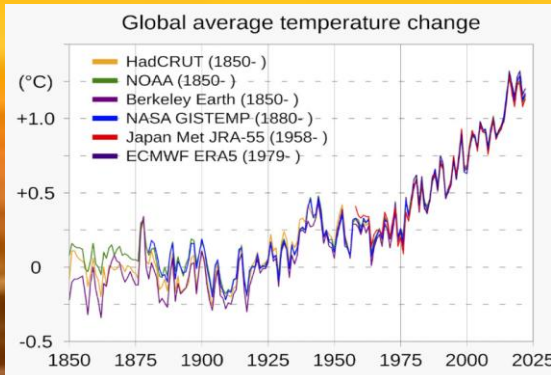
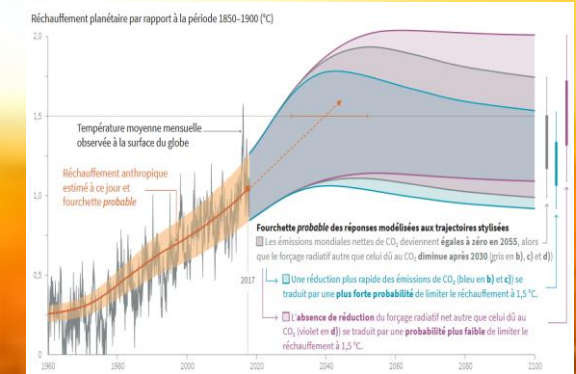


Enjeux du réchauffement climatique : *constats, projections et impact*

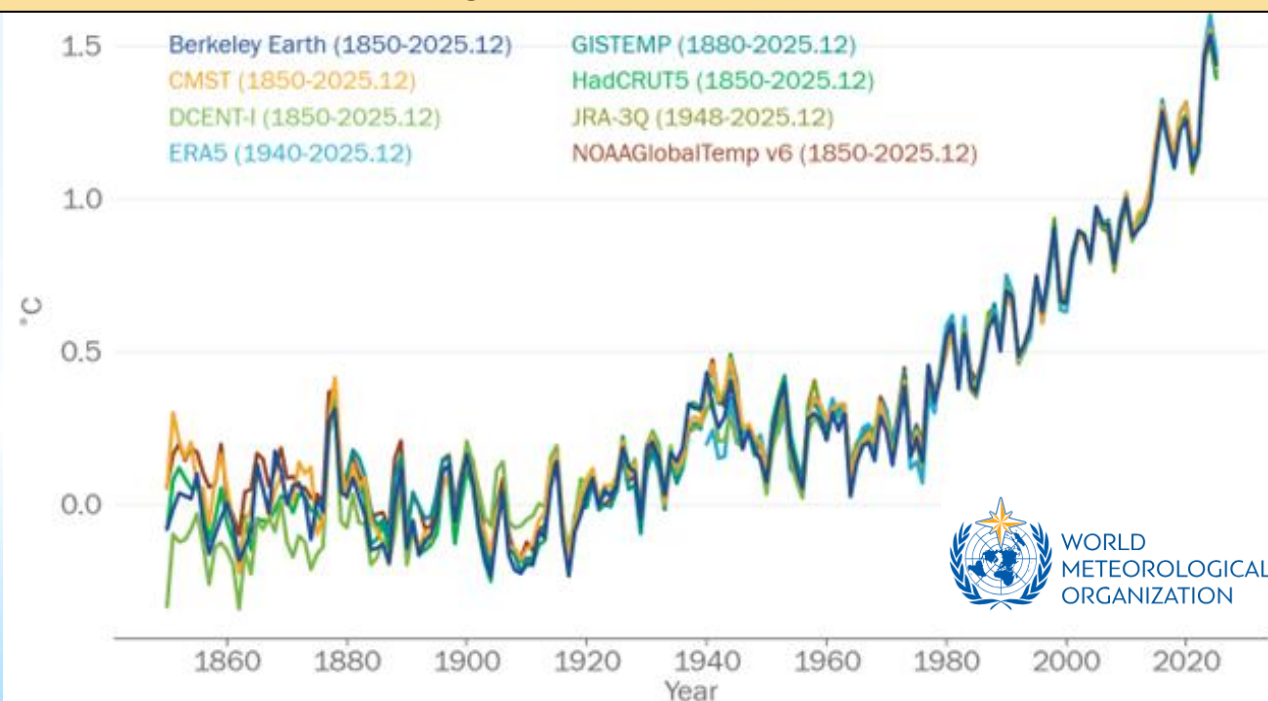


Jean-François GEORGIS
Enseignant-Chercheur en physique
Équipe **AQUIET**
(**A**ir **Q**uality, **I**mpacts, **E**nergy **T**ransition)



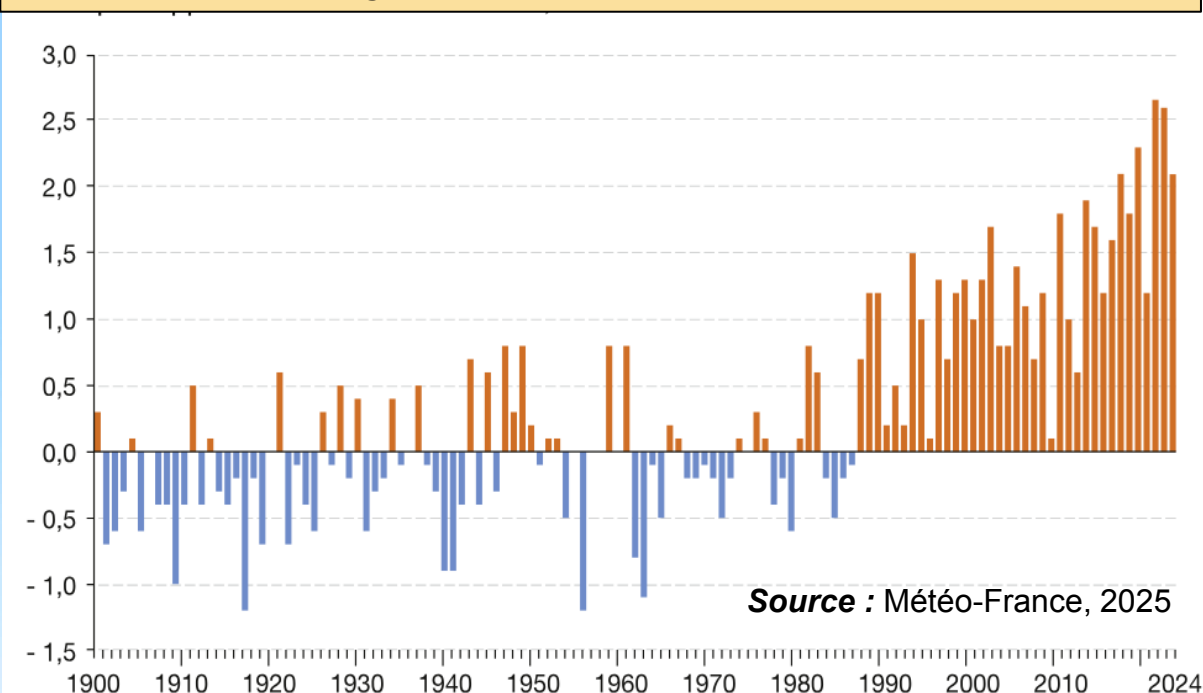
1. CONSTATS

Annual global mean temperature anomalies relative to the 1850-1900 average from 1850 to 2025 for 8 datasets



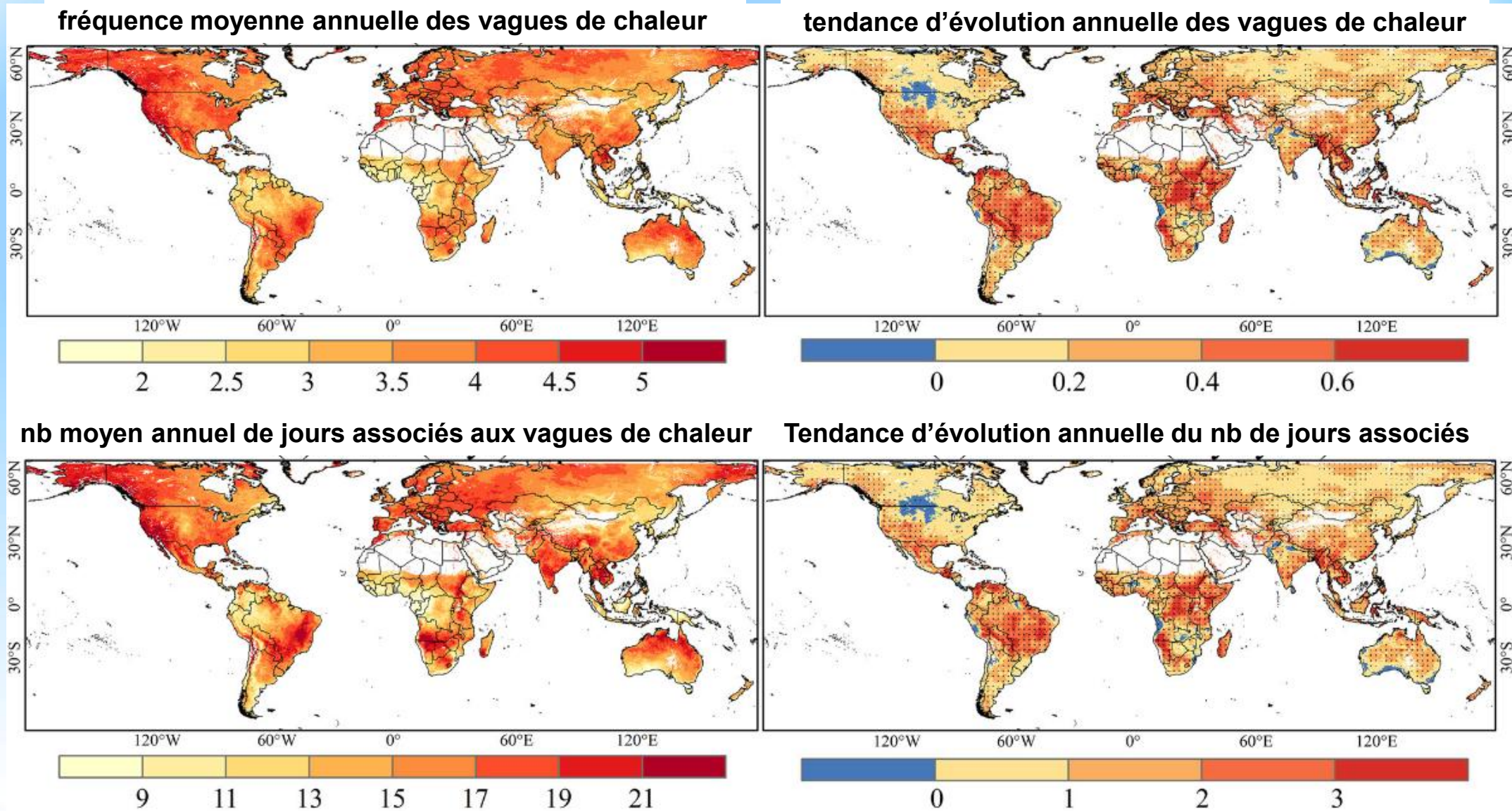
dans le monde

Ecart de la température moyenne annuelle par rapport à la moyenne observée entre 1961 et 1990



En France

ECMWF Reanalysis v5 hourly 2-m air temperature
Summer data from **1980 to 2022**



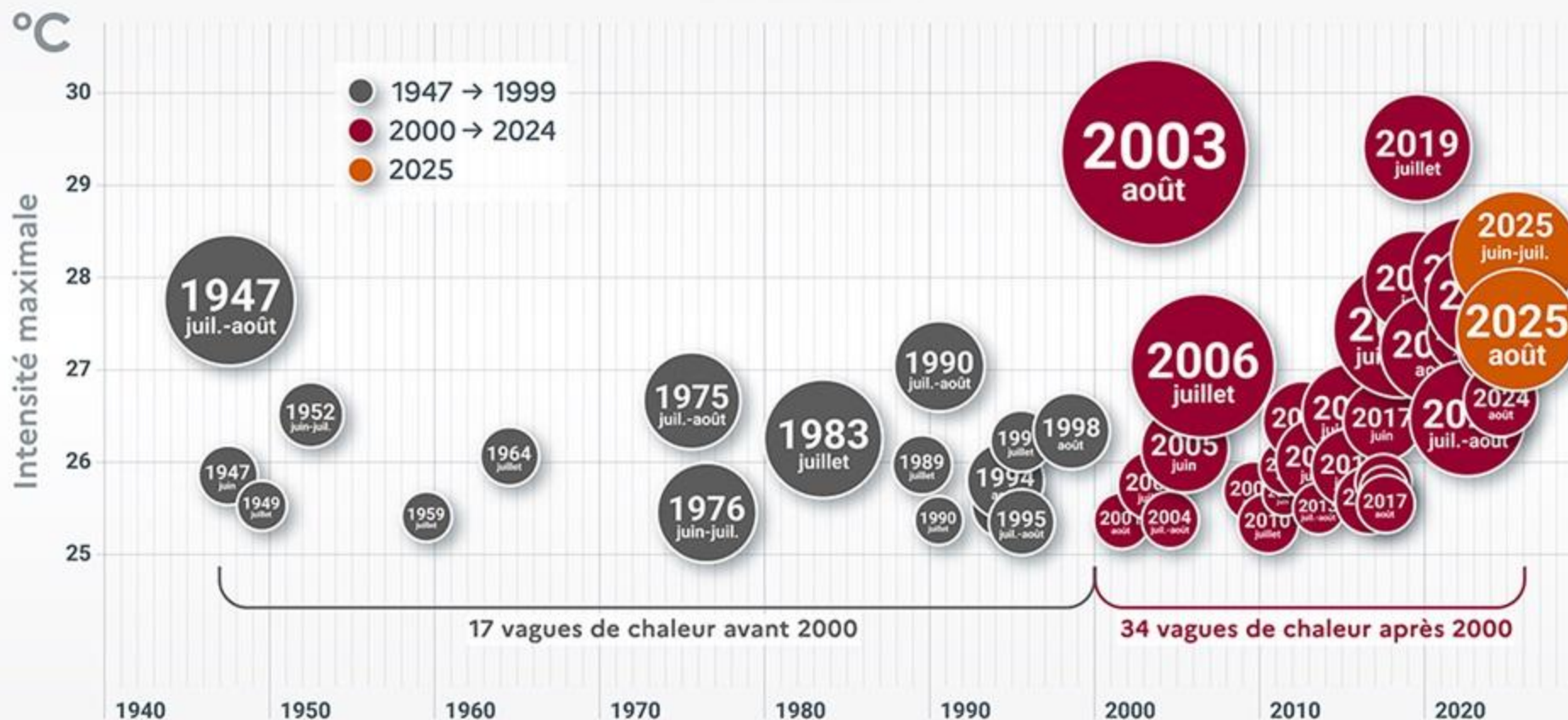
Dans cette étude: **Vague de chaleur** = épisode durant lequel la température maximale quotidienne à 2 m (Tmax) dépasse le 90^{ème} percentile pendant 3 jours minimum

LE NOMBRE DE VAGUES DE CHALEUR S'ACCÉLÈRE DEPUIS LES ANNÉES 2000



Avant 1989 ≈ une vague de chaleur tous les 5 ans

Depuis l'an 2000: au moins une vague de chaleur par an



Chaque bulle représente une vague de chaleur. Plus la bulle est haute, plus l'épisode était intense (température maximum atteinte). Plus sa taille est importante, plus l'épisode était sévère (chaleur accumulée sur l'ensemble de l'épisode).

Il n'existe **pas de définition universelle** des vagues de chaleur!

Indicateur Thermique National (créé en 1947):

T° moyenne mesurée à l'échelle du pays (*moyenne des T° min. et max. sur 30 stations météo réparties de manière équilibrée en France métropolitaine*)

- Les vagues de chaleur sont principalement dues aux anomalies de la circulation atmosphérique (*exple: blocage d'une zone de haute pression ou de subsidence*)

- Le réchauffement climatique agit comme un facteur de fond

PIC DE CHALEUR



épisode bref
(24 à 48 h)



T° très supérieures aux normales

EXEMPLE

Un après-midi très chaud qui redevient supportable dès le lendemain.

VAGUE DE CHALEUR

pas de définition universelle du phénomène



définition nationale



ITN $\geq 25,3^{\circ}\text{C}$ pdt 1 jour
ITN $\geq 23,4^{\circ}\text{C}$ pdt 3 jours min

Fin: **ITN** $< 23,4^{\circ}\text{C}$ pdt 2 jours
ou **ITN** $< 22,4^{\circ}\text{C}$ pdt 1 jour

EXEMPLE

Plusieurs jours d'affilée avec des températures élevées, y compris la nuit.

CANICULE

Une vague de chaleur **INTENSE, LONGUE** et **ÉTENDUE** dans l'espace.



définition départementale



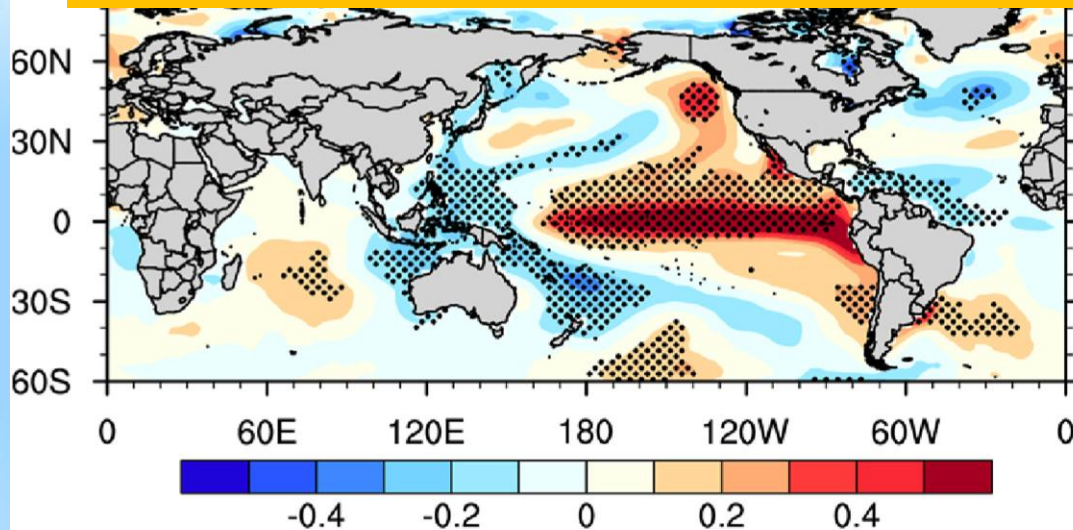
T° élevées, de jour comme de nuit, pdt au moins 3 jours

EXEMPLE

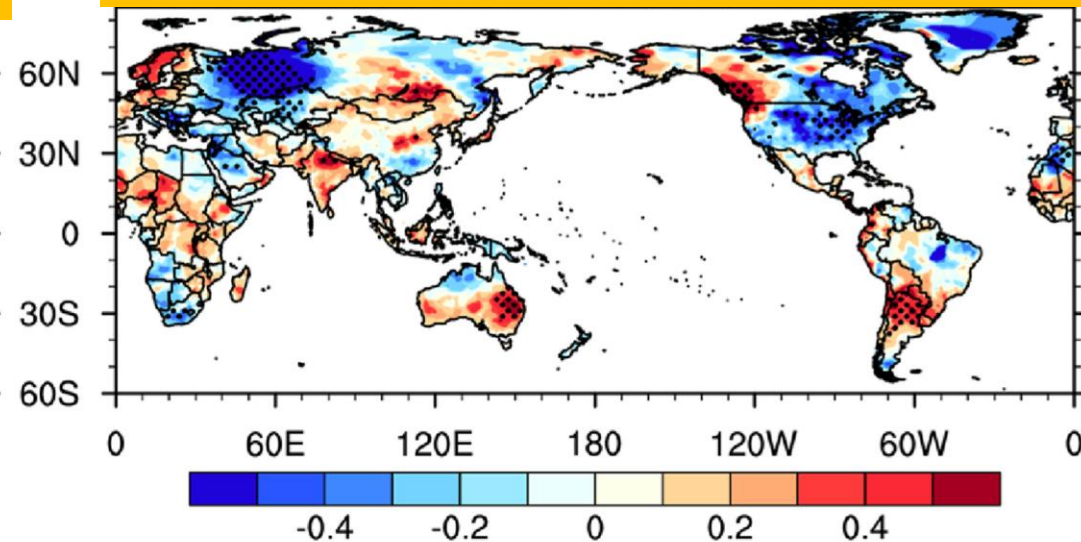
à Toulouse, quand, durant 3 jours et 3 nuits, T°max $> 36^{\circ}\text{C}$ et T° min $> 21^{\circ}\text{C}$

ECMWF Reanalysis v5 hourly 2-m air temperature
Summer data from **1979 to 2024**

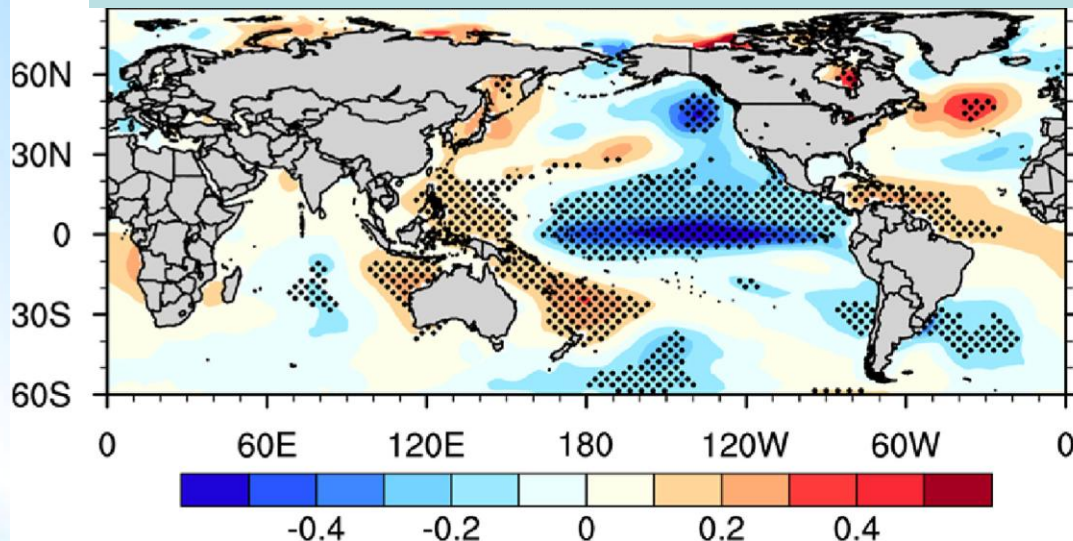
Anomalie de T(°C) de l'océan durant *El Niño*



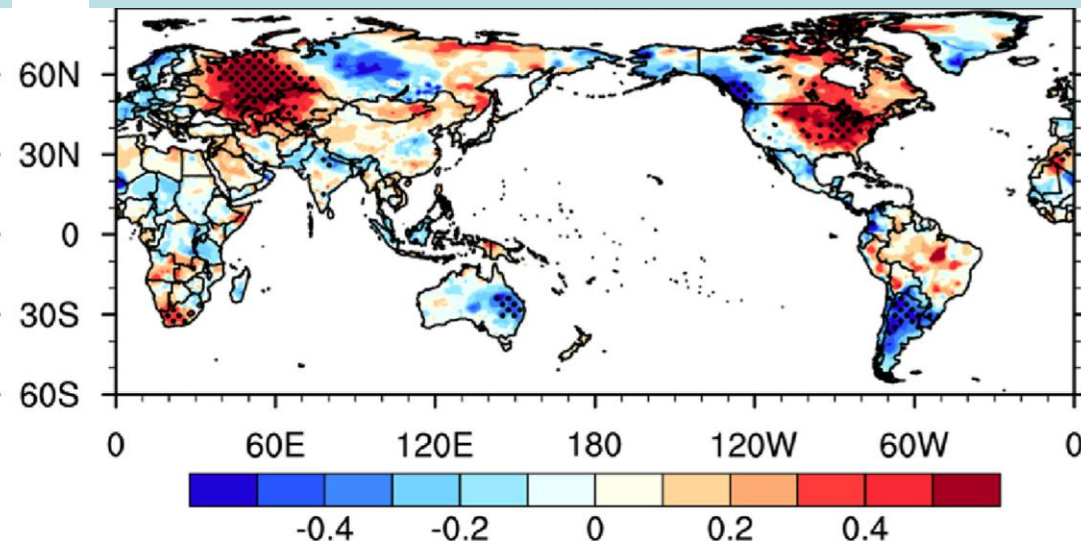
Anomalie de T(°C) des terres durant *El Niño*



Anomalie de T(°C) de l'océan durant *La Niña*



Anomalie de T(°C) des terres durant *La Niña*

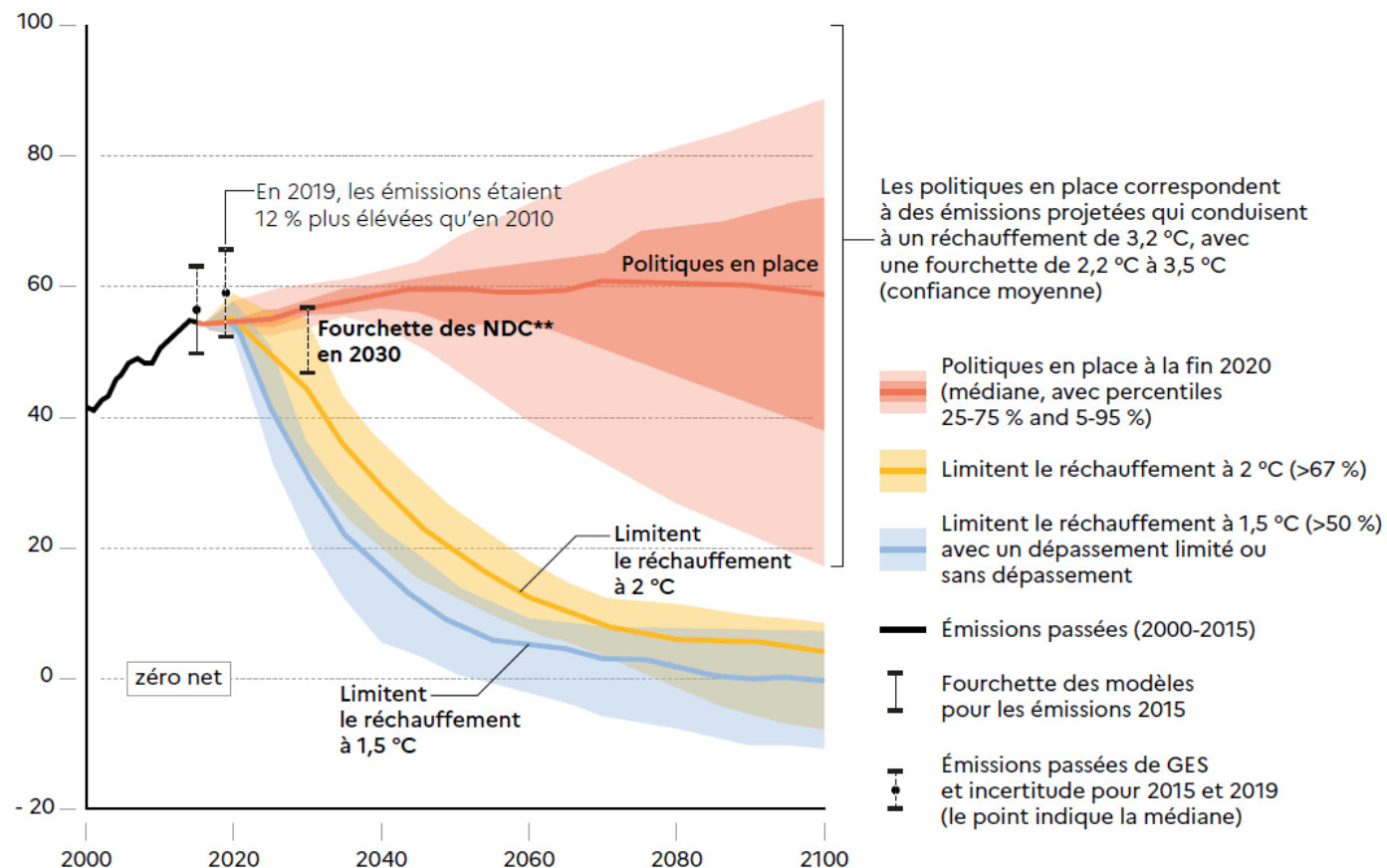


**étés associés à La Niña => vagues de chaleur plus vastes et plus intenses dans l'hémisphère Nord
(c'est le contraire en Europe de l'Ouest)**

2. Projections

dernier rapport de synthèse du GIEC: AR6 (2023)

Projections du réchauffement climatique selon l'évolution des émissions de GES*
En gigatonnes CO₂ éq/an

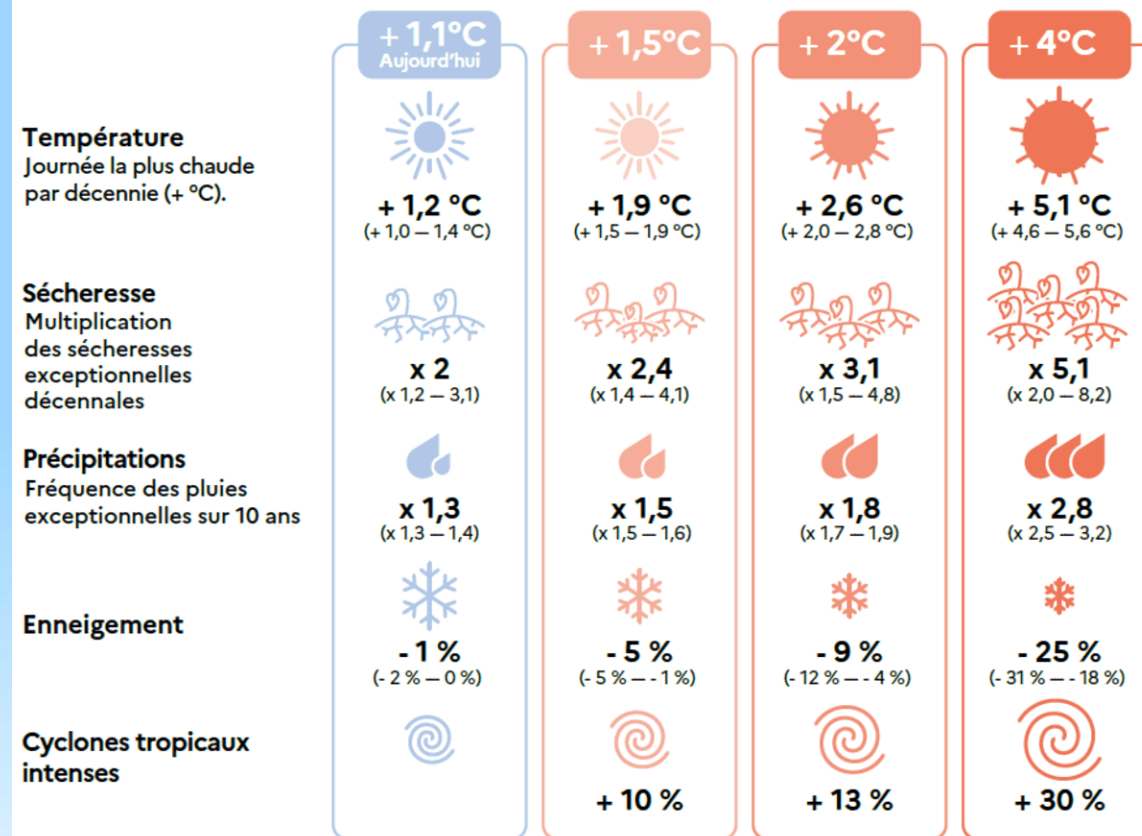


* Gaz à effet de serre.

** Contributions déterminées au niveau national. Ambitions de réductions des émissions de GES déterminées par chaque État en vue de contribuer aux objectifs de l'Accord de Paris.

Source : MTECT, TRAAC, d'après la figure 5 du résumé pour décideurs du Rapport de synthèse du Giec (IPCC, 2023)

Des risques climatiques qui augmentent avec l'élévation des températures



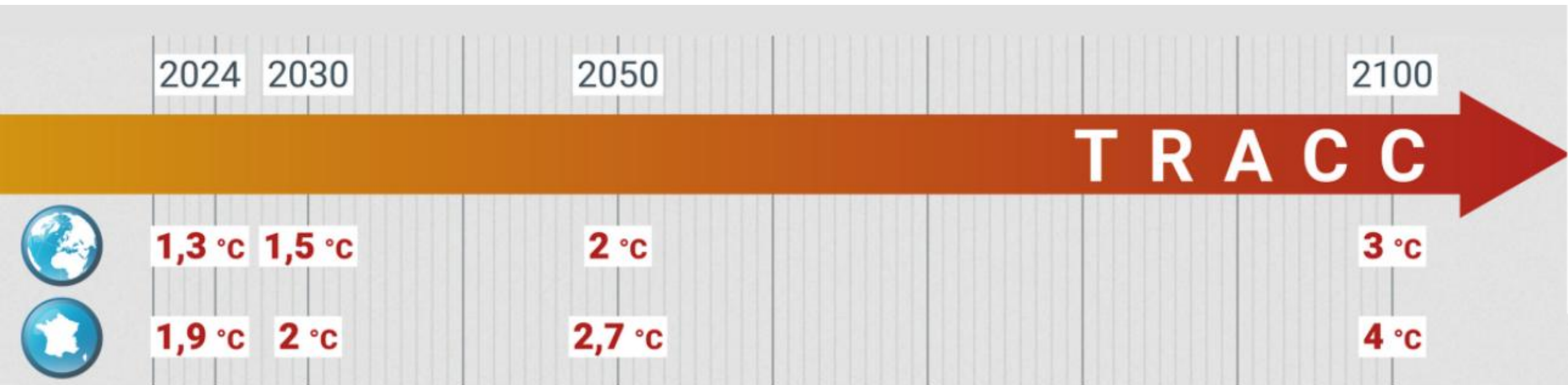
Notes : phénomènes observés et projetés en moyenne sur le globe selon quatre scénarios de réchauffement mondial par rapport à l'ère préindustrielle ; le scénario + 1,5 °C au niveau mondial correspond à + 2 °C en France. Celui à + 3 °C au niveau mondial correspond au scénario + 4 °C en France. Le scénario à + 4 °C au niveau mondial va bien au-delà du scénario + 4 °C en France.

Source : CGDD, d'après Météo-France et les scénarios du Giec

Une TRAjectoire de référence pour s'adapter au Changement Climatique (TRACC) définie par le ministère de la Transition écologique à partir des travaux du GIEC *(inscrite dans le code de l'environnement depuis le 26 janvier 2025)*

Objectif:

Fournir à l'ensemble des acteurs publics et privés un référentiel commun leur permettant de construire leurs stratégies d'adaptation



projections basées sur les simulations mondiales CMIP6 régionalisées pour la France

Selon Météo France et le scénario de référence retenu par les autorités françaises (TRACC) :

- Le nombre de jours de vagues de chaleur pourrait être multiplié par cinq en 2050 (+2,7°C), et par dix en 2100 (+4°C).
- possibilité de canicules cinq fois plus longues qu'en 2003 (scénarios les plus pessimistes)
- vagues de chaleur possibles à partir de début juin et jusqu'à mi-septembre (contre mi-juin et mi-septembre actuellement) en 2050, et dès la mi-mai et jusqu'à fin septembre en 2100.

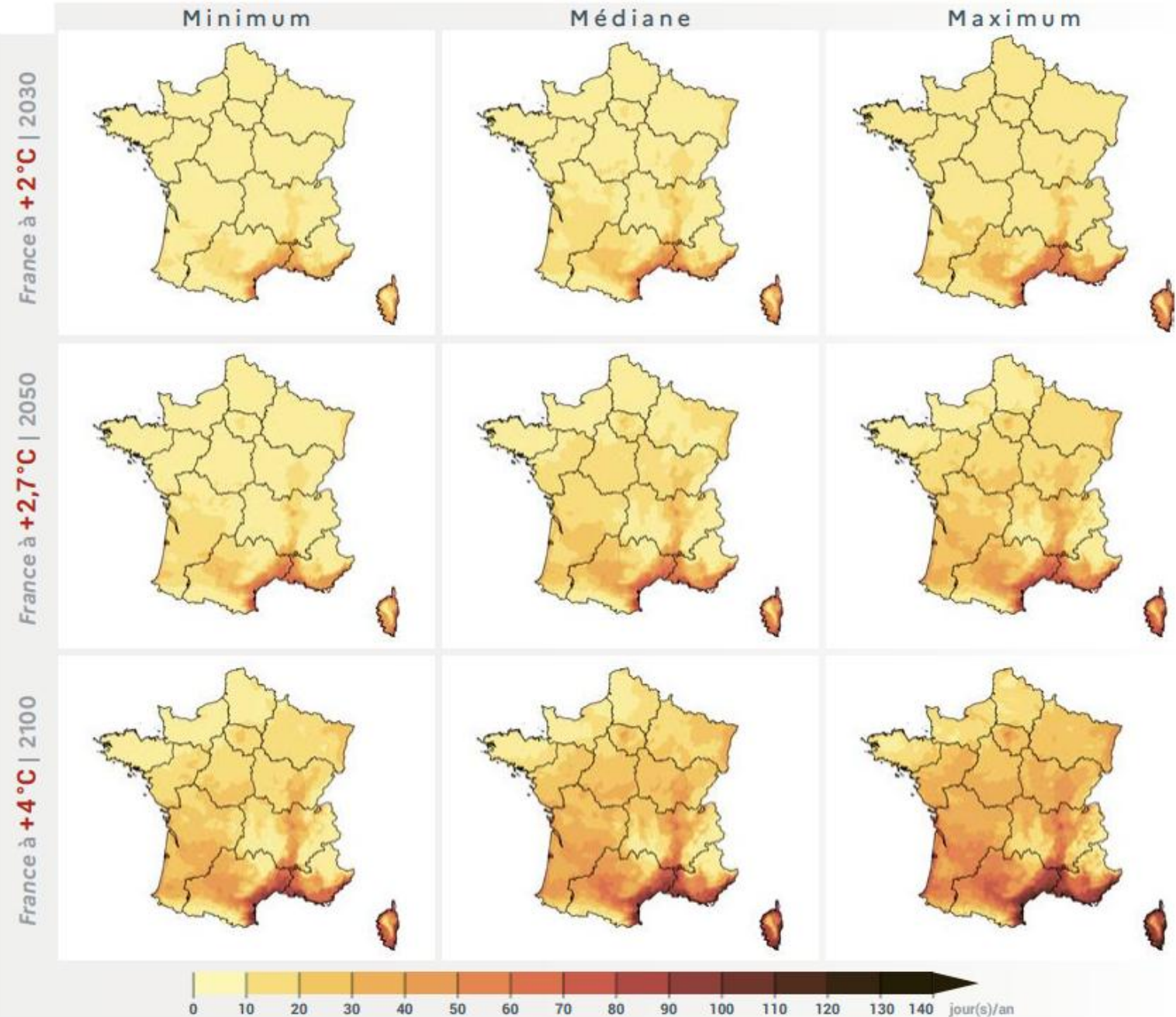


Figure 14 : Évolution du nombre de nuits chaudes (température minimale supérieure à +20°C) selon les niveaux de réchauffement +2°C, +2,7°C et +4°C en France hexagonale, horizons TRACC 2030, 2050 et 2100, selon les valeurs min, médiane et max de l'ensemble TRACC-2023

NOUVELLE GÉNÉRATION DE SCÉNARIOS CLIMATIQUES (CMIP7)

Étude : “The Scenario Model Intercomparison Project for CMIP7 (ScenarioMIP-CMIP7)”
van Vuuren et al., 2026 – Geoscientific Model Development – DOI : 10.5194/gmd-19-2627-2026

Conclusion clé de l'étude

Un réchauffement supérieur à 5 °C en 2100 devient improbable.

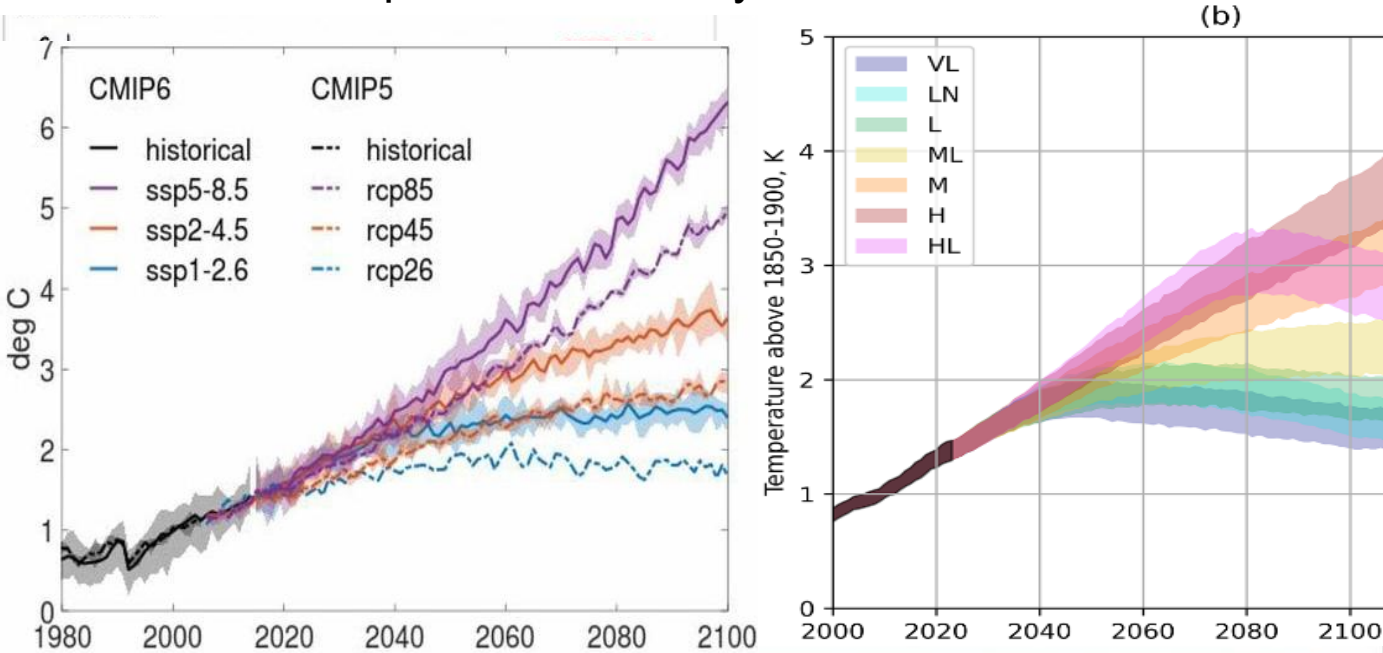
L Le scénario le plus élevé atteint ~3,5 °C.

ANCIENS SCÉNARIOS (CMIP6 / AR6 du GIEC) vs NOUVEAUX SCÉNARIOS (CMIP7 / pour AR7)

CMIP6 – scénarios SSP (AR6)

CMIP7 – nouveaux scénarios (ScenarioMIP-CMIP7)

Near surface temperature anomaly relative to 1850-1900



POURQUOI CES SCÉNARIOS ONT ÉTÉ RÉVISÉS ?

Déploiement plus rapide que prévu des énergies renouvelables et baisse des coûts.

Politiques climatiques mises en place qui freinent la croissance des émissions.

Réévaluation des hypothèses socio-économiques des scénarios extrêmes.

Meilleure compréhension des systèmes climatiques et des tendances récentes.

LES NOUVEAUX SCÉNARIOS CMIP7 (ScenarioMIP-CMIP7)

Scénario	Description	Émissions mondiales de CO ₂ en 2100 (par rapport à 2020)	Réchauffement moyen en 2100 (par rapport à 1850-1900)
Scénario ÉLEVÉ	Monde avec politiques climatiques limitées, dépendance prolongée aux fossiles, développement économique élevé.	≈ +20 à +30 %	~3,0 – 3,5 °C
Scénario INTERMÉDIAIRE	Politiques actuelles prolongées, transition incomplète, progrès technologiques modérés.	≈ -20 à 0 %	~2,0 – 2,5 °C
Scénario FAIBLE	Action climatique renforcée, transition énergétique rapide, coopération internationale forte.	≈ -60 à -80 %	~1,5 – 1,8 °C

PRINCIPALES DIFFÉRENCES

CMIP6 (AR6)

- Inclut des scénarios très extrêmes (ex. SSP5-8.5).
- Plage de réchauffement très large jusqu'à ~5 °C ou plus en 2100.
- Basé sur des hypothèses plus anciennes sur la technologie, l'économie et les politiques.



CMIP7 (pour AR7)

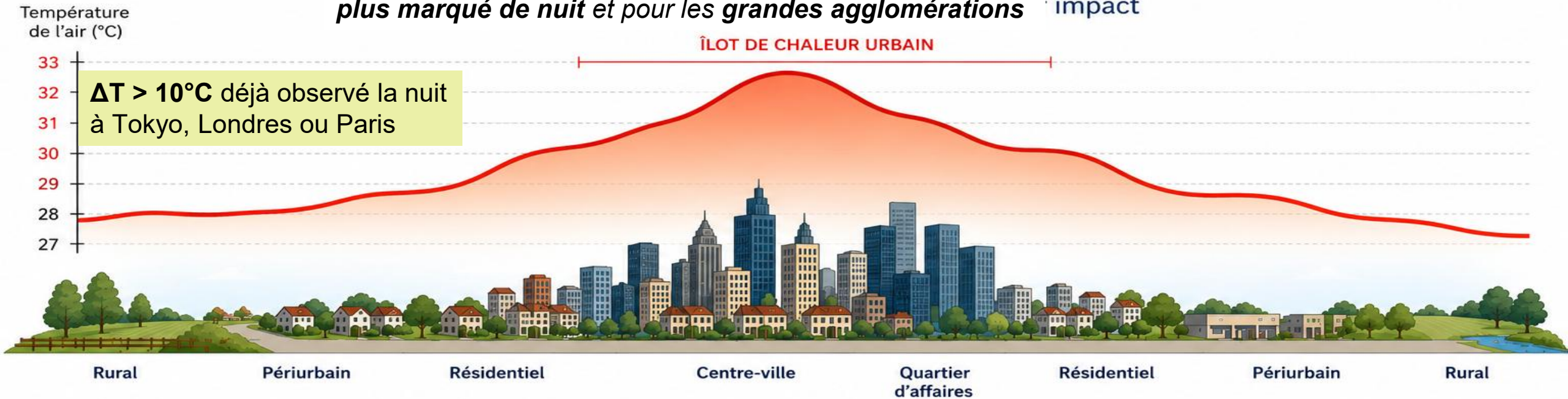
- Abandon des scénarios extrêmes comme trajectoires plausibles de référence.
- Plage resserrée : le scénario le plus élevé atteint ~3,5 °C en 2100.
- Intègre les tendances réelles récentes et les politiques déjà engagées.

3. Impacts

ÎLOT DE CHALEUR URBAIN

plus marqué de nuit et pour les grandes agglomérations

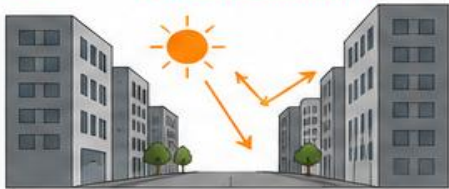
impact



CAUSES HIÉRARCHISÉES PAR IMPACT

(du plus impactant au moins impactant)

1 MORPHOLOGIE URBAINE (CANYON URBAIN)

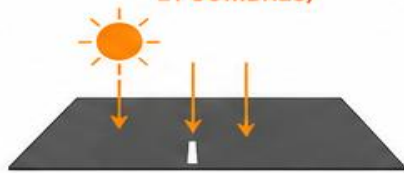


Les rues étroites bordées de bâtiments élevés limitent la circulation de l'air et le rayonnement solaire est piégé, ce qui augmente la température.

IMPACT : TRÈS ÉLEVÉ



2 MATÉRIAUX URBAINS (SURFACES IMPERMÉABLES ET SOMBRES)



Le béton, l'asphalte et les toitures sombres absorbent beaucoup de rayonnement solaire le jour et restituent la chaleur la nuit.

IMPACT : TRÈS ÉLEVÉ



3 MANQUE DE VÉGÉTATION

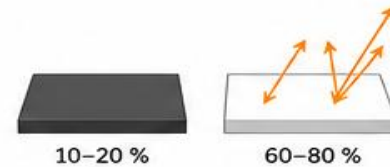


L'absence d'arbres et d'espaces verts limite l'ombre et l'évapotranspiration qui rafraîchissent naturellement l'air.

IMPACT : ÉLEVÉ



4 FAIBLE ALBÉDO (RÉFLEXION SOLAIRE)



Les surfaces sombres réfléchissent peu le rayonnement solaire (albédo faible) et absorbent davantage de chaleur.

IMPACT : MOYEN



5 CHALEUR ANTHROPIQUE (ÉMISSIONS DE CHALEUR)



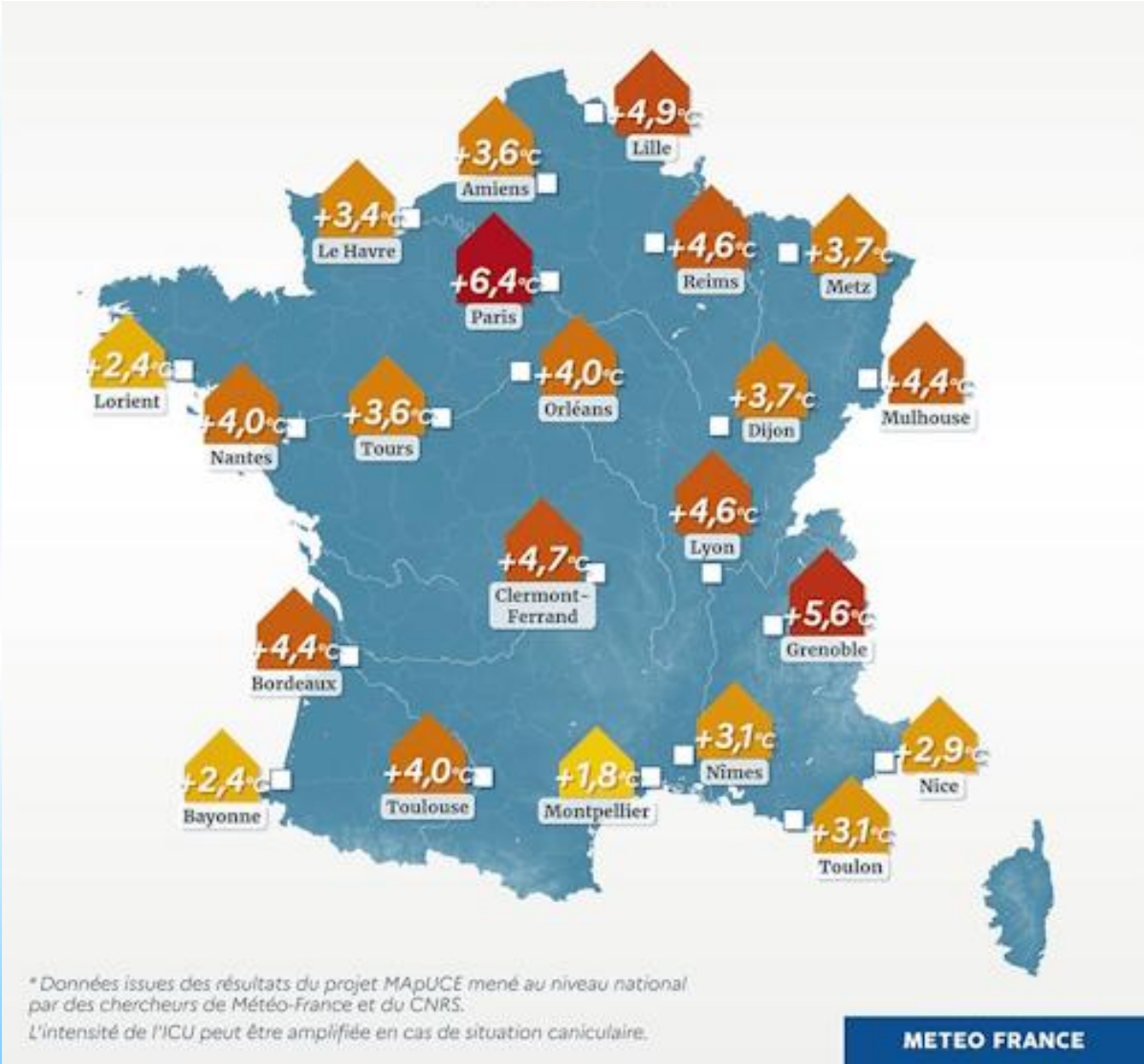
Les activités humaines (transports, climatisation, industrie, chauffage) rejettent de la chaleur directement dans l'environnement.

IMPACT : MOYEN À FAIBLE



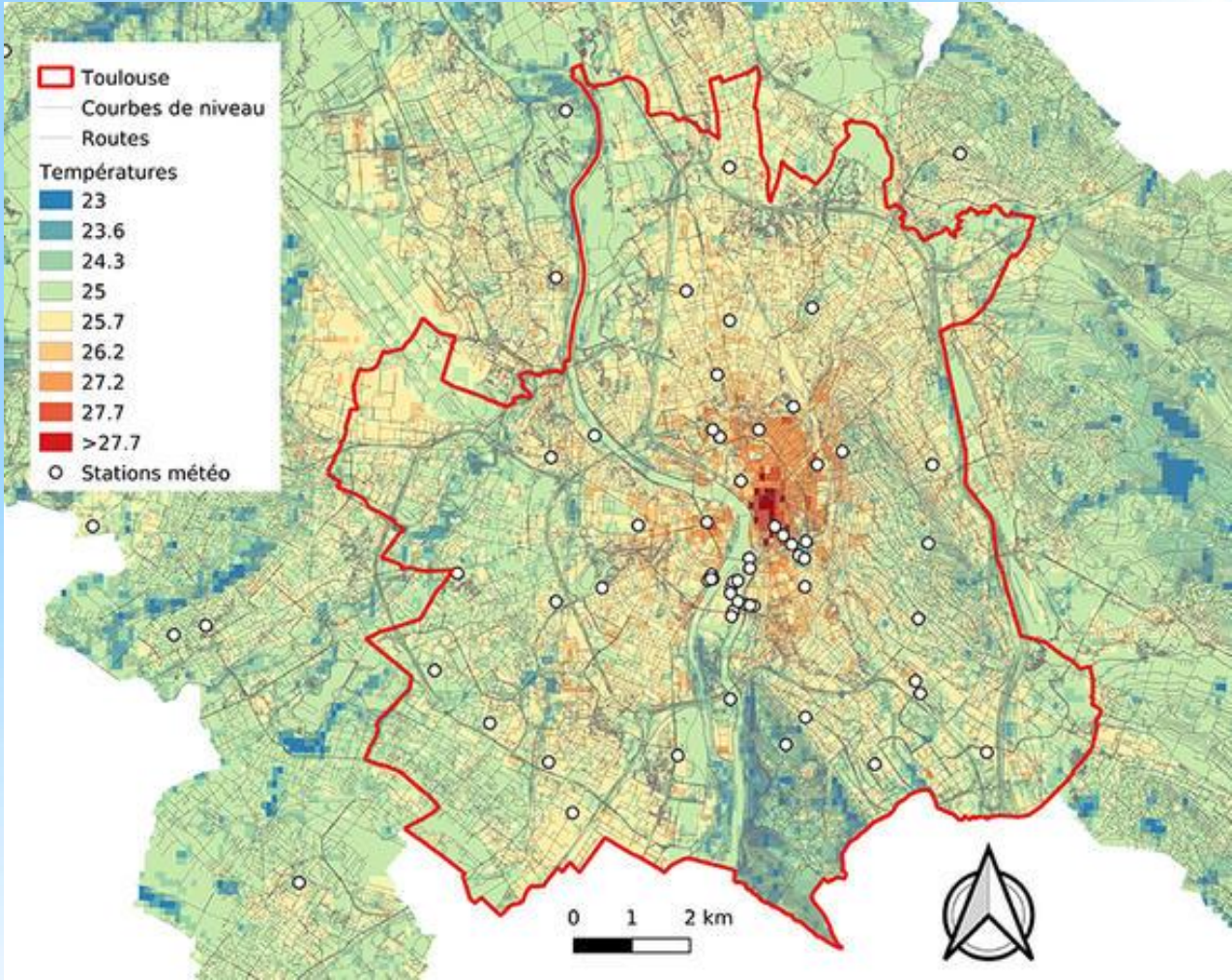
Les émissions anthropiques aggravent le phénomène MAIS restent secondaires à l'échelle métropolitaine

Ces valeurs correspondent à l'ICU observé après une journée d'été fortement ensoleillée (*l'intensité de l'ICU peut être amplifiée lors d'épisodes caniculaires*)



Ilot de Chaleur Urbain (ICU) mesuré sur Toulouse entre 21h et 22h en août 2021

<https://lejournal.cnrs.fr/articles/comprendre-les-ilots-de-chaueur-urbains>



Les grands facteurs d'influence du climat urbain

APUR (2013): Les îlots de chaleur urbains à Paris – Cahier n°1

Les matériaux/revêtements

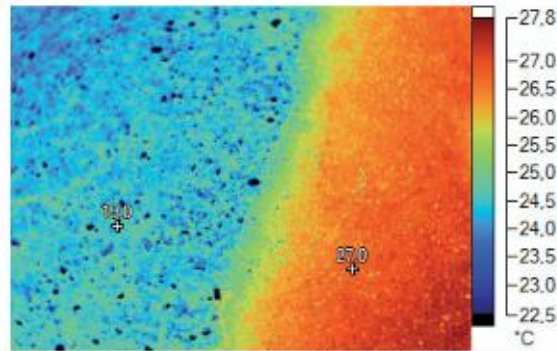
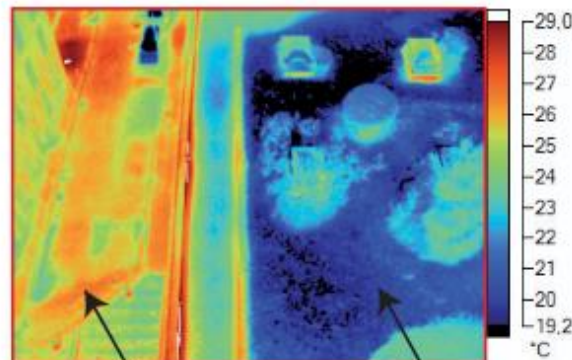


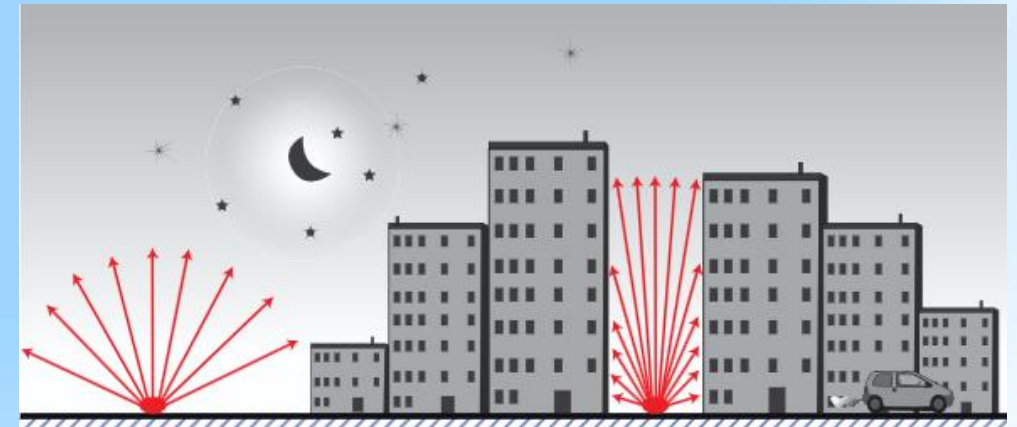
Figure 19 – Comparaison de deux revêtement de trottoir 1 heure après le coucher du soleil le 31 juillet 2011. Le stabilisé (à gauche) est nettement plus frais que l'asphalte (à droite), c'est leur différence de couleur



En contre-bas l'espace public minéralisé encore chaud

Au premier plan : vue plongeante sur une terrasse végétale qui crée localement un îlot de fraîcheur

Morphologie urbaine



Parvis de Beaubourg : Vue dégagée sur le ciel (SFV>80%)

- Fort niveaux d'ensoleillement en journée
- + Fort niveau de refroidissement nocturne



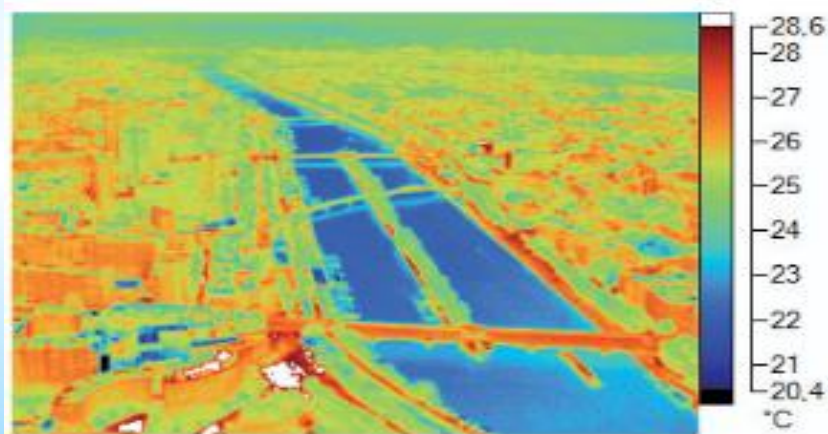
Rue Geoffroy Langevin : Peu de vue sur le ciel (SFV<40%)

- + Faible niveau d'ensoleillement en journée
- Faible potentiel de refroidissement nocturne

L'eau

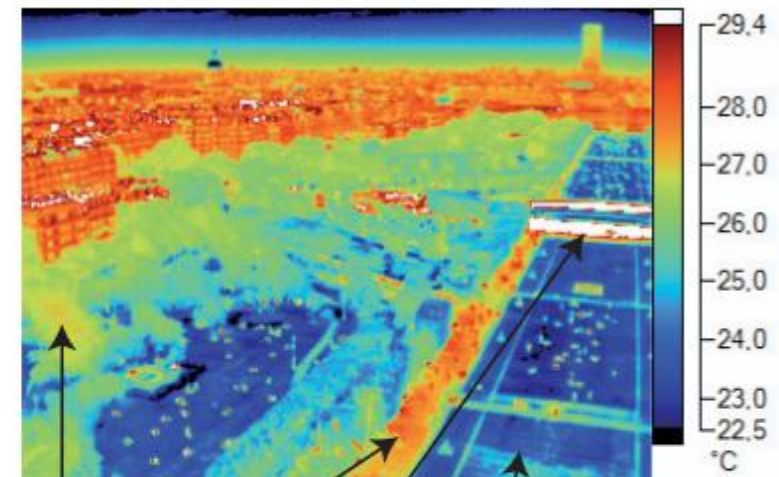


mise en place de brise thermique nocturne



Paris le 2 août 2011 à 21h30

La végétation



La canopée des arbres possède encore la marque de l'irradiation solaire, de la journée

Les circulations piétonnes en « stabilisé » viennent juste de passer à l'ombre, leur niveau de température, encore élevé, s'estompera rapidement au fil des heures

Les revêtements bitumineux ont abondamment stocké de l'énergie solaire en cours de journée, ils resteront à des niveaux de températures élevés une partie de la nuit

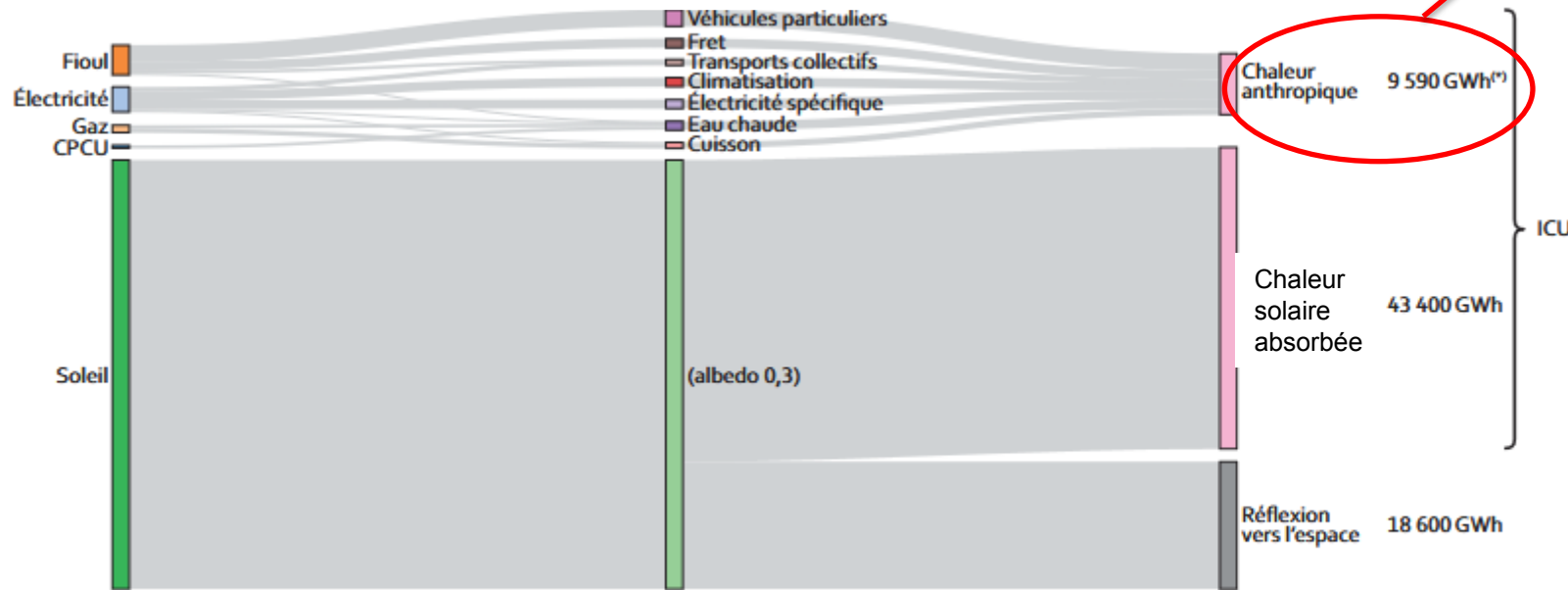
La pelouse apparaît déjà fraîche, l'ensoleillement subi dans la journée n'a pas été stocké par le végétal

Attention :

T_{surf} beaucoup plus contrastée que T_{air}

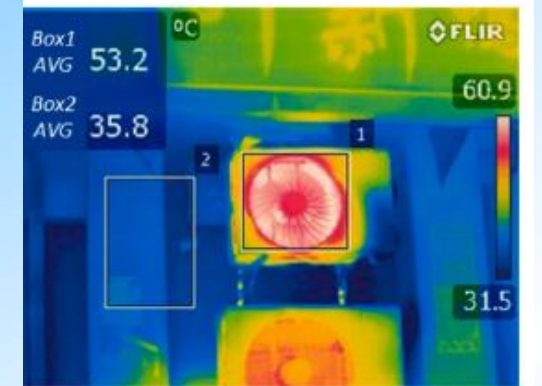
Les activités humaines

quantité d'énergie transitant sur le territoire parisien de mai à septembre 2009



(*) GWh (pour « Giga Watt heure ») est une quantité d'énergie. Une ampoule de 100 Watts qui fonctionne pendant 10 heures consomme 1 kWh (pour « kilo Watt heure »). 1 GWh c'est 1 million de kWh.

Source : CEREN (2011)



La chaleur anthropique n'est pas le principal moteur de l'ICU malgré un impact local fort

augmentation locale de température de **+1,9°C le jour à +3,3 °C la nuit** autour des zones très climatisées (centres commerciaux, rues denses et étroites)

How does anthropogenic heat emissions from buildings affect urban heat island intensity? » (Urban Climate, 2025)

PANNEAUX PHOTOVOLTAÏQUES ET ÎLOTS DE CHALEUR URBAINS

Mécanismes, effets et solutions selon la littérature scientifique récente (2024–2025)

Sources principales : Houchmand et al., 2024 (Building & Environment, 253, 111354) ;

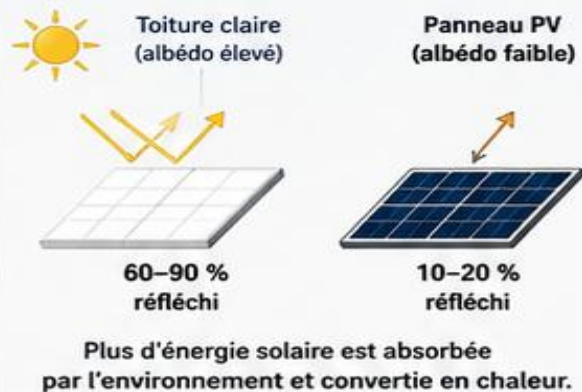
Nisar et al., 2025 (Solar Energy, 289, 113029) ; Chen et al., 2025 (Building & Environment, 268, 112012).

Revue complémentaire : Shahmohamadi et al., 2024 (Renewable & Sustainable Energy Reviews, 205, 114573).



4 MÉCANISMES PRINCIPAUX

1 BAISSÉ DE L'ALBÉDO (surface plus sombre)



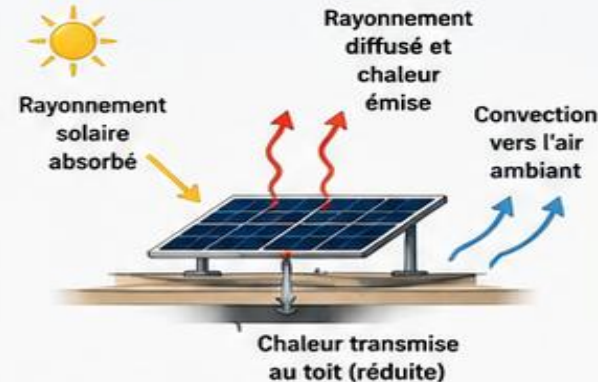
2 FLUX DE CHALEUR CONVECTIVE (sous les panneaux)



3 EFFET « PV HEAT ISLAND » (à l'échelle locale)



4 MODIFICATION DU BILAN RADIATIF ET THERMIQUE



EFFETS OBSERVÉS ET MODÉLISÉS (études récentes)

Simulation à l'échelle d'une ville
(Lyon) – Nisar et al., 2025



+0,72 °C
en journée



-0,42 °C
la nuit



Température
des toitures
baissée



**-5 % de besoins
de climatisation
en moins (jour)**

Mesures de terrain
(Chen et al., 2025)



Température de l'air plus élevée
à proximité des panneaux
(jusqu'à plusieurs °C selon les conditions)

Ordre de grandeur

Effet typique à l'échelle
d'une ville :
+0,1 à +0,7 °C en journée

Effet local au voisinage
immédiat des panneaux :
+1 à +5 °C possibles

Variable selon le climat,
la ville et le taux de couverture PV

POURQUOI LES RÉSULTATS DIFFÈRENT ?

Plusieurs effets agissent en même temps

Tendent à RÉCHAUFFER



Baisse de l'albédo
(surfaces plus sombres)



Convection de chaleur
sous les panneaux



Rayonnement infrarouge
émis par les panneaux

Tendent à REFROIDIR



Ombre portée sur le toit



Réduction de l'échauffement
et du stockage de chaleur
du toit



Production d'électricité
sans émissions et sans
climatisation supplémentaire

Le bilan final dépend : climat, type de toiture,
géométrie urbaine, densité et taux de couverture PV.

Vers un urbanisme anti-canicule

les **stratégies d'atténuation des ICU** ciblent d'abord la **végétation**, l'**ombrage**, l'**albédo** et la **ventilation urbaine** avant les seules émissions de chaleur des bâtiments

Chaque ville possède son propre îlot de chaleur dépendant de sa configuration urbaine globale
=> chaque ville possède aussi ses propres solutions d'adaptation

quartier EuroMéditerranée à Marseille:

l'orientation des rues rafraîchit la ville en été grâce à la bise de mer, sans laisser passer le froid du mistral l'hiver



Quartier Euroméditerranée à Marseille, avec notamment le boulevard, la villa Méditerranée de l'architecte Stefano Boeri, le port de la Joliette et la cathédrale Sainte-Marie-Majeure.



UNE VILLE FRAÎCHE (d'après l'IA)

Conçue pour limiter l'effet d'îlot de chaleur urbain



VÉGÉTALISATION MASSIVE

Arbres, parcs, toits et murs végétalisés pour apporter de l'ombre et favoriser l'évapotranspiration.



MATÉRIAUX FRAIS

Toits clairs ou végétalisés, façades réfléchissantes, revêtements perméables et à albédo élevé pour réfléchir la chaleur.



MOBILITÉ DURABLE

Transports en commun, vélos, marche à pied : moins de chaleur rejetée par les véhicules.



VENTILATION NATURELLE

Orientation des rues et des bâtiments pour favoriser les courants d'air.



EAU EN VILLE

Plans d'eau, fontaines, canaux et sols perméables pour rafraîchir l'air par évaporation.



ÉNERGIES PROPRES ET REJETS LIMITÉS

Moins de chaleur anthropique grâce à des bâtiments efficaces et des énergies renouvelables.



DENSITÉ OPTIMISÉE ET OMBRAGE

Bâtiments de hauteur adaptée, ombrage naturel et espaces ouverts pour limiter l'accumulation de chaleur.



AGRICULTURE URBAINE ET ALIMENTATION LOCALE

Potagers, vergers urbains et circuits courts pour végétaliser et réduire l'empreinte climatique.

LES BÉNÉFICES



TEMPÉRATURES ABAISSÉES

Jusqu'à plusieurs degrés en moins en été.



SANTÉ AMÉLIORÉE

Moins de stress thermique et de pollution.



BIODIVERSITÉ PRÉSERVÉE

Des habitats pour la faune et la flore en ville.



GESTION DURABLE DE L'EAU

Moins de ruissellement, plus d'infiltration.



CONSOMMATION RÉDUITE

Moins de climatisation, plus d'économies d'énergie.



CADRE DE VIE ATTRACTIF

Une ville plus agréable, résiliente et durable.

UNE VILLE FRAÎCHE ET BAS CARBONE

Conçue pour limiter l'effet d'îlot de chaleur urbain

(d'après l'IA... forcée par l'IN)



VÉGÉTALISATION MASSIVE

Arbres, parcs, toits et murs végétalisés pour apporter de l'ombre et favoriser l'évapotranspiration.



MATÉRIAUX FRAIS ET CLAIRS

Toits clairs ou végétalisés, façades réfléchissantes, revêtements perméables et à albédo élevé pour réfléchir la chaleur et limiter son stockage.



VENTILATION NATURELLE ET MORPHOLOGIE ADAPTÉE

Orientation des rues et des bâtiments pour favoriser la circulation de l'air et éviter les effets de canyon urbain.



MOBILITÉ DURABLE

Transports en commun électriques, vélos, marche à pied : moins de chaleur rejetée par les véhicules et meilleure qualité de l'air.



ÉLECTRICITÉ NUCLÉAIRE BAS CARBONE

Une électricité fiable, pilotable et décarbonée pour alimenter la ville, y compris les systèmes de climatisation performants.



CLIMATISATION INTELLIGENTE ET PEU IMPACTANTE

- ✓ Systèmes à haut rendement énergétique
- ✓ Rejets de chaleur maîtrisés et dirigés
- ✓ Matériel de dernière génération (à faible température de rejet)
- ✓ Pilotage intelligent en fonction des besoins réels

Impact sur l'îlot de chaleur urbain : **FAIBLE ET LOCALEMENT CONTRÔLÉ**



DENSITÉ OPTIMISÉE ET OMBRAGE

Bâtiments de hauteur adaptée, ombrage naturel et espaces ouverts pour limiter l'accumulation de chaleur.



AGRICULTURE URBAINE ET ALIMENTATION LOCALE

Potagers, vergers urbains et circuits courts pour végétaliser et améliorer la résilience alimentaire.

CLIMATISATION BIEN PENSÉE

- ✓ Unités extérieures à faible rejet (température maîtrisée)
- ✓ Installation à l'ombre ou en toiture optimisée
- ✓ Entretien régulier pour maintenir l'efficacité
- ✓ Récupération de chaleur quand possible (eau chaude sanitaire, réseaux de chaleur)



RAFRAÎCHISSEMENT ADIABATIQUE

Utilise l'évaporation de l'eau pour rafraîchir l'air naturellement.



- Brumisateurs urbains
- Façades et toitures adiabatiques
- Tours adiabatiques pour le rafraîchissement des bâtiments



GEOCOOLING

Utilise la fraîcheur stable du sous-sol pour rafraîchir les bâtiments.



- Réseaux d'eau tempérée à faible profondeur
- Puits canadiens / provençaux
- Rafraîchissement passif et très basse énergie



GÉOTHERMIE

Exploite la chaleur du sous-sol pour le chauffage et la fraîcheur du sous-sol pour le refroidissement.



- Géothermie sur nappe
- Géothermie profonde
- Pompes à chaleur géothermiques réversibles



FREECOOLING

Utilise la fraîcheur de l'air extérieur quand les conditions le permettent.



- Freecooling direct (air extérieur)
- Freecooling indirect (échangeur)
- Pilotage intelligent selon les conditions extérieures



RÉSEAUX DE FROID BAS CARBONE

Distribution centralisée de froid produit efficacement et bas carbone.



- Production centralisée efficace
- Récupération de froid (freecooling, eau de rivière, stockage, géothermie, data centers...)
- Réseau de distribution isolé