



TEMPÉRATURE TERRESTRE



Table des matières

Table des matières

INTRODUCTION	4
CONTEXTE SCIENTIFIQUE	5
OBJECTIFS DU PROJET.....	7
COMPRÉHENSION ET MANIPULATION DES DONNÉES.....	8
Cadre de la collecte des données	8
Pertinence des variables sélectionnées.....	8
Limitations et qualité des données.....	9
PRÉ-PROCESSING DES DONNÉES	10
Données LOTI (Land-Ocean Temperature Index).....	10
Données AIRS (Atmospheric InfraRed Sounder)	10
Bilan du pré-processing	10
ANALYSE EXPLORATOIRE.....	12
1) Tendances globales (1880 → présent, LOTI).....	12
2) Comparaison hémisphérique (Nord vs Sud, LOTI).....	12
3) Lecture zonale (bandes de latitude, LOTI)	13
4) Période récente et validation croisée (AIRS vs LOTI, 2003 → présent).....	15
4.1 Comparaison des séries récentes (AIRS vs LOTI, 2003–2024)	15
4.2 Analyse intra-annuelle et saisonnière (AIRS v7)	18
4.6 Synthèse des observations.....	21
DISCUSSION ET INTERPRÉTATION.....	22
1. Confirmation du réchauffement global et robustesse des données	22
2. Interprétation des contrastes régionaux.....	23
Amplification polaire : un marqueur du déséquilibre énergétique	23
Inertie thermique et latence du Sud	23
3. Implications climatiques et sociétales.....	24
Cryosphère : un marqueur immédiat du réchauffement	24
Océans : accumulation et redistribution de la chaleur	24
Atmosphère : extrêmes plus intenses et plus fréquents	24
Conséquences humaines et trajectoire future	25

CONCLUSION.....	26
ANNEXES	27
1. Correspondance des jeux de données.....	27
2. Extraits de code Python	27
3. Extraits Power BI.....	27
4. Bibliographie.....	28



INTRODUCTION

Le changement climatique constitue l'un des enjeux majeurs du XXI^e siècle. Depuis la révolution industrielle, et plus encore depuis les années 1970, les observations scientifiques montrent une tendance nette au réchauffement de la surface terrestre. Ce phénomène, désormais incontestable, résulte principalement de l'accumulation de gaz à effet de serre liée aux activités humaines, comme le rappellent régulièrement les rapports du **Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC)**.

Ses effets sont déjà visibles et touchent tous les continents : fonte accélérée des glaciers et des calottes polaires, élévation du niveau des mers, augmentation de la fréquence et de l'intensité des événements climatiques extrêmes, perturbations des écosystèmes et conséquences économiques, sociales et sanitaires directs pour les populations. Le changement climatique n'est donc plus une perspective lointaine : il est une réalité actuelle dont nous faisons déjà l'expérience et qui redéfinit nos conditions de vie.

Dans ce contexte, il est essentiel de s'appuyer sur des données scientifiques solides pour documenter ces évolutions, en mesurer l'ampleur et en rendre compte de manière claire et accessible. Comprendre le réchauffement climatique n'est pas seulement une affaire de recherche : c'est une question qui concerne l'ensemble de la société, car chacun est affecté, directement ou indirectement, par ses conséquences.

C'est pourquoi notre groupe a choisi de travailler sur ce projet. Nous souhaitons non seulement développer nos compétences en analyse de données à partir de séries climatiques reconnues, mais aussi **mieux appuyer un discours collectif fondé sur des faits**. En manipulant et en visualisant directement les données, nous voulons être en mesure de comprendre, d'argumenter et de convaincre face à l'urgence climatique.

CONTEXTE SCIENTIFIQUE

Le suivi de la température terrestre s'inscrit dans une histoire longue où l'observation locale a progressivement cédé la place à des indicateurs globaux. Comme d'autres grandeurs de référence en économie ou en santé publique, les indicateurs climatiques ont été conçus pour représenter synthétiquement l'évolution d'un phénomène complexe, en agrégant des mesures hétérogènes issues de réseaux d'observation dispersés.

Au cœur de cette construction se trouve la **notion d'anomalie de température** : plutôt que de comparer des températures absolues (fortement dépendantes du lieu, de l'altitude, du capteur, du moment de la journée), on mesure des écarts par rapport à une période de référence stable. Cette approche présente un double intérêt. Sur le plan scientifique, elle réduit les biais comparatifs liés aux contextes locaux et rend possible l'agrégation multi-sources (stations terrestres, navires, bouées, etc.). Sur le plan opérationnel, elle facilite la lecture temporelle (variabilité interannuelle, tendances pluri-décennales) sans imposer d'hypothèse forte sur les niveaux absous.

Depuis la fin du XIX^e siècle, plusieurs équipes internationales ont structuré des produits climatiques globaux à partir d'observations de surface et de mer : ils combinent contrôle qualité, homogénéisation (corrections météorologiques, changement d'instruments, déplacements de stations), maillage spatial (grilles régulières) et agrégation (mensuelle, saisonnière, annuelle, hémisphérique, zonale). Cette chaîne de traitement, indispensable pour transformer des mesures ponctuelles en séries globales cohérentes, s'accompagne de métadonnées et d'incertitudes explicites (barres d'erreur, couvertures partielles, zones extrapolées).

Ce cadre a suscité des discussions méthodologiques nourries : comment traiter l'effet d'îlot de chaleur urbaine ? Comment corriger les ruptures instrumentales (par ex. thermomètres de pont vs bouées en mer) ? Quelle période de référence choisir sans biaiser l'interprétation ? Jusqu'où interpoler dans les régions peu couvertes historiquement (hautes latitudes, océans de l'hémisphère Sud) ? Loin de fragiliser l'indicateur, ces débats ont conduit à des procédures plus transparentes et à des comparaisons croisées entre équipes (terrestres et marines), renforçant la robustesse d'ensemble.

À partir de la fin du XX^e siècle, l'essor des observations satellitaires a apporté un regard indépendant sur les températures de l'atmosphère et de la surface. Les capteurs infrarouges et micro-ondes permettent un échantillonnage quasi-global avec une fréquence élevée. Leur exploitation repose sur des chaînes de restitution spécifiques (calibration, géométrie d'observation, profils verticaux), distinctes des réseaux de surface. En pratique, les produits satellitaires sont utilisés en complément : ils ne remplacent pas les séries historiques de surface, mais offrent une validation et un éclairage récent précieux.

L'analyse climatique mobilise ensuite des outils statistiques simples et interprétables : statistiques descriptives, lissages modérés (par ex. moyenne mobile pluri-annuelle) pour améliorer la lisibilité des tendances, estimations de pente (taux de changement par décennie ou par siècle), et comparaisons spatiales (global, hémisphères, bandes de latitude). Ces techniques présentent l'avantage d'être traçables, répliques et adaptées à un contexte pédagogique, tout en exigeant de la prudence : la pente dépend de la fenêtre temporelle retenue ; les variabilités naturelles (volcanisme, oscillations océaniques,



cycles internes) modulent à court terme le signal de fond ; et tout lissage doit être présenté comme un outil de lecture, non comme un substitut aux données brutes.

Au-delà des méthodes, le sens de ces indicateurs explique leur place croissante dans le débat public : ils constituent une base factuelle partagée pour apprécier l'évolution du climat sur la durée, sans préjuger des causes ou des impacts locaux. Au-delà des méthodes, le sens de ces indicateurs explique leur place croissante dans le débat public : ils constituent une base factuelle partagée pour apprécier l'évolution du climat sur la durée. C'est précisément sur ce type de données que s'appuient les synthèses internationales du **GIEC**, qui font référence pour éclairer les décideurs et les citoyens sur l'état du climat et ses trajectoires possibles. Ils permettent aux chercheurs, décideurs et citoyens de parler le même langage quand il s'agit de comparer des périodes, des régions ou des échelles d'analyse.

Dans ce projet, notre posture est volontairement académique et pédagogique : travailler à partir de séries climatiques reconnues, expliciter les choix de traitement, rendre les étapes reproductibles, et documenter les limites.

OBJECTIFS DU PROJET

Ce projet vise à analyser l'évolution des anomalies de température à l'échelle mondiale, hémisphérique et zonale, en s'appuyant sur les séries historiques (GISTEMP) et satellitaires récentes (AIRS) mises à disposition par la NASA. L'objectif est de mettre en évidence les grandes tendances du réchauffement climatique, d'en comparer l'ampleur selon les régions, et de montrer comment les données scientifiques permettent de mieux comprendre un phénomène global qui nous concerne tous.

Nous sommes conscients de notre statut d'apprenants dans ce domaine spécifique. Néanmoins, l'importance du sujet constitue une source de motivation particulière : chacun d'entre nous est directement ou indirectement concerné par les effets du changement climatique, ce qui nourrit notre volonté de contribuer à un travail rigoureux et accessible.

À ce stade, nous n'avons pas échangé avec des climatologues ou experts métiers pour affiner la problématique et les hypothèses. Notre priorité initiale est de développer une compréhension approfondie des données, d'appliquer les techniques de préparation, d'exploration et de visualisation appropriées, et de produire des résultats intermédiaires fiables. Cette démarche se traduit par une problématique centrale :

Comment les données climatiques produites par la NASA permettent-elles de rendre compte du réchauffement global et de ses différences régionales depuis 1880 ?

En résumé, ce projet a une double finalité :

- Pédagogique, en consolidant nos compétences en data analyse sur un cas concret ;
- Citoyenne, en participant à la diffusion d'informations factuelles sur un enjeu environnemental crucial.

COMPRÉHENSION ET MANIPULATION DES DONNÉES

Cadre de la collecte des données

Notre projet s'appuie sur des données mises à disposition par la **NASA**, via le **Goddard Institute for Space Studies (GISS)** et l'instrument satellitaire **AIRS (Atmospheric Infrared Sounder)**. Ces sources, accessibles en ligne et régulièrement mises à jour, constituent des références internationales pour l'étude des températures mondiales.

Deux familles principales de fichiers CSV ont été exploitées :

- **Les séries GISTEMP (LOTI)**, couvrant la période **1880 à nos jours**, fournissent les anomalies de température par rapport à la référence **1951–1980**, déclinées en moyennes **globales, hémisphériques et zonales**. Ces données s'appuient sur les observations du **Global Historical Climatology Network (GHCN)**, une base gérée par la **NOAA/NCEI** regroupant plus de 100 000 stations terrestres dans le monde. Le **LOTI** combine ces observations terrestres issues du GHCN avec les températures océaniques du jeu **ERSST v5**, produisant ainsi un **indice global Terre–Océan**.
- **Les séries AIRS**, disponibles depuis **2002**, sont issues de mesures satellitaires infrarouges et exprimées en anomalies par rapport à la période **2007–2016**. Elles offrent une perspective indépendante, complémentaire des observations de surface.

Ce **double cadre — historique (LOTI) et satellitaire (AIRS)** — permet d'analyser conjointement les **tendances de long terme** et les **dynamiques récentes**, en confrontant des approches de mesure indépendantes mais cohérentes.

Pertinence des variables sélectionnées

Les données mises à disposition par la NASA prennent la forme de séries temporelles d'anomalies de température. Ces anomalies représentent l'écart, en degrés Celsius, entre une valeur observée et une période de référence. Contrairement à des températures absolues, elles offrent une lecture homogène et directement comparable dans le temps et dans l'espace.

Au regard de nos objectifs, plusieurs niveaux de granularité sont pertinents :

- Anomalies globales : indicateur synthétique de l'évolution du climat terrestre
- Anomalies hémisphériques (Nord/Sud) : comparaison des rythmes de réchauffement, en lien avec la répartition des continents et des océans ;
- Anomalies zonales : décomposition par bandes de latitude (tropiques, moyennes latitudes, pôles), permettant d'identifier les zones les plus affectées

La variable cible de notre analyse est donc l'anomalie annuelle de température. Les autres dimensions (hémisphères, zones) servent de clés de comparaison et d'interprétation.

Limitations et qualité des données

Bien que les données de la NASA constituent une référence internationale, elles présentent plusieurs limitations qu'il convient de garder à l'esprit :

- Les séries historiques reposent sur des réseaux de stations terrestres et maritimes dont la couverture varie selon les régions et les époques (moins dense dans l'hémisphère Sud et aux hautes latitudes)
- Les séries satellitaires, bien que globales, nécessitent des corrections complexes liées aux capteurs et aux conditions d'observation
- La comparaison entre deux jeux de données (LOTI vs AIRS) implique des choix méthodologiques (périodes de référence différentes) qui peuvent affecter l'interprétation brute.

Enfin, comme tout jeu de données à grande échelle, les séries climatiques ne prétendent pas rendre compte de toutes les nuances locales (climat urbain, microclimats, phénomènes régionaux ponctuels). Elles constituent avant tout un **indicateur global et agrégé**, dont l'analyse doit être replacée dans le cadre plus large des connaissances scientifiques synthétisées par le GIEC.

PRÉ-PROCESSING DES DONNÉES

Avant d'entamer l'analyse exploratoire, un travail de préparation a été réalisé sur les fichiers afin d'assurer la cohérence et la lisibilité des séries temporelles.

Données LOTI (Land-Ocean Temperature Index)

Les séries **LOTI** couvrent la période 1880–présent et constituent la base historique de l'analyse. Plusieurs traitements ont été appliqués :

- **Suppression de l'année 2025**, incomplète au moment de l'étude
- **Conversion en valeurs numériques** des colonnes mensuelles et saisonnières, certaines ayant été importées comme texte en raison de symboles de valeurs manquantes (***)
- **Gestion ponctuelle des valeurs manquantes** :
 - Pour D-N (Décembre–Novembre), une valeur manquante a été remplacée par la moyenne des mois janvier à novembre de la même année
 - Pour DJF (Décembre–Janvier–Février), une valeur manquante a été imputée par la moyenne de janvier et février
- **Maintien de l'année au format entier (int)** afin de garantir un traitement chronologique robuste.

Ces ajustements restent légers et ont pour but de conserver l'intégrité de la série tout en la rendant directement exploitable. Ils nous permettent de traiter l'information disponible dans la série sans recourir à des hypothèses externes. Leur impact est négligeable sur l'ensemble de la série (plus d'un siècle de données), d'autant qu'ils concernent des agrégations saisonnières ou annuelles. Il existe toutefois d'autres approches possibles (interpolation linéaire entre années voisines, recours à la moyenne climatologique de la période de référence, ou maintien des valeurs manquantes). Dans le cadre de ce projet pédagogique, nous avons privilégié une méthode pragmatique et transparente, en considérant que ces ajustements mineurs ne compromettaient pas l'analyse des tendances globales.

Données AIRS (Atmospheric InfraRed Sounder)

Les données **AIRS** sont issues de l'observation satellitaire et couvrent la période 2002–présent. Afin d'assurer leur fiabilité, nous avons retenu uniquement la **version v7**, la plus récente et homogène. Plusieurs choix ont été effectués :

- **Exclusion de l'année 2025** (incomplète) et de l'année **2002**, trop lacunaire avec de nombreuses valeurs manquantes
- **Conversion systématique des colonnes en valeurs numériques** pour éviter toute erreur de type
- **Restriction de la période analysée à 2003–année complète la plus récente**, afin de travailler sur un intervalle robuste et comparable avec LOTI.

Un point important est que les anomalies AIRS sont calculées par rapport à la période 2007–2016, tandis que celles de LOTI utilisent 1951–1980. Il serait donc artificiel de comparer directement les niveaux absolus. Dans notre analyse, nous avons choisi de conserver ces cadres distincts et de nous concentrer sur la comparaison des tendances (pentes, évolutions relatives).

Bilan du pré-processing



Les séries sont désormais prêtes pour l'analyse exploratoire :

- **LOTI** offre une perspective longue (1880–présent) ;

Year	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	J-D	DJF	MAM	JJA	SON	D-N	
Convert this dataframeto an interactive table.																			
0	1880	-0.18	-0.24	-0.09	-0.16	-0.10	-0.21	-0.18	-0.10	-0.14	-0.23	-0.22	-0.17	-0.17	-0.21	-0.12	-0.16	-0.20	-0.17
1	1881	-0.20	-0.14	0.03	0.05	0.06	-0.19	0.00	-0.03	-0.15	-0.22	-0.18	-0.07	-0.09	-0.17	0.05	-0.07	-0.18	-0.09
2	1882	0.16	0.14	0.04	-0.17	-0.14	-0.23	-0.16	-0.07	-0.14	-0.24	-0.16	-0.36	-0.11	0.08	-0.09	-0.15	-0.18	-0.09
3	1883	-0.29	-0.37	-0.12	-0.18	-0.17	-0.07	-0.06	-0.14	-0.21	-0.11	-0.23	-0.11	-0.17	-0.34	-0.15	-0.09	-0.18	-0.19
4	1884	-0.13	-0.07	-0.35	-0.40	-0.33	-0.35	-0.30	-0.27	-0.27	-0.25	-0.33	-0.31	-0.28	-0.10	-0.36	-0.31	-0.28	-0.26

- **AIRS** apporte un regard indépendant et complémentaire sur la période récente (2003–présent).

Year	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	J-D	DJF	MAM	JJA	SON	D-N	
27	2003	0.13	-0.02	-0.01	0.03	0.08	0.02	0.02	0.03	0.07	0.19	-0.36	0.19	0.03	0.01	0.03	0.02	-0.03	0.01
28	2004	0.13	0.15	0.03	-0.02	-0.31	-0.08	-0.25	-0.26	-0.10	-0.07	0.04	-0.05	-0.07	0.16	-0.10	-0.20	-0.04	-0.04
29	2005	0.14	0.05	0.13	0.11	0.11	0.11	0.03	-0.05	0.02	0.10	0.05	0.08	0.07	0.04	0.12	0.03	0.06	0.06
30	2006	-0.02	0.22	0.01	-0.12	-0.11	0.03	-0.12	-0.07	-0.12	-0.06	-0.04	0.01	-0.03	0.09	-0.07	-0.05	-0.07	-0.03
31	2007	0.20	0.09	-0.00	0.10	-0.00	-0.01	-0.02	-0.10	-0.18	-0.10	-0.10	-0.21	-0.03	0.10	0.03	-0.04	-0.13	-0.01

Ces deux sources permettent d'articuler à la fois l'histoire du réchauffement climatique et sa confirmation par les observations satellitaires modernes.

ANALYSE EXPLORATOIRE

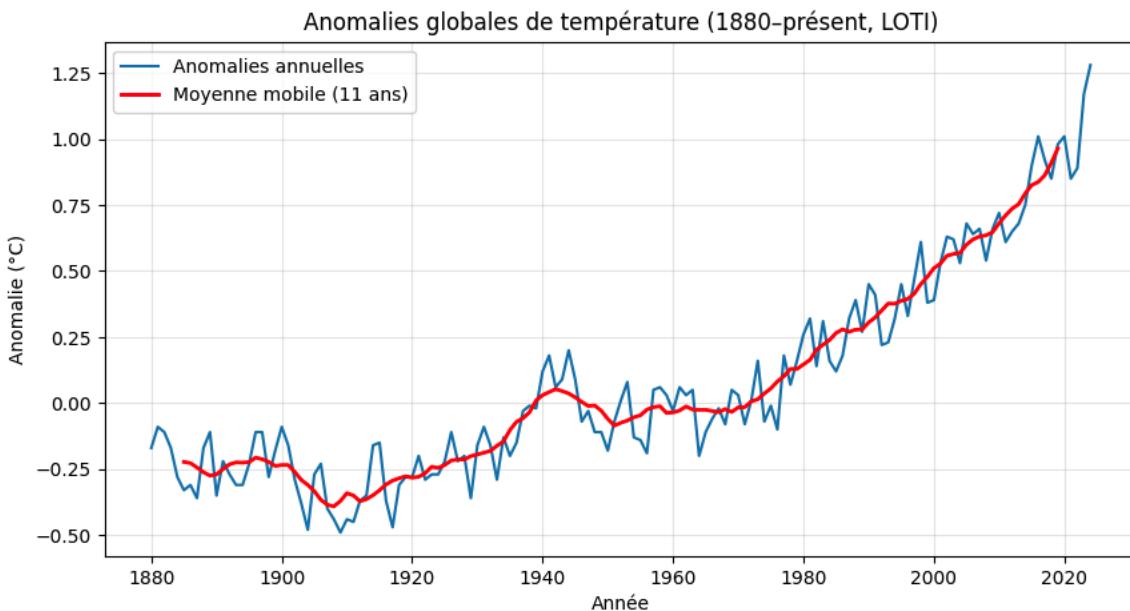
Cette section propose une lecture descriptive des anomalies de température après préparation des données. L'objectif est de dégager les grandes tendances sans interprétation causale, en s'appuyant sur des visualisations simples et reproductibles.

1) Tendances globales (1880 → présent, LOTI)

La série des anomalies globales issues de LOTI (1880–présent) met en évidence une variabilité naturelle d'une année à l'autre, mais surtout une tendance nette à la hausse depuis les années 1970. L'utilisation d'une moyenne mobile sur 11 ans* permet de lisser les fluctuations interannuelles et de faire ressortir la trajectoire de fond : un réchauffement continu, particulièrement marqué sur les dernières décennies.

* la moyenne mobile sur 11 ans est celle utilisée par la NASA et le GIEC. Elle vise à lisser les fluctuations interannuelles (El Niño, volcanisme) tout en préservant les tendances décennales, correspondant approximativement à un cycle solaire complet.

Figure 1 — Anomalies de température mondiale (1880–2024, série LOTI).



2) Comparaison hémisphérique (Nord vs Sud, LOTI)

La comparaison des anomalies de température entre l'hémisphère Nord et l'hémisphère Sud met en évidence des différences notables dans le rythme du réchauffement. Le graphique ci-dessous montre l'évolution des anomalies globales, ainsi que celles des deux hémisphères, sur la période 1880–2024.

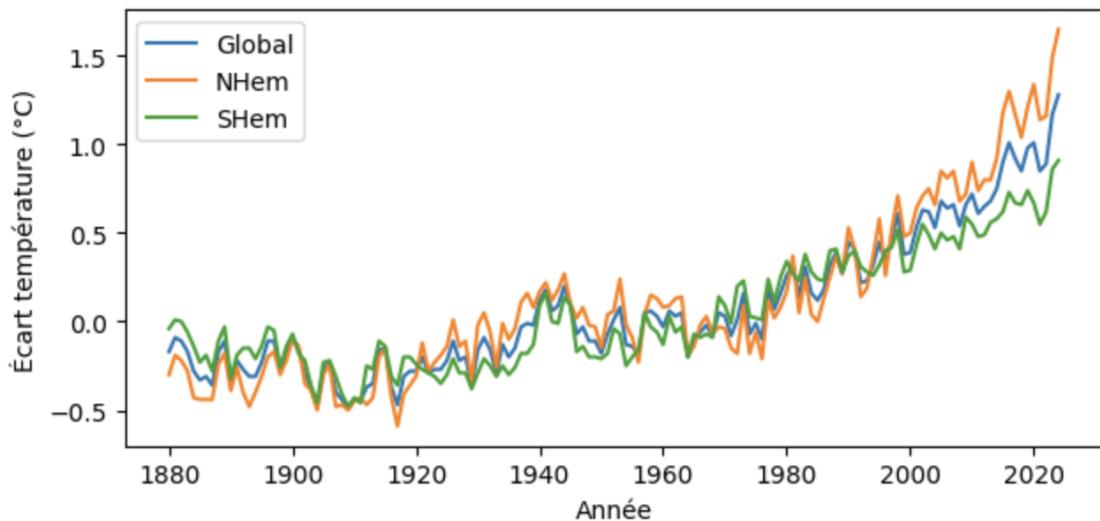


On constate que :

- L'hémisphère Nord connaît une hausse beaucoup plus marquée et rapide, surtout à partir des années 1980
- L'hémisphère Sud se réchauffe également, mais de manière plus progressive
- L'écart entre les deux hémisphères s'accentue sur les dernières décennies, atteignant en 2024 un maximum de +1,6 °C pour le Nord contre environ +0,75 °C pour le Sud.

Cette asymétrie reflète en partie la répartition géographique : l'hémisphère Nord, plus continental et davantage industrialisé, est plus sensible aux activités humaines et aux forçages climatiques. L'hémisphère Sud, dominé par les océans, amortit plus longtemps la hausse mais n'échappe pas à la tendance globale.

Figure 2 — Évolution des anomalies de température moyennes mondiales, hémisphère Nord et hémisphère Sud selon la série LOTI (période de référence : 1951–1980).



3) Lecture zonale (bandes de latitude, LOTI)

L'analyse par bandes de latitude affine la compréhension du réchauffement global en révélant sa **distribution spatiale**.

Les moyennes globales masquent en effet des contrastes marqués entre zones tropicales, tempérées et polaires.

La figure ci-dessous, issue des séries LOTI, représente les **pentes linéaires d'évolution des anomalies de température** (en °C par décennie) selon la latitude, calculées sur la période 1880–2024.

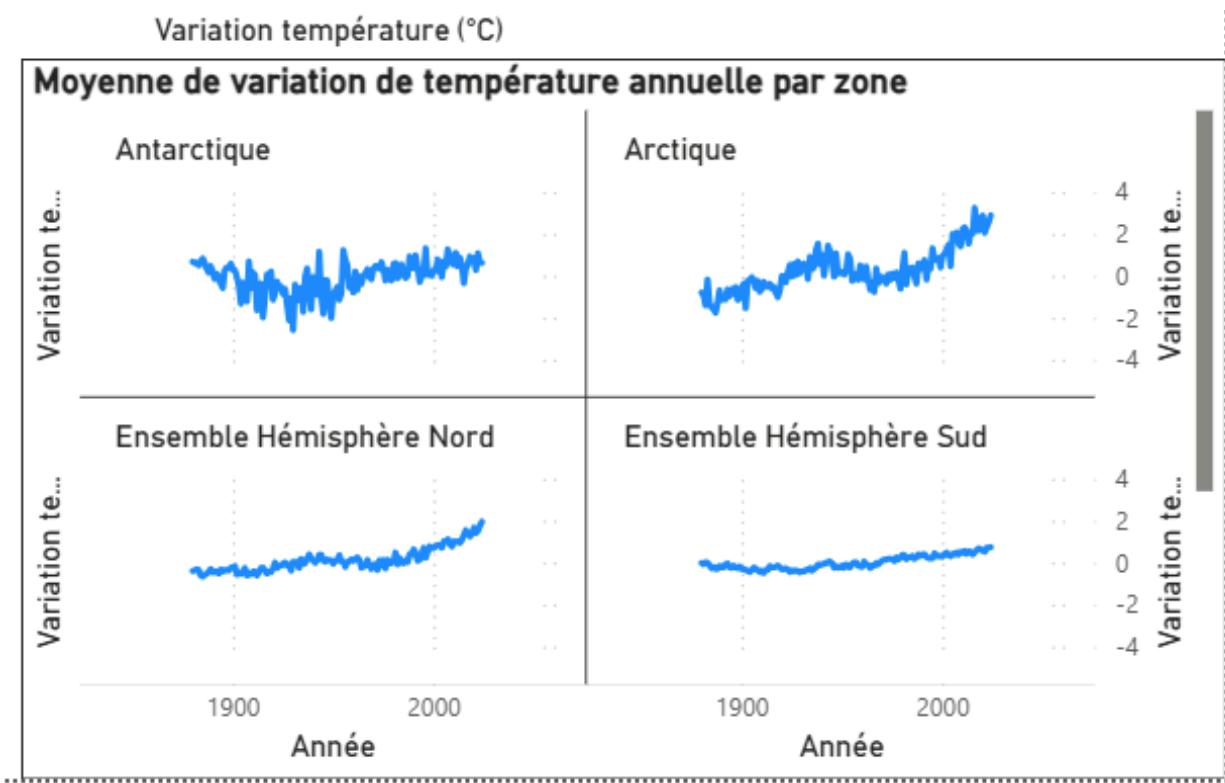
On observe une **forte hétérogénéité zonale** :

- Les **hautes latitudes nord (64°N–90°N)** affichent une pente d'environ **+0,19 °C par décennie**, soit près du double de la moyenne mondiale.



- Les **moyennes latitudes nord (44°N–64°N)** présentent un réchauffement soutenu, de l'ordre de **+0,12 °C par décennie**.
- Les **zones tropicales (16°S–16°N)** et la majeure partie de l'**hémisphère sud** montrent une évolution plus modérée, autour de **+0,06 à +0,07 °C par décennie**.

Figure 3 — Évolution des variations annuelles de température par zone géographique (LOTI, 1880–2024).



Cette distribution confirme le phénomène d'**amplification polaire**, particulièrement marqué dans l'Arctique.

Ce dernier s'explique par plusieurs mécanismes physiques bien documentés :

- La **diminution de l'albédo*** due à la fonte de la neige et de la glace, qui réduit la capacité de réflexion solaire et accroît l'absorption d'énergie
- Des **rétroactions locales** entre température, vapeur d'eau et circulation atmosphérique
- La **plus faible inertie thermique des continents** comparée à celle des océans, entraînant une réponse plus rapide au forçage radiatif.

En revanche, les océans tropicaux et australs, du fait de leur **capacité thermique élevée**, amortissent temporairement les variations et contribuent à la relative stabilité de ces zones.



En résumé, la lecture zonale met en évidence une **planète qui se réchauffe de manière inégale** : le réchauffement est maximal dans l'Arctique, modéré dans les zones tempérées, et plus lent dans les régions océaniques du Sud. Ces résultats rejoignent les conclusions des derniers rapports du GIEC (AR6, 2023) : **l'Arctique se réchauffe près de quatre fois plus vite que la moyenne mondiale**, une dynamique qui bouleverse déjà les équilibres climatiques régionaux et globaux.

* L'**albédo** désigne la capacité d'une surface à **réfléchir la lumière solaire**. Exprimé sur une échelle de 0 à 1, il indique la proportion d'énergie renvoyée vers l'espace sans être absorbée :

- Les **surfaces claires** (neige, glace) présentent un albédo élevé ($\approx 0,8\text{--}0,9$)
- Tandis que les **surfaces sombres** (océan, forêt, sol humide) absorbent davantage d'énergie (albédo $\approx 0,1\text{--}0,2$).

Lorsque les glaces polaires fondent, elles laissent place à des surfaces plus sombres, qui absorbent plus de rayonnement solaire. Cette absorption supplémentaire **réchauffe encore davantage la zone**, entraînant une nouvelle fonte : c'est une **rétroaction positive**. Ce mécanisme d'amplification explique pourquoi **les régions arctiques se réchauffent deux à trois fois plus vite que la moyenne mondiale**. Il illustre aussi la sensibilité particulière des hautes latitudes, où de faibles changements de température peuvent provoquer des basculements rapides des équilibres climatiques (fonte du pergélisol, modification des courants atmosphériques, perte de glace de mer, etc.).

4) Période récente et validation croisée (AIRS vs LOTI, 2003 → présent)

4.1 COMPARAISON DES SÉRIES RÉCENTES (AIRS vs LOTI, 2003–2024)

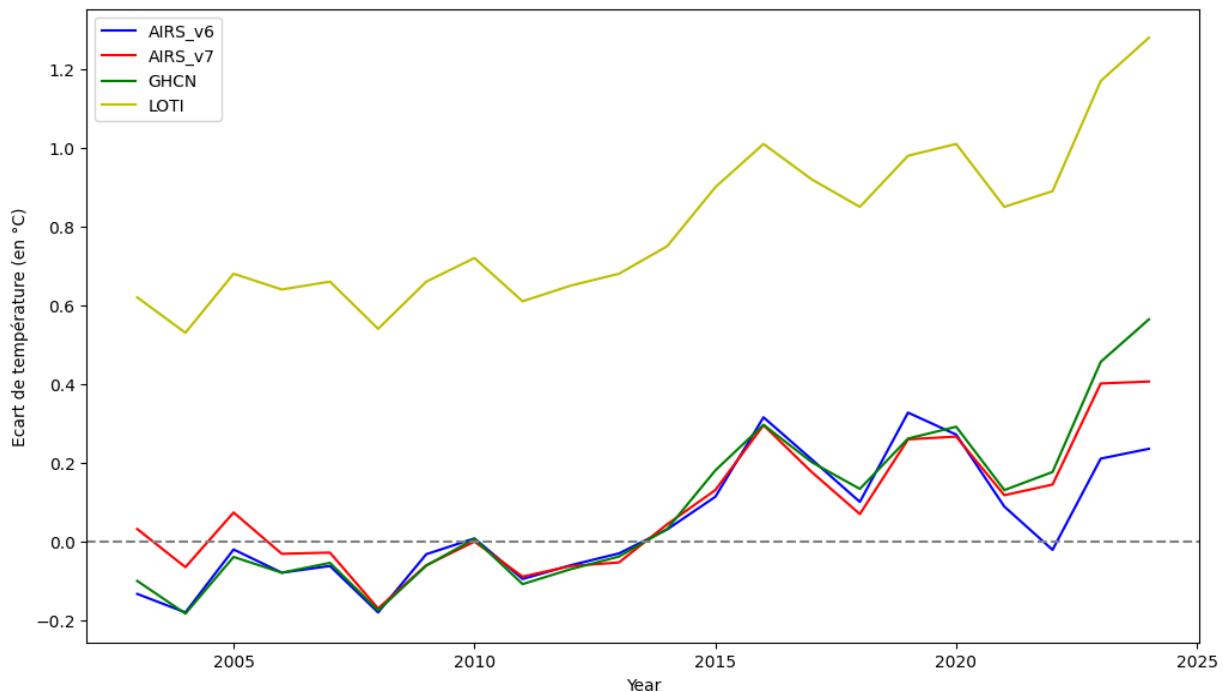
Cette section vise à confronter les séries historiques issues du **LOTI** (Land-Ocean Temperature Index) avec les observations satellitaires **AIRS (Atmospheric Infrared Sounder)**, sur la période commune **2003–2024**. L'objectif est de vérifier la cohérence des tendances récentes entre **mesures de surface** et **mesures satellitaires**, deux approches indépendantes mais complémentaires.

Les séries récentes permettent de confronter les anomalies issues des mesures de surface (**LOTI**, basées sur le **GHCN**) et celles des observations satellitaires (**AIRS**). Nous avons initialement comparé, sur la période **2003–2024**, les écarts de température mesurés par les systèmes **AIRS (v6 et v7)**, **GHCN** et **LOTI**.

Le premier graphique ci-dessous montre que toutes les séries présentent **une même tendance haussière**, mais avec **un décalage de niveau** d'environ **+0,6 °C** pour LOTI. Cet écart s'explique par la différence de **période de référence**. Effectivement, si les écarts de température observés par les systèmes AIRS ont pour référence la période de 2007 à 2016, ceux observés par le système LOTI se rapportent à la

plage antérieure allant de 1951 à 1981, et comme nous avons pu le voir précédemment, les températures ont augmenté d'ici les années 2000.

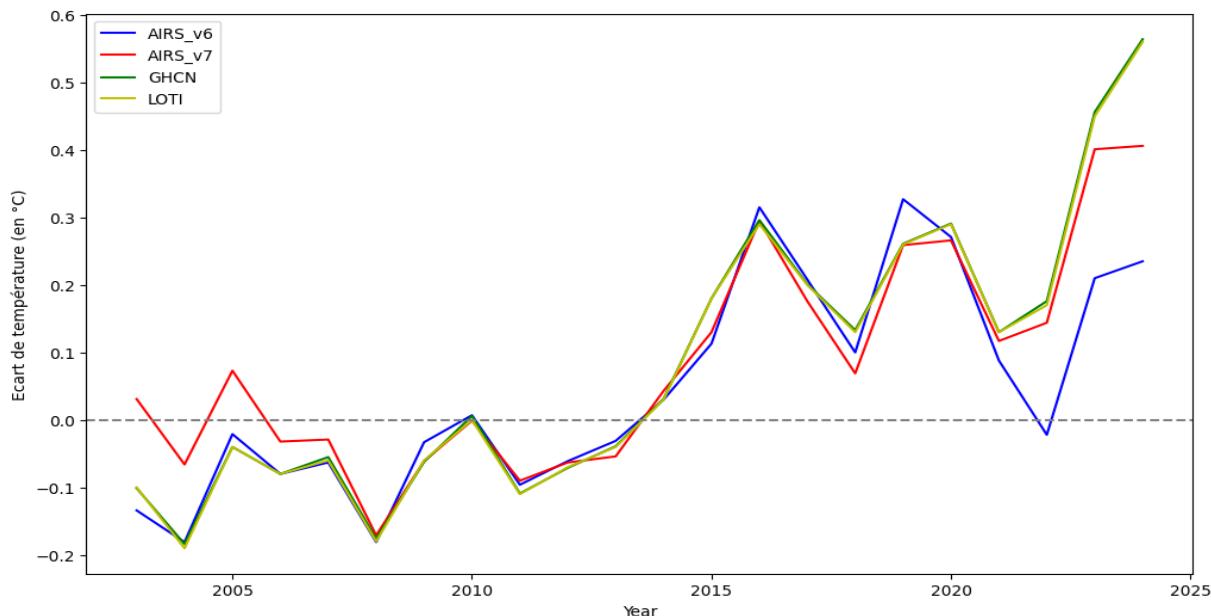
Evolution de l'écart de température par rapport à la période 2007-2016 en fonction du système de mesure et du temps



Si nous voulons comparer ce qui peut l'être, il faut donc mettre à jour la plage de référence LOTI : après avoir mesuré l'écart moyen de température entre 2007 et 2016 sur le graphique LOTI, nous calculons un écart de 0.72°C entre les 2 plages de référence, il nous suffit de soustraire cette valeur dans le graphique pour corriger notre erreur préalable, amenant à la version corrigée suivante :



Evolution de l'écart de température par rapport à la période 2007-2016 en fonction du système de mesure et du temps



Nous remarquons immédiatement que les courbes **LOTI** et **GHCN** se superposent presque parfaitement. Cette proximité n'est pas fortuite : les séries **GISTEMP/LOTI** de la NASA sont en partie **calculées à partir des données de surface terrestre issues du GHCN** (Global Historical Climatology Network), auquel s'ajoutent des observations marines du jeu de données **ERSST** (Extended Reconstructed Sea Surface Temperature). Autrement dit, comme vu plus haut, le **LOTI est une extension globale et interpolée du GHCN**, combinant les températures continentales et océaniques pour produire une vision unifiée des anomalies mondiales.

Ainsi, les différences mineures observées entre les deux séries relèvent essentiellement :

- De la **pondération spatiale** (le GHCN ne couvre que les terres émergées)
- Et du **traitement de l'océan** intégré dans le LOTI (via ERSST).

CHOIX DES SÉRIES DE RÉFÉRENCE

Dans ce contexte, il est **redondant d'analyser séparément GHCN et LOTI** : le LOTI, par sa couverture globale (terre + océan), constitue **le référentiel le plus complet** pour les comparaisons à l'échelle mondiale.

Pour la suite du rapport, nous retenons donc :

- **LOTI** comme référence des **températures de surface globales**
- **AIRS v7** comme mesure indépendante de la **température atmosphérique basse** (par rapport à la version v6, elle corrige plusieurs biais liés à la couverture nuageuse, aux variations diurnes et aux régions polaires, garantissant une meilleure comparabilité avec les séries de surface)



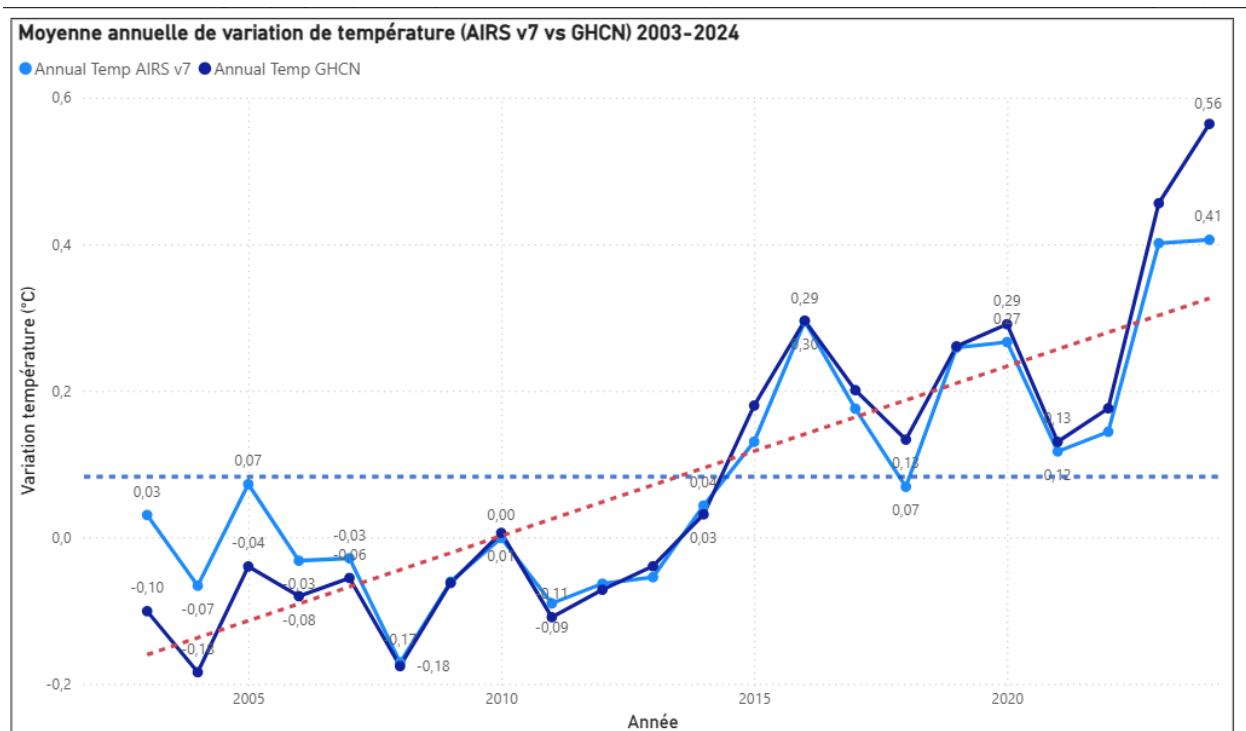
Ces deux sources, complémentaires par leur nature, permettent d'évaluer la **robustesse du réchauffement climatique observé** sur les deux dernières décennies.

4.2 ANALYSE INTRA-ANNUELLE ET SAISONNIÈRE (AIRS v7)

Cette section examine la **variabilité à l'échelle du mois et des saisons** sur la période 2003–2024 à partir des données **AIRS v7**. Rappel méthodologique : AIRS mesure la **température de la troposphère basse** ($\approx 1\text{--}4\text{ km}$) **au-dessus des terres et des océans** ; les anomalies sont calculées par rapport à la **référence 2007–2016**. L'objectif est de vérifier si le **signal de réchauffement** mis en évidence à l'échelle annuelle (section 4.4) se **retrouve dans la structure saisonnière** des températures.

4.2.1 Annuelles récentes et tendance (AIRS v7)

Figure 4. Anomalies annuelles AIRS v7 (2003–2024) et tendance linéaire



La pente sur 2003–2024 est **positive et soutenue** (accélération après 2010). Les pics de 2016 et 2023–2024 coïncident avec de **forts épisodes El Niño**, mais la **ligne de tendance** reste nettement haussière : le réchauffement n'est pas uniquement dû à la variabilité naturelle.



4.2.2 Amplitude annuelle

L'amplitude thermique annuelle, c'est-à-dire la différence entre le mois le plus chaud et le plus froid de chaque année, varie entre 0,8 et 1,2 °C sur la période étudiée. Cette fluctuation ne présente pas de tendance claire à la hausse ou à la baisse, mais elle s'accompagne d'une élévation progressive du niveau moyen des températures. Autrement dit, la ligne de base du cycle saisonnier se déplace vers le haut : toutes les saisons deviennent plus chaudes, y compris les plus froides.

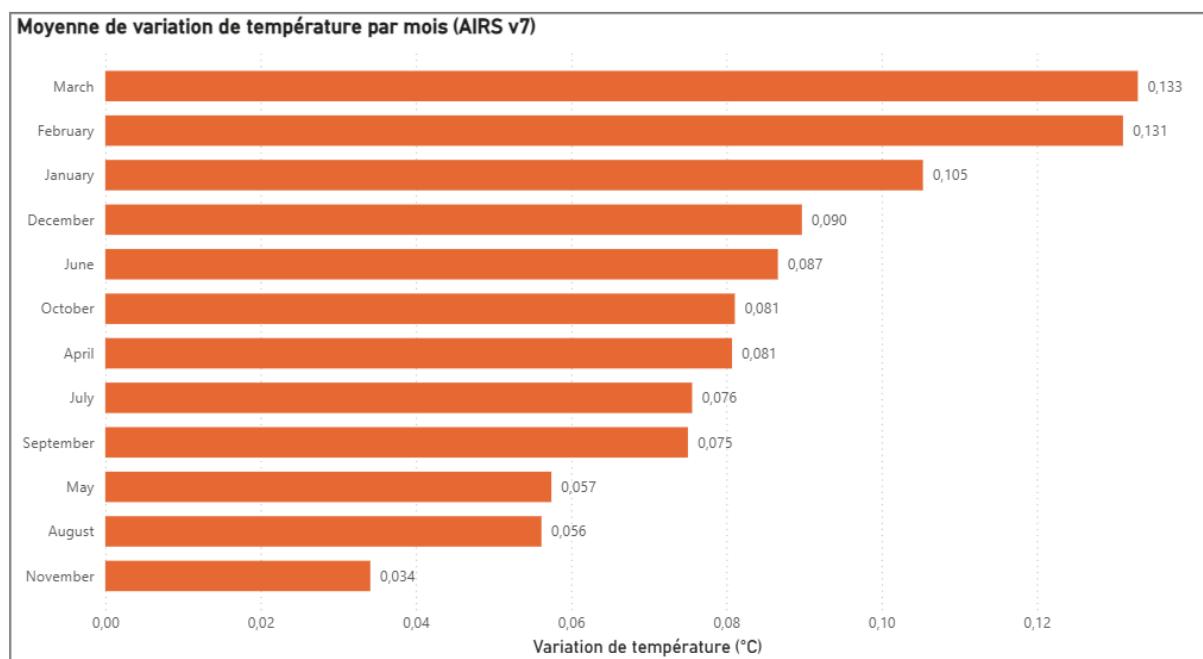
Depuis le milieu des années 2010, notamment en 2016, 2020, 2023 et 2024, plusieurs années se distinguent par une combinaison d'amplitudes élevées et de moyennes globales plus chaudes. Ce constat suggère un réchauffement « complet » du cycle annuel, où les températures augmentent aussi bien en hiver qu'en été.

Les séries AIRS v7 et GHCN montrent une cohérence remarquable dans leurs tendances, même si les valeurs d'amplitude issues d'AIRS sont légèrement plus atténuees. Cette différence s'explique par la nature des mesures satellitaires, qui captent la température de la troposphère basse, lissant davantage les contrastes saisonniers que les mesures de surface.

Ce résultat confirme un phénomène désormais bien documenté : le réchauffement global ne se manifeste pas uniquement par des étés plus chauds, mais aussi par des hivers de plus en plus doux. Les minima saisonniers, c'est-à-dire les températures les plus basses de l'année, remontent plus vite que les maxima, entraînant une homogénéisation relative du cycle thermique annuel. En d'autres termes, le climat se réchauffe désormais tout au long de l'année, et non plus seulement aux extrêmes.

4.2.3 Variations mensuelles et dynamiques saisonnières (AIRS v7, 2003–2024)

Figure 6 — Moyenne de la variation de température par mois selon les observations satellitaires



L'analyse des moyennes mensuelles issues des observations satellitaires **AIRS v7** sur la période **2003–2024** permet d'identifier la hiérarchie saisonnière du réchauffement. En agrégeant les données sur 22 ans, on obtient une vue d'ensemble de la température moyenne de chaque mois à l'échelle mondiale.

Le classement met en évidence un **cycle annuel régulier**, dominé par un **maximum thermique autour du mois de mars** et un **minimum en août–septembre**. Cette apparente inversion par rapport à la perception des saisons dans l'hémisphère Nord s'explique par le fait que **l'AIRS mesure la température moyenne globale**, intégrant les deux hémisphères : lorsque c'est l'été au Nord, c'est l'hiver au Sud, ce qui équilibre mécaniquement le signal global.

Figure 7 — Carte thermique des anomalies mensuelles de température selon AIRS v7 (2003–2024, référence 2007–2016)

Year	January	February	March	April	May	June	July	August	September	October	November	December	Total
2003	0,13	-0,02	-0,01	0,03	0,09	0,02	0,02	0,03	0,07	0,19	-0,36	0,19	0,03
2004	0,13	0,15	0,03	-0,02	-0,31	-0,08	-0,25	-0,26	-0,10	-0,07	0,04	-0,05	-0,07
2005	0,14	0,05	0,13	0,11	0,11	0,11	0,03	-0,05	0,02	0,10	0,05	0,08	0,07
2006	-0,02	0,22	0,01	-0,12	-0,11	0,03	-0,12	-0,07	-0,12	-0,06	-0,04	0,01	-0,03
2007	0,20	0,09	0,00	0,10	0,00	-0,01	-0,02	-0,10	-0,18	-0,10	-0,10	-0,21	-0,03
2008	-0,42	-0,34	0,02	-0,15	-0,17	-0,25	-0,09	-0,20	-0,15	-0,13	-0,08	-0,08	-0,17
2009	-0,01	-0,03	-0,40	-0,20	-0,08	0,00	0,10	-0,01	-0,03	-0,09	0,00	0,02	-0,06
2010	0,06	0,13	0,15	0,08	0,00	-0,02	-0,13	-0,06	-0,08	-0,09	0,05	-0,11	0,00
2011	-0,14	-0,16	-0,14	-0,04	-0,11	-0,03	0,12	0,05	-0,09	-0,12	-0,25	-0,18	-0,09
2012	-0,24	-0,17	-0,18	-0,01	0,09	0,03	-0,10	-0,04	-0,01	0,07	-0,02	-0,17	-0,06
2013	0,02	-0,13	-0,03	-0,14	-0,13	0,03	-0,18	-0,09	0,01	-0,07	0,00	0,05	-0,05
2014	0,04	-0,18	-0,06	0,09	0,13	0,04	0,03	0,12	0,13	0,10	-0,03	0,10	0,04
2015	0,11	0,22	0,15	-0,05	0,05	0,03	0,03	0,09	0,16	0,26	0,17	0,36	0,13
2016	0,38	0,56	0,49	0,33	0,22	0,18	0,24	0,25	0,25	0,17	0,27	0,22	0,29
2017	0,32	0,40	0,40	0,12	0,18	0,06	0,13	0,09	0,10	0,09	0,03	0,18	0,18
2018	0,13	0,18	0,14	0,10	0,05	0,04	0,03	-0,04	-0,02	0,15	-0,06	0,11	0,07
2019	0,18	0,25	0,43	0,23	0,16	0,24	0,27	0,21	0,23	0,32	0,24	0,35	0,26
2020	0,33	0,39	0,31	0,33	0,28	0,27	0,25	0,23	0,26	0,19	0,33	0,05	0,27
2021	0,10	0,07	0,09	0,08	0,10	0,12	0,20	0,13	0,15	0,11	0,08	0,18	0,12
2022	0,25	0,26	0,35	0,23	0,11	0,23	0,17	0,07	0,07	0,09	-0,16	0,07	0,14
2023	0,13	0,28	0,49	0,24	0,23	0,42	0,54	0,47	0,61	0,45	0,43	0,53	0,40
2024	0,50	0,67	0,55	0,43	0,38	0,45	0,39	0,43	0,37	0,24	0,17	0,29	0,41
Total	0,11	0,13	0,13	0,08	0,06	0,09	0,08	0,06	0,08	0,08	0,03	0,09	0,08

La **carte thermique** rend cette évolution particulièrement visible. Au-delà de ce cycle saisonnier stable, on observe une **élévation systématique des moyennes mensuelles** au fil des années. Les mois les plus récents, toutes saisons confondues, se situent **au-dessus de la moyenne de la période de référence 2007–2016**. Autrement dit, le réchauffement se manifeste de manière **homogène tout au long de l'année**, sans qu'un mois particulier ne compense les hausses des autres.

- Toutes les bandes mensuelles s'élèvent progressivement depuis 2010
- L'accélération devient nette à partir de **2022**, avec plusieurs mois record consécutifs
- Février 2024** apparaît comme le mois le plus chaud de toute la série, avec une anomalie supérieure à **+1,7 °C** par rapport à la période de référence



Ce pic rejoint les constats publiés par la **NASA** et le **GIEC (2023–2024)**, qui identifient ces années comme les plus chaudes jamais enregistrées depuis le début des mesures instrumentales.

4.6 Synthèse des observations

L'analyse exploratoire menée sur les séries LOTI et AIRS v7 met en évidence une convergence forte entre les différentes échelles d'observation — temporelle, spatiale et saisonnière. Les tendances globales et hémisphériques montrent un réchauffement continu depuis la fin du XIX^e siècle, avec une accélération marquée à partir des années 1970. Cette hausse est plus rapide dans l'hémisphère Nord, notamment aux hautes latitudes, où le phénomène d'amplification polaire accentue la dynamique globale.

L'étude zonale confirme cette hétérogénéité spatiale : le réchauffement est maximal dans l'Arctique, modéré dans les zones tempérées et plus lent dans les régions tropicales et australes, du fait de l'inertie thermique des océans. Les comparaisons récentes entre mesures de surface (GHCN) et observations satellitaires (AIRS) renforcent la robustesse du signal : malgré des méthodes et des instruments indépendants, les deux systèmes convergent vers la même trajectoire haussière.

Enfin, l'analyse intra-annuelle révèle que le réchauffement touche désormais toutes les saisons : les hivers sont plus doux, les étés plus chauds, et la ligne de base du cycle annuel s'élève d'année en année. Cette homogénéité de la hausse confirme que le changement climatique ne résulte pas uniquement d'extrêmes ponctuels, mais d'un glissement structurel et continu du régime thermique mondial.



DISCUSSION ET INTERPRÉTATION

1. Confirmation du réchauffement global et robustesse des données

L'analyse conjointe des séries GHCN et AIRS v7 confirment la solidité du signal climatique observé depuis la fin du XIX^e siècle. Malgré leurs différences d'origine, mesures de surface terrestre et océanique pour GHCN, et mesures satellitaires atmosphériques pour AIRS, les deux séries présentent des tendances étroitement concordantes : une hausse continue et accélérée des températures mondiales à partir des années 1980, culminant sur la période 2010–2024.

Les comparaisons croisées menées dans la section précédente (4.4) montrent que, une fois les périodes de référence harmonisées, les courbes LOTI et AIRS v7 se superposent presque parfaitement.

Cette cohérence traduit une stabilité inter-instrumentale remarquable entre :

- Le réseau terrestre GHCN et les observations marines ERSST, qui alimentent le calcul du LOTI
- Et la mesure satellitaire AIRS, qui restitue la température de la troposphère basse (environ 3 à 4 km d'altitude).

Autrement dit, le réchauffement détecté en surface s'étend à l'ensemble de la basse atmosphère : **la planète se réchauffe en profondeur**, confirmant qu'il ne s'agit pas d'un artefact de mesure mais d'une tendance physique globale.

Les écarts plus marqués observés aux extrémités de la période (2003–2005 et 2022–2024) s'expliquent par plusieurs facteurs :

- Des **ajustements de calibration** lors du passage d'AIRS v6 à la version v7, qui a corrigé des biais liés aux nuages, aux cycles diurnes et aux régions polaires
- La **variabilité naturelle** interannuelle (phases El Niño / La Niña, éruptions volcaniques) qui module temporairement la courbe globale
- Et une **consolidation progressive** des données les plus récentes (notamment 2024).

Ces fluctuations ponctuelles n'altèrent pas la tendance de fond : sur la période **2003–2024**, la pente moyenne reste **strictement positive et soutenue**, témoignant d'une accélération durable du réchauffement.

Le LOTI combine les températures de surface terrestre (GHCN) et océanique (ERSST), offrant une vision intégrée du système Terre–océan. De son côté, AIRS mesure la température de la troposphère basse, directement couplée aux échanges de chaleur avec la surface. Leur cohérence indique que

L'accumulation d'énergie se produit simultanément à ces deux niveaux, traduisant un réchauffement structurel du système climatique.

Entre la période de référence **1951–1980** et l'année **2024**, l'anomalie moyenne mondiale atteint environ **+1,2 °C**, un chiffre aligné avec les estimations du **GIEC (2023)**, de la **NASA** et de la **NOAA**. La variabilité interannuelle demeure, mais **aucun ralentissement durable** n'est observable. L'année 2024 se classe parmi les plus chaudes jamais enregistrées depuis le début des relevés instrumentaux.

Enfin, l'absence de décélération notable malgré la prise de conscience mondiale souligne la persistance des **forçages anthropiques majeurs** :

- Usage massif des énergies fossiles
- Déforestation et perte des puits de carbone,
- Croissance des usages énergivores (numérique, transport aérien, intelligence artificielle)

Sans **réduction structurelle des émissions**, la trajectoire actuelle rend hautement improbable le maintien du réchauffement sous la barre des **+1,5 à +2 °C**, objectif pourtant central des **Accords de Paris**.

2. Interprétation des contrastes régionaux

Les résultats présentés précédemment confirment que le réchauffement global n'est ni uniforme ni homogène : il varie selon les latitudes, les surfaces et les saisons. Cette section propose une lecture physique de ces contrastes, en reliant les différences observées à leurs mécanismes climatiques sous-jacents.

AMPLIFICATION POLAIRE : UN MARQUEUR DU DÉSÉQUILIBRE ÉNERGÉTIQUE

L'Arctique illustre la sensibilité extrême des hautes latitudes au réchauffement.

Les mécanismes à l'œuvre sont désormais bien établis : la diminution de l'albédo liée à la fonte de la neige et de la glace réduit la part du rayonnement solaire réfléchi vers l'espace, amplifiant localement le réchauffement.

Cette rétroaction positive s'accompagne d'un renforcement de la vapeur d'eau atmosphérique, gaz à effet de serre puissant, et d'une modification des circulations atmosphériques, notamment un affaiblissement du jet stream et des remontées d'air chaud vers les hautes latitudes.

Ces processus conjugués expliquent que l'Arctique se réchauffe environ quatre fois plus vite que la moyenne mondiale. Ils traduisent surtout un déséquilibre énergétique global : l'énergie excédentaire ne s'évacue plus efficacement vers les pôles, perturbant la dynamique planétaire.

INERTIE THERMIQUE ET LATENCE DU SUD

À l'inverse, le **ralentissement relatif du réchauffement dans l'hémisphère Sud** ne traduit pas une stabilité climatique, mais une **inertie physique** liée à la prédominance océanique. Les vastes étendues

d'eau absorbent et redistribuent la chaleur en profondeur, retardant la réponse de surface. Le courant circumpolaire antarctique et la structure stable de la troposphère australe contribuent à ce décalage temporel : le Sud « suit » le Nord, mais avec un retard d'une à deux décennies. Depuis les années 2010, les premières accélérations observées dans les océans du Sud et sur les marges antarctiques indiquent toutefois que cette inertie atteint ses limites.

Ces contrastes régionaux ne sont pas des anomalies isolées, mais les manifestations d'un **système climatique en recomposition**. L'amplification polaire modifie la circulation atmosphérique et océanique, influence la répartition des précipitations et accentue les extrêmes météorologiques dans les zones tempérées.

Autrement dit, le réchauffement global n'est pas seulement une hausse moyenne des températures, mais une redistribution de l'énergie au sein du système Terre. C'est cette redistribution, plus que la valeur absolue des températures, qui explique la multiplication des déséquilibres observés à l'échelle planétaire.

Ces contrastes régionaux, désormais bien compris, rappellent que la dynamique du réchauffement est avant tout une question d'énergie redistribuée plutôt qu'une simple élévation thermique. La section suivante propose une mise en perspective synthétique de ces constats à l'échelle globale.

3. Implications climatiques et sociétales

L'ensemble des analyses confirme un **réchauffement global d'environ +1,2 °C** depuis la période préindustrielle. Ce signal, cohérent entre les séries LOTI et AIRS, traduit un dérèglement profond et continu du système climatique. Les répercussions se manifestent déjà dans les trois grands compartiments physiques du globe.

CRYOSPHERE : UN MARQUEUR IMMÉDIAT DU RÉCHAUFFEMENT

Les zones polaires et de haute montagne réagissent de manière accélérée. La fonte des glaciers, la réduction de la banquise arctique et l'amincissement des calottes polaires diminuent l'albédo planétaire, renforçant le réchauffement par rétroaction. Ces transformations perturbent les circulations atmosphériques et accroissent la variabilité climatique dans les moyennes latitudes.

OCÉANS : ACCUMULATION ET REDISTRIBUTION DE LA CHALEUR

Les océans absorbent plus de 90 % de l'excédent d'énergie lié à l'effet de serre. Cette chaleur stockée entraîne la dilatation des masses d'eau et contribue à la montée du niveau marin. Le réchauffement des couches superficielles modifie également la circulation océanique et fragilise les écosystèmes marins, notamment par l'acidification progressive des eaux.

ATMOSPHÈRE : EXTRÊMES PLUS INTENSES ET PLUS FRÉQUENTS

Dans l'atmosphère, l'excès d'énergie se traduit par une intensification des phénomènes extrêmes : vagues de chaleur, sécheresses, précipitations intenses, incendies. Ces épisodes, amplifiés lors d'événements naturels comme El Niño, témoignent d'un climat désormais plus instable et énergétiquement surchargé.

CONSÉQUENCES HUMAINES ET TRAJECTOIRE FUTURE

Le réchauffement n'est plus une projection mais une réalité observable, affectant directement les ressources en eau, la production agricole, la santé et la sécurité des populations. Les trajectoires actuelles laissent présager un franchissement du seuil de **+1,5 °C dès les années 2030** si les émissions mondiales ne diminuent pas rapidement. La compréhension fine de ces dynamiques, appuyée sur des observations fiables telles que **GHCN/LOTI** et **AIRS**, constitue un levier essentiel pour anticiper, adapter et orienter les politiques publiques à long terme.

CONCLUSION

Ce projet avait pour objectif d'analyser, à partir des données ouvertes de la NASA (GISS et AIRS), les principales tendances du réchauffement climatique mondial depuis 1880. Les résultats obtenus valident et illustrent les constats des grandes institutions scientifiques internationales.

Principaux constats

- Le réchauffement global est confirmé, accéléré et généralisé, atteignant environ +1,2 °C par rapport à la période 1951–1980
- L'amplification polaire est nette, particulièrement dans l'Arctique
- Le cycle saisonnier montre un glissement vers des températures plus élevées toute l'année
- Les mesures de surface (LOTI/GHCN) et satellitaires (AIRS v7) présentent une cohérence remarquable, validant la robustesse inter-systèmes

Perspectives

Pour aller plus loin, plusieurs axes d'approfondissement peuvent être envisagés :

- Un affinement spatial des analyses (par région, altitude, ou type de surface) grâce à des modèles plus résolus
- Le suivi des extrêmes climatiques (pics de chaleur, précipitations intenses, anomalies de durée) pour mieux évaluer les risques concrets
- Le renforcement de la culture scientifique et des outils pédagogiques, afin de rendre les données climatiques accessibles à tous et d'encourager une lecture critique et informée

En conclusion, le travail mené illustre la puissance de la donnée pour objectiver un phénomène global et la responsabilité collective qu'elle engage.



ANNEXES

1. Correspondance des jeux de données

Élément	Source NASA	Description	Période	Référence
LOTI (Land–Ocean Temperature Index)	GISTEMP v4	Anomalies de température de surface (terre + océan) par rapport à 1951–1980	1880 – présent	Goddard Institute for Space Studies (GISS)
GHCN (Global Historical Climatology Network)	NOAA/NCEI	Observations terrestres (\approx 100 000 stations)	XIX ^e siècle – présent	NOAA / National Centers for Environmental Information
ERSST v5 (Extended Reconstructed Sea Surface Temperature)	NOAA	Observations océaniques de surface, intégrées dans LOTI	1854 – présent	NOAA
AIRS v7 (Atmospheric Infrared Sounder)	NASA JPL	Températures atmosphériques (troposphère basse) calculées à partir des observations infrarouges	2002 – présent	Jet Propulsion Laboratory (NASA)

2. Extraits de code Python

Les traitements préliminaires et les analyses statistiques ont été réalisés en Python 3.12, à l'aide des bibliothèques pandas, numpy, matplotlib, et seaborn.

3. Extraits Power BI

Les visualisations interactives (cartes, heatmaps, animation temporelle) ont été construites à partir des CSV nettoyés. Principaux visuels :

- **Heatmap zonale (LOTI)** : évolution des anomalies selon la latitude.
- **Courbe comparative AIRS vs LOTI (2003–2024)** : validation croisée.
- **Graphique d'amplitude annuelle** : différence max–min par année.
- **Animation mensuelle (AIRS v7)** : évolution du cycle saisonnier.

Les visualisations ont été intégrées dans Power BI Desktop via le connecteur CSV (mise à jour manuelle, sans API). Les filtres principaux portent sur la période, la latitude et le type de source (terre/océan).

Pour être plus précis sur le filtre des zones et comprendre plus précisément à quelles zones géographiques nous faisons référence, voici un tableau de correspondance entre le nom que nous avons donné aux différentes zones du filtre et les latitudes concernées :

Nom de la Zone dans le filtre	Plage de latitude correspondante
Moyenne Mondiale	90N – 90S
Hémisphère Nord	90N – Équateur
Hémisphère Sud	Équateur – 90S
Ensemble Hémisphère Nord	90N – 24N
Équatoriale (Tropiques)	24N – 24S
Ensemble Hémisphère Sud	24S – 90S
Arctique	90N – 64N
Latitudes Nord tempérées	64N – 44N
Latitudes moyennes Nord	44N – 24N
Tropiques Nord	24N – Équateur
Tropiques Sud	Équateur – 24S
Latitudes Sud tempérées	24S – 44S
Subpolaire Sud	44S – 64S
Antarctique	64S – 90S

4. Bibliographie

- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2023). *Sixth Assessment Report (AR6): Synthesis Report*. Geneva: IPCC.
- NASA Goddard Institute for Space Studies. (2024). *GISTEMP v4: Global Land-Ocean Temperature Index (LOTI)*. Retrieved from <https://data.giss.nasa.gov/gistemp/>

- NASA Jet Propulsion Laboratory. (2024). *AIRS v7: Atmospheric Infrared Sounder Level 3 Monthly Data*. Retrieved from <https://airs.jpl.nasa.gov/>
- NOAA National Centers for Environmental Information. (2023). *Global Historical Climatology Network (GHCN)*. Retrieved from <https://www.ncdc.noaa.gov/>
- NOAA. (2023). *ERSST v5: Extended Reconstructed Sea Surface Temperature Dataset*. Retrieved from <https://www.ncdc.noaa.gov/data/>
- World Meteorological Organization. (2023). *State of the Global Climate 2023*. Geneva: WMO.
- IPCC. (2018). *Global Warming of 1.5°C – Summary for Policymakers*. Geneva: IPCC.
- NASA. (2024, March). *Earth Observatory: February 2024 – Warmest Month on Record*. Retrieved from <https://earthobservatory.nasa.gov/>