ce qui favorise l'achat de modèles plus sobres. Troisième outil, l'information : il s'agit d'informer pour encourager les achats vertueux. Par exemple le label énergétique de A à D informe sur le bilan carbone des appareils ménagers.

Ces outils sont souvent complémentaires. Une étude expérimentale menée à Toulouse sur un

échantillon représentatif de la population française montre qu'une taxe sur l'empreinte carbone de produits alimentaires n'est effective que si elle s'accompagne d'un écolabel. Le prix ne suffit pas pour guider les consommateurs et les consommatrices vers les aliments moins carbonés. De même que fournir l'information n'a pas d'effet sans changer le prix des produits.

Le travail des économistes de l'environnement consiste justement à analyser l'impact de ces outils pour identifier la manière la plus efficace d'atteindre la neutralité carbone à l'horizon 2050. 📌



Les étiquettes énergie apposées sur les équipements électroménagers indiquent leur efficacité énergétique sur une échelle de A (très économe) à G (peu performant). Elles permettent aux consommateurs de comparer facilement la consommation d'électricité, d'eau ou le niveau sonore selon les modèles. Outil pédagogique, elles sensibilisent le grand public à l'impact environnemental des usages domestiques et encouragent des choix plus responsables.

# Le changement climatique en France : quels scénarios à l'horizon 2100 ?

Ce texte décrit les effets du changement climatique en France si la température augmente de 4 °C par rapport à la période pré-industrielle. Il explique les différences entre les régions et l'importance d'aménager le territoire pour limiter les risques.



## CONTRIBUTION

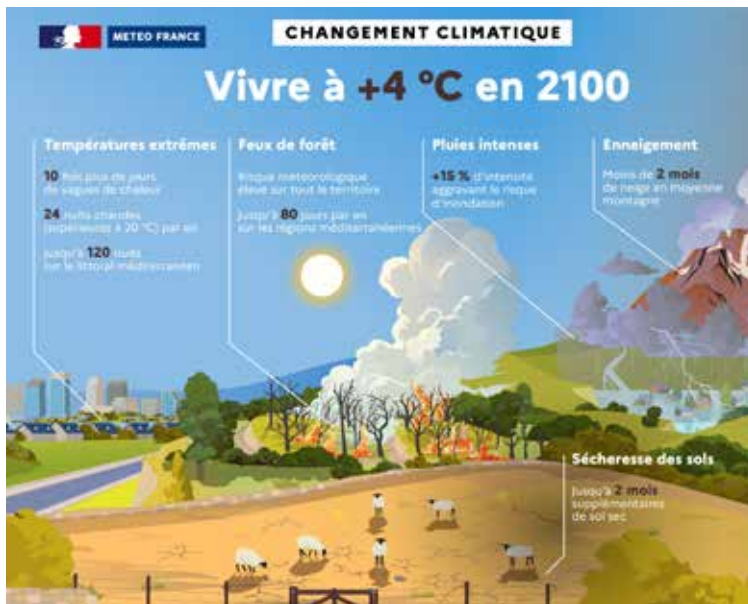
Lola Corre,  
Centre national de recherches  
météorologiques

Le changement climatique touche l'ensemble de la planète, mais ses effets ne sont pas les mêmes partout. Le réchauffement est plus marqué sur les continents que sur les océans, et particulièrement intense près de l'Arctique et en montagne, où la fonte des neiges en accentue l'intensité. En France hexagonale, il est environ 30 % plus élevé que la moyenne mondiale. Si les politiques climatiques actuellement menées se poursuivent, le réchauffement planétaire atteindra environ +2 °C en 2050 et +3°C en 2100, soit +2,7 °C et +4 °C en France. Ces estimations s'appuient

sur des travaux récents à Toulouse, qui combinent projections des modèles climatiques et données observées au cours des dernières décennies. Sur cette base, les autorités françaises ont établi une trajectoire de réchauffement de référence, définissant le climat auquel s'adapter au cours du XXI<sup>e</sup> siècle. Pour illustrer ce

que cela implique sur le territoire, Météo-France a décliné les conséquences d'un réchauffement de +4 °C en France, à partir d'un ensemble multimodèles de projections climatiques adaptées au territoire national. Dans une France à +4 °C, les étés deviennent caniculaires, surtout dans la moitié sud. La façade atlantique, tempérée par la proximité de l'océan, subit un peu moins les extrêmes de chaleur, mais elle est exposée à d'autres menaces majeures, comme la montée du niveau de la mer. Le cycle de l'eau est aussi profondément bouleversé : les régions et les événements secs deviennent de plus en plus secs, alors que les plus humides deviennent de plus en plus humides. La France se situe entre une Europe du Nord où les précipitations augmentent, notamment en hiver, et une région méditerranéenne où elles diminuent, surtout en été. À cette saison, hausse des températures et baisse des pluies cumulées renforcent les risques de sécheresse et de feux de forêt.

À l'échelle locale, l'ampleur de ces changements dépend de nombreux facteurs, comme la couverture des sols ou l'usage de l'eau par les activités humaines. Des actions en faveur d'un aménagement durable du territoire et d'une gestion raisonnée de la ressource en eau sont donc essentielles pour limiter les impacts et protéger l'environnement comme les populations. 🌍



← Principaux changements climatiques attendus dans une France à +4°C par rapport à la période pré-industrielle.

© Soubeyroux et al. 2025  
/ Météo France (adapté)

# Occitanie



# Chaud devant !



CONTRIBUTION

Jean-Paul Bobin,  
Journaliste

Selon le rapport mondial sur le climat de Copernicus, publié en janvier 2025, l'année 2024 a été la plus chaude jamais enregistrée. Comme les autres régions d'Europe, l'Occitanie est particulièrement concernée par le réchauffement climatique qui augmente notamment le nombre et l'intensité des sécheresses. Les chercheurs et les chercheuses du CNRS questionnent les conséquences de ce réchauffement climatique, depuis son impact dans l'histoire de l'agriculture, à l'évolution, aujourd'hui, des paysages et des cultures – notamment la viticulture –, des bords de rivières, berges marécageuses de l'Adour, et à celle de la biodiversité. Ils interrogent la pérennité des ressources en eau, notamment dans les Pyrénées, et proposent, en concertation avec les acteurs locaux, des leviers d'actions pour tenter d'enrayer les effets du changement climatique.

# Les Pyrénées : le château d'eau menacé

Les Pyrénées tiennent une place essentielle dans le rôle de la ressource en eau, elle-même centrale dans l'adaptation au changement climatique. À travers différents programmes européens, les scientifiques mènent des études visant à proposer aux acteurs locaux des actions d'adaptation en relation avec la ressource en eau dans les Pyrénées et leur zone d'influence.



## CONTRIBUTION

Sabine Sauvage,  
Centre de recherche sur la biodiversité  
et l'environnement

Les Pyrénées, versants nord et sud, présentent une vulnérabilité au changement climatique, or elles alimentent en eau les principaux bassins versants. Grâce à une coopération transfrontalière, regroupant des régions espagnoles et françaises et l'Andorre, le projet Interreg Piragua visait à caractériser le cycle de l'eau à l'échelle des Pyrénées dans le contexte du changement climatique. Ce projet a consisté à synthétiser et homogénéiser l'information existante et à se projeter dans le futur, en développant des indicateurs et proposant des stratégies d'adaptation à l'échelle du territoire, avec l'objectif ultime de soutenir les initiatives destinées à adapter la gestion des ressources au changement climatique. À travers l'étude du cycle hydrologique et des

ressources en eau des Pyrénées de 1985-2015, le programme Piragua propose d'envisager les évolutions futures jusqu'en 2050 et d'identifier des stratégies d'adaptation au changement climatique dans plusieurs secteurs socio-économiques dont la production hydroélectrique, l'agriculture, le tourisme. Parmi ses conclusions, l'étude insiste sur certaines conséquences du changement climatique, notamment la diminution des ressources en eau annuelles, en surface et souterraines et la modification des régimes hydrauliques avec des débits en hiver plus importants, une fonte des neiges plus précoce et des périodes d'étiage plus longues qu'actuellement.

### Pour une ressource disponible en été

Il existe des changements susceptibles de modifier les caractéristiques physiques et chimiques et aspects biologiques des eaux, et donc d'altérer leur qualité. « Ces changements sont liés au climat mais aussi aux pratiques humaines, nous parlons de transition parce que dans la transition l'humain joue un rôle » explique Sabine Sauvage, ingénieure de recherche au CRBE.

Depuis l'automne 2024, c'est le projet SpongeWorks qui a pris le relais. « L'objectif est d'augmenter la capacité de stockage du sol à tra-

vers la mise en place d'infrastructures et/ou de solutions fondées sur la nature, pour éviter d'une part les crues violentes et d'autre part augmenter la rétention dans les sols et les cours d'eau pour rendre l'eau disponible en été. La vallée ariégeoise et haut-garonnaise de la Lèze fait partie des trois sites retenus en Europe », précise Sabine Sauvage. Il s'agit du seul projet Horizon-Climat sol eau à avoir été financé en Europe et il permet de faire des expérimentations sur le terrain. L'objectif est de mener des études à la fois à l'échelle d'une parcelle et à l'échelle du territoire plus largement. Le projet associe les acteurs locaux, notamment élus et agriculteurs, dont certains acceptent d'appliquer les mesures : planter des arbres, des haies, modifier les pratiques, ne pas laisser les sols nus en hiver, intégration de barrages filtrants. Le projet vise à promouvoir des mesures « éponges » à l'échelle européenne, grâce à une modélisation et à une quantification rigoureuses sur la base de sites démonstrateurs, comme la vallée de la Lèze.

### La réutilisation des eaux usées

Le laboratoire a en charge la mise en place et le suivi des stations de mesure de la qualité de l'eau de surface et souterraine. Il effectuera également l'analyse des données et proposera



une expertise scientifique en hydrologie, biogéochimie, agronomie et modélisation pour les différents partenaires du projet. « Nous observons l'évolution de la qualité de l'eau et la façon dont les zones éponges peuvent contribuer à la rétention d'eau durant les périodes de pluie et à la restitution durant les périodes sèches », précise Sabine Sauvage qui poursuit :

« Nous avons d'autres projets, notamment sur la réutilisation des eaux usées traitées, celles qui sortent des stations d'épuration » ; ce grand projet, Water in Occitanie, financé par la Région consiste à prendre les eaux usées, à les retraiter et à les stocker pour irriguer durant les périodes d'été notamment sur le pourtour méditerranéen ou encore en Armagnac. 📍

⬆ La chaîne des Pyrénées joue un rôle essentiel comme réservoir naturel d'eau, alimentant rivières, lacs, agriculture, eau potable et hydroélectricité, mais elle est fragilisée par le changement climatique. © Adobe stock

# Des lacs à la loupe

Les recherches menées dans les Pyrénées au sein de l'unité Géographie de l'environnement interrogent, à travers plusieurs programmes de recherches, l'évolution des lacs d'altitude des Pyrénées afin de mieux les préserver.



## CONTRIBUTION

Florence Mazier,  
Géographie de l'environnement

**P**our mieux comprendre comment fonctionnent les lacs de montagne et les menaces qui pèsent sur eux, une équipe de scientifiques français et internationaux a mis en place un réseau de surveillance des lacs pyrénéens. Sont concernés quinze lacs du bassin Adour-Garonne plus deux lacs dans les Pyrénées-Orientales. Le but est d'observer comment les lacs évoluent face au réchauffement climatique mais aussi face aux changements de pratiques récréatives et du pastoralisme.

Des capteurs sont installés en permanence dans les lacs pour mesurer, par exemple, la température de l'eau à différentes profondeurs et le taux d'oxygène. Des pêcheurs réalisent aussi des relevés

de la flore aquatique. Cela permet de suivre, saison après saison, l'état de santé de ces écosystèmes. Ce dispositif a commencé depuis une dizaine d'années sur certains lacs, mais il a été élargi et renforcé en 2024. Aujourd'hui les scientifiques disposent de toute une batterie de données, concernant par exemple le suivi de la transparence de l'eau ; des analyses sur la biodiversité, mais aussi sur des pollutions invisibles. On y retrouve des traces de microplastiques, de nicotine, de caféine, d'antidépresseurs et même de cocaïne ! Ces polluants viennent principalement des activités récréatives et montrent que, même en altitude, les lacs ne sont pas épargnés par l'impact humain.

Concernant l'impact du changement climatique, Florence Mazier précise : « *Pour apprécier les effets du climat il faut un suivi de plus de 10 ans avec une tendance sans oscillations pour savoir s'il a, ou non, une influence sur le fonctionnement des lacs.* »

→ Lors d'une analyse d'un lac pyrénéen.  
© Frédéric Blanc 2024



# Quand les plantes participent à l'évolution des cours d'eau



## CONTRIBUTION

**Dov Corenblit,**  
Centre de recherche sur la biodiversité  
et l'environnement

**D**es bords de la Garonne, près d'Ondes, et sur certains cours d'eau autois, les recherches menées tendent à comprendre comment le vivant interagit avec les processus géomorphologiques. L'objet d'étude principal est la végétation riveraine, c'est-à-dire celle des bords de rivière, la ripisylve.

Comment cette végétation arrive-t-elle à exister dans des milieux contraignants tels que les marges des rivières, les berges et les bancs alluviaux, qui sont soumis à des flux de matière et d'énergie très importants lors des crues ? Les plantes ont développé des adaptations biologiques qui leur permettent de s'adapter aux contraintes physiologiques et mécaniques liées à l'écoulement et au transport sédimentaire. Les recherches menées au laboratoire, à Toulouse, visent à comprendre

comment la végétation riveraine s'adapte, comment elle colonise les cours d'eau et en même temps affecte les processus géomorphologiques. En 150 ans, la plupart des cours d'eau français ont subi une métamorphose liée à l'action anthropique. Il en résulte qu'aujourd'hui les rivières sont complètement fixées ce qui génère des dysfonctionnements hydro-écologiques et des risques accrus liés au changement climatique et aux crues. Pour analyser la trajectoire d'évolution des paysages fluviaux, les scientifiques s'appuient sur des mesures de terrain et des analyses spatiales.

Ce projet de recherche est mené en collaboration avec des gestionnaires tels que le Syndicat mixte des milieux aquatiques et des rivières (SMMAR), le Syndicat mixte d'étude et d'aménagement de la Garonne (SMEAG) ou l'association Nature en Occitanie (NEO).

Quelles vont être les trajectoires d'ajustement et d'évolution des cours d'eau en relation avec le changement climatique et quels outils permet-

**Au sein du Centre de recherche sur la biodiversité et l'environnement, un biogéomorphologue, travaille sur les interactions entre les organismes vivants et la géomorphologie, c'est-à-dire l'étude des formes du relief.**



↑ Campagne de mesures de terrain sur la Garonne (en 2023). Il s'agit d'un banc alluvial situé dans la zone d'Ondes, en Haute-Garonne. Ce site est étudié depuis 2010 pour le suivi de la colonisation végétale.

© Dov Corenblit

tront d'améliorer la situation en matière de soutien d'étiage, en termes de biodiversité et de gestion du risque ? « *Nous sommes là pour créer de la connaissance et cette connaissance co-construite avec les gestionnaires leur permet d'agir ensuite* », résume Dov Corenblit. 📍

# Le thermomètre végétal du climat : le cas de l'Adour

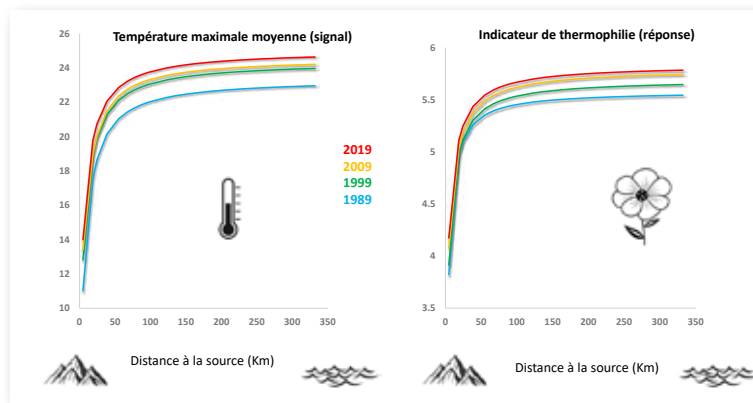


## CONTRIBUTION

Éric Tabacchi,  
Centre de recherche sur la biodiversité  
et l'environnement

Éric Tabacchi, chercheur au CNRS, à Toulouse, étudie le rôle des perturbations environnementales des écosystèmes, c'est-à-dire tout ce qui peut modifier le cours normal de leur fonctionnement et plus particulièrement ce qui concerne les assemblages d'espèces végétales dans les corridors riverains, par exemple la végétation qui accompagne l'Adour, de l'amont à l'aval.

Depuis 1989, les études portent sur ce fleuve. Le corridor riverain est influencé aussi par tout ce qui se passe dans le paysage avoisinant ; la végétation de ce corridor se partage entre les espèces liées au fonctionnement de la rivière et celles qui viennent de l'extérieur. Cette biodiversité extérieure s'ajoute à celle issue de la rivière et surtout,



Le suivi de la flore des rives de l'Adour révèle une lente transformation des paysages végétaux. Ces changements, marqués par la disparition de certaines espèces et l'arrivée de nouvelles, témoignent de l'adaptation progressive des écosystèmes au réchauffement climatique.

← Présentation de la thermophilie des espèces, montrant l'adéquation, dans l'espace et au cours du temps, entre mesures physiques (gauche) et analyse biologique (droite).  
© Eric Tabacchi / CRBE / OMP

ces zones riveraines de cours d'eau sont considérées comme des « points chauds » de biodiversité.

Les équipes de recherche ont travaillé sur 32 sites – chacun d'un kilomètre – le long de ce corridor littoral et en 1989 ont relevé, sur chacun, toutes les espèces végétales présentes : au total plus de 2 000. « *Nous y sommes revenus en 1999, 2009 puis 2019, épaulés par l'Agence Adour-Garonne* », explique le chercheur. Entre les deux premières périodes la diminution du nombre d'espèces n'est pas flagrante, elle s'accroît ensuite, soit - 8 % d'espèces en trente ans. La flore se banalise progressivement : avec le temps, on a tendance à avoir les mêmes espèces un peu partout alors qu'au départ il y avait des espèces bien typées par

rapport au milieu. En trois décennies les changements de composition de la flore traduisent une nette adaptation progressive à des températures plus élevées.

Cette approche rétrospective met en évidence l'effet du changement climatique à l'échelle d'une petite région, comme le bassin de l'Adour. Globalement la végétation s'adapte : il y a une perte d'espèces mais des nouvelles arrivent, ce qui peut expliquer que l'érosion de la biodiversité au bord de l'Adour ne soit pas aussi importante qu'on aurait pu l'imaginer. Les espèces nouvellement présentes pourraient également assurer les mêmes fonctions écologiques que celles qu'elles remplacent. 🌱

# La vigne et le vin face au changement climatique



## CONTRIBUTION

**Michaël Pouzenc,**  
Laboratoire interdisciplinaire  
solidarités, sociétés, territoires

**P**orté par le pôle sud-ouest de l'Institut français de la vigne et du vin, basé à Peyrole dans le Tarn, Vitisad 2 interroge les stratégies et pratiques viticoles durables pour s'adapter au changement climatique.

L'installation de stations expérimentales, sur des sites aux conditions climatiques différentes permettra d'évaluer les différentes techniques favorisant l'adaptation des exploitations viticoles, de chaque côté de la frontière, au changement climatique. Les objectifs sont pluriels avec d'une part la recherche des stratégies capables de réguler l'état hydrique des vignes et promouvoir une utilisation efficace de l'irrigation : stratégies sèches, couverts végétaux, paillages, filets d'ombrage..., d'autre part une sélection des variétés en fonction de leur adaptation au stress climatique sur plusieurs millésimes et enfin la sensibilisation des acteurs du territoire à ces nouvelles pratiques.

Vitisad 2 est un projet de coopération transfrontalière franco-espagnole, visant à la préservation de la viticulture face au changement climatique. Ce programme Interreg concerne la France, l'Espagne et l'Andorre. Côté français sont étudiés les vignobles de Fronton, Madiran-Pacherenc et Jurançon.



← Le changement climatique bouleverse la viticulture en modifiant la maturité des raisins, en accentuant les risques de sécheresse, de maladies et d'événements extrêmes, ce qui affecte à la fois les rendements et la qualité.

© Stock adobe

Le laboratoire LISST, dirigé par Michaël Pouzenc, est partenaire du programme, et intervient à deux niveaux : étudier l'importance de la vigne et de la viticulture dans les politiques publiques des territoires concernés puis, sous forme de groupes de discussion, évaluer avec les viticulteurs et avec les consommateurs l'intérêt que pourraient représenter ces adaptations de pratiques et de leur acceptabilité. Les uns comme les autres seraient-ils prêts à s'ap-

roprier ces évolutions et à quelles conditions ? « *Ce qui nous intéresse*, précise Michaël Pouzenc, *c'est que nous sommes dans des contextes climatiques et socio-économiques différents et donc les stratégies à prendre en compte face au changement climatique sont variées ; c'est une façon de dire qu'il n'y a pas une réponse unique pour faire face au changement climatique, il faut prendre en compte son impact dans un contexte socio-économique local.* »

# La mémoire de la terre



## CONTRIBUTIONS

**Laurent Bouby,**  
Institut des sciences de l'évolution  
de Montpellier

**Charlotte Hallavant,**  
Travaux et recherches archéologiques  
sur les cultures, les espaces et les  
sociétés et HADES Scop SAS – Bureau  
d'investigations archéologiques

**C**omment l'agriculture du bassin méditerranéen et particulièrement la viticulture ont-elles évoluées depuis le Néolithique ? Les changements agricoles sont-ils nécessairement liés à des bouleversements climatiques ? Spécialistes de cette histoire de l'agriculture, les carpologues Charlotte Hallavant, et Laurent Bouby travaillent sur les restes végétaux susceptibles de témoigner de ces évolutions. « *Nous constatons des concomitances : lorsqu'on voit un changement dans l'agriculture au même moment on constate une évolution dans le climat. On peut poser l'hypothèse d'une relation mais il peut y avoir beaucoup d'autres facteurs qui interviennent et souvent les choses sont liées, par exemple un changement climatique peut entraîner un changement*

À partir de restes végétaux trouvés dans les sites archéologiques, les scientifiques de l'ISEM s'intéressent à des changements dans le domaine agricole qui pourraient, entre autres, être associés à l'évolution du climat.

*social important qui peut, lui-aussi, bouleverser les pratiques agricoles ! Il faut arriver à démêler très précisément les causes et c'est très compliqué »,* explique Laurent Bouby.

Les équipes de recherche analysent la composition isotopique des restes végétaux – notamment de la vigne et de l'olivier – et récoltent des informations sur les conditions de croissance et les conditions climatiques : par exemple est-ce que la plante a connu un stress hydrique et ce manque d'eau pourrait-il, éventuellement, être lié aux conditions climatiques ?

Ces bio-archéologues étudient les relations entre l'humain et son milieu à partir de matériels biologiques anciens et interrogent l'adaptation des plantes au climat. 🍷



↑ ↓ Le blé, mais aussi d'autres productions végétales de l'Hérault, sont l'objet de recherches très précises. © Laurent Bouby



# Surchauffe urbaine et refuges climatiques

Le Laboratoire interdisciplinaire solidarités, sociétés, territoires travaille sur la question de l'adaptation des villes à la hausse des températures. La surchauffe urbaine est un problème majeur à Toulouse où des refuges climatiques sont progressivement mis en place.



## CONTRIBUTION

**Julia Hidalgo,**  
Laboratoire interdisciplinaire  
solidarités, sociétés, territoires

L'évolution du cadre réglementaire oblige les villes à travailler la question de l'adaptation à la chaleur. C'est le cas dans la métropole toulousaine à travers le Plan Toulouse + fraîche débuté en 2023 par des expérimentations et ensuite une implémentation.

Les scientifiques travaillent, en lien avec les services de Toulouse Métropole, à l'élaboration de cartes climatiques permettant de construire le Plan local d'urbanisme intercommunal sur lequel sont représentées les zones à enjeu (du point de vue de la surchauffe climatique) et à identifier des propositions d'action. Trois niveaux d'exposition sont définis : l'exposition négligeable, l'exposition forte et les zones à basculement, c'est-à-dire celles qui risquent de passer en exposition forte si aucune mesure n'est prise.

Une stratégie innovante d'adaptation tire profit de l'existant pour mettre en place des infrastructures d'accueil, les réseaux publics d'espaces refuges à la chaleur. Ces refuges climatiques reposent sur des lieux publics aménagés, types bibliothèques ou jardins publics, dotés d'espaces fraîcheur, de zones de repos et d'horaires d'ouverture élargis.

« Nous essayons d'aller plus loin dans cette identification des bâtiments publics susceptibles de faire un jour partie du réseau public d'espaces refuges, en identifiant les modifications à apporter et en précisant comment le faire de manière participative avec la population. L'idée étant de maximiser les ressources énergétiques pour les cibler sur certains lieux publics plutôt que chacun installe un climatiseur chez lui ! », précise Julia Hidalgo. 📍

© Pascal Fayeton

**Coordination générale :** Sébastien Bouchereau  
**Secrétariat et coordination d'édition :** Valeria Medina  
**Comité de rédaction :** Jean-Paul Bobin, Sébastien Bouchereau, Séverine Ciancia, Georges Landa, Valeria Medina, Susana Rivas  
**Création graphique :** Sandrine Lucas  
**Conseil scientifique :** Julien Boé, CECl ; Christophe Cassou, LMD ; Clio Der Sarkissian, CAGT ; Jean-Michel Hupé, FRAMESPA ; Catherine Jeandel, LEGOS/OMP ; David Kaniewski, CRBE/OMP ; Georges Landa, LAAS-CNRS ; Samuel Morin, CNRM ; Susana Rivas, délégation CNRS Occitanie Ouest ; Eric Tabacchi, CRBE/OMP ; Laure Teulières, FRAMESPA  
**Couverture :** Stock Adobe / Sandrine Lucas

Les Éditions de la Dépêche ont veillé à citer correctement et à contacter les sources ou détenteurs du copyright de chaque photo. Toute erreur ou omission involontaire serait corrigée dans une prochaine édition.

#### Laboratoires contributeurs :

- Agroécologie - Innovations - TeRritoires (AGIR - INRAE, ENSFEA, INP Toulouse)
- Centre d'anthropobiologie et de génomique de Toulouse (CAGT - CNRS, UT)
- Climat, environnement, couplages et incertitudes (CECl/OMP - CERFACS, CNRS)
- Centre d'étude et de recherche travail organisation pouvoir (CERTOP - CNRS, UT, UT2J)
- Centre d'études spatiales de la biosphère (CESBIO/OMP - CNES, CNRS, IRD, UT)
- Centre national de recherches météorologiques (CNRM/OMP - CNRS, Météo France)
- Centre de recherche sur la biodiversité et l'environnement (CRBE/OMP - CNRS, IRD, INP Toulouse, UT)
- Centre de recherches sur la cognition animale (CRCA/CBI - CNRS, UT)
- France Amérique Espagne - Société, pouvoirs, acteurs (FRAMESPA - CNRS, UT2J)
- Géographie de l'environnement (GEODE - CNRS, UT2J)
- Géosciences environnement Toulouse (GET/OMP - CNES, CNRS, IRD, UT)
- Institut de pharmacologie et de biologie structurale (IPBS - CNRS, UT)
- Institut de recherche en informatique de Toulouse (IRIT - CNRS, UT Capitole, UT2J, UT, INP Toulouse)
- Institut des sciences de l'évolution de Montpellier (ISEM - CNRS, Université de Montpellier, IRD, EPHE, CIRAD, INRAP)
- Institut de systématique, évolution, biodiversité de Paris (ISYEB - CNRS, Muséum national d'histoire naturelle de Paris)
- Laboratoire d'analyse et d'architecture des systèmes (LAAS-CNRS - CNRS)
- Laboratoire d'études en géophysique et océanographie spatiales (LEGOS/OMP - CNES, CNRS, IRD, UT)
- Laboratoire des interactions plantes-microbes-environnement (LIPME - CNRS, INRAE)
- Laboratoire interdisciplinaire solidarités, sociétés, territoires (LISST - CNRS, EHESS, INU Champollion, UT2J)
- Sciences, Philosophie, Humanités de Bordeaux (SPH - UBM, UB)
- Station d'écologie théorique et expérimentale (SETE - CNRS)
- Travaux et recherches archéologiques sur les cultures, les espaces et les sociétés (TRACES - CNRS, Ministère de la culture, UT2J)



**LA DÉPÊCHE**  
DU MIDI

Journal de la Démocratie  
Avenue Jean-Baylet, 31095 Toulouse Cedex  
Directeur de la publication : Jean-Nicolas Baylet

*Les éditions de la Dépêche.*

Responsable Les Éditions de la Dépêche : Sébastien Bouchereau

Commission paritaire n° 0320 C 87785 - ISSN 0181- 7981

Impression : Imprimerie Messages, rue Nicolas-Louis Vauquelin, Toulouse.

2011



2012



2013



2014



2015



2016



2017



2018



2019



2020



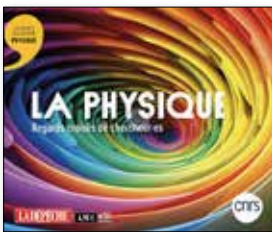
2021



2022



2023



2025



Scannez pour découvrir  
l'ensemble  
de la collection

En partenariat avec





M 28554 - s2 - F 4,90 € - RD

**LA DÉPÊCHE**  
DU MIDI

