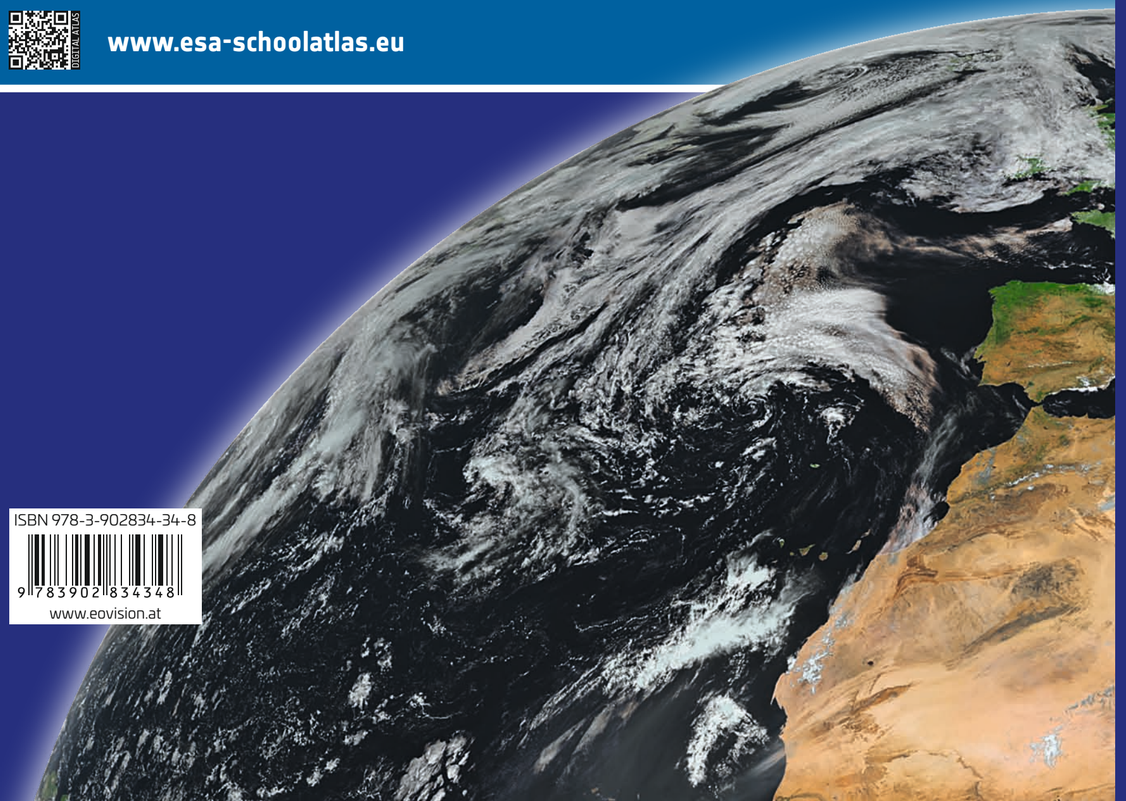
Les satellites d'observation de la Terre sont devenus l'un des outils les plus importants pour surveiller l'état de notre planète. Parmi les missions de l'Agence spatiale européenne, la télédétection par satellite est devenue un élément clé qui fournit non seulement aux sociétés européennes des informations inestimables sur leur environnement et son développement.

Avec l'Atlas scolaire de l'ESA, eoVision et l'ESA poursuivent une longue histoire de coopération en fournissant aux enseignants et aux élèves de l'enseignement secondaire un matériel pédagogique actualisé présentant l'utilisation des données satellitaires et exploitant l'énorme potentiel de l'observation de la Terre pour répondre aux grands défis de notre temps.

L'Atlas scolaire de l'ESA se compose de cet atlas imprimé et d'une version en ligne supplémentaire qui fournit une multitude d'études de cas sur une grande variété de thèmes :

www.esa-schoolatlas.eu

ISBN 978-3-902834-34-8
www.eovision.at



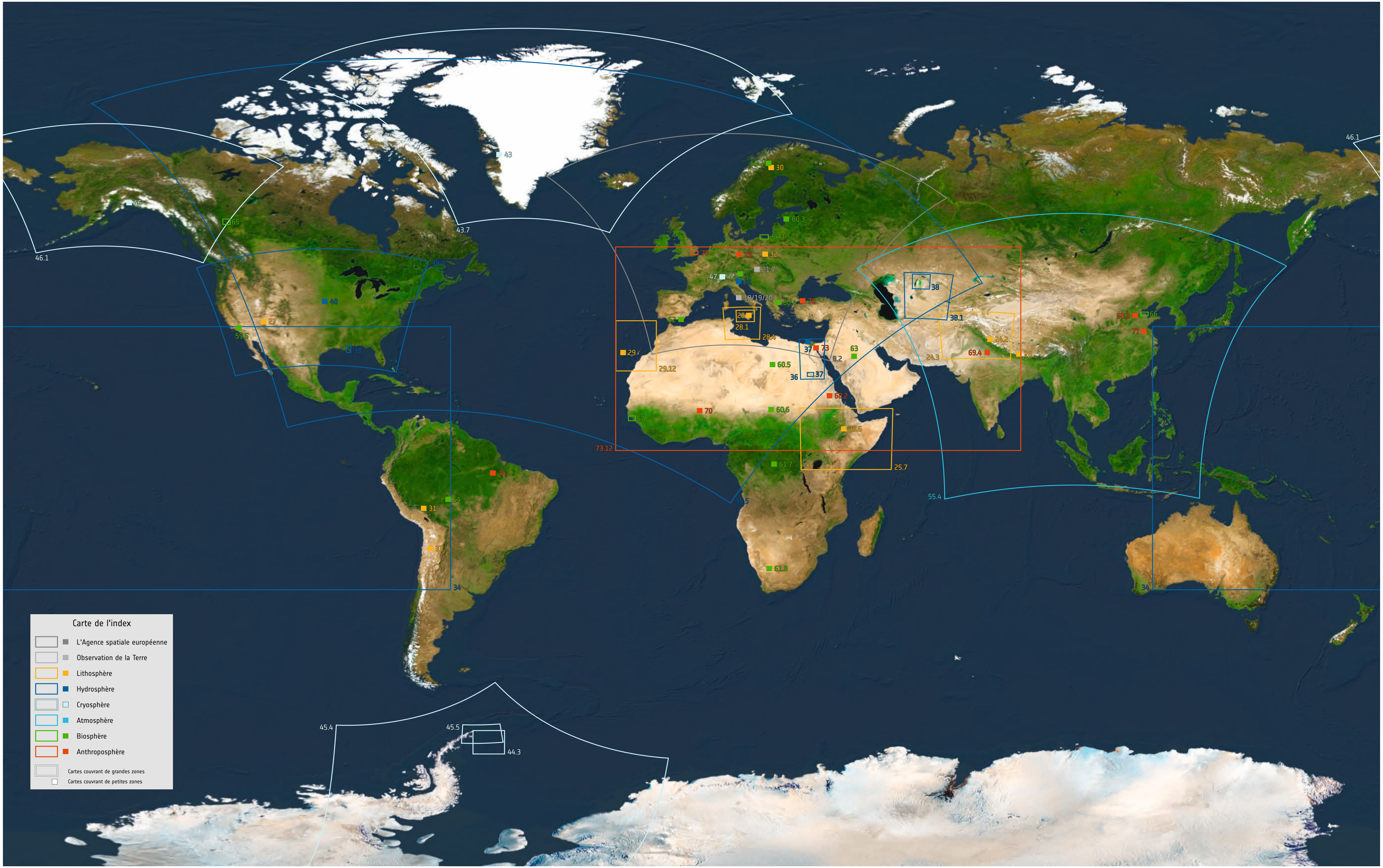
ATLAS SCOLAIRE DE L'ESA La Terre vue de l'espace

eoVision MEDIA

L'AGENCE SPATIALE EUROPÉENE

ATLAS SCOLAIRE DE L'ESA

La Terre vue de l'espace



Carte de l'index
L'Agence spatiale européenne
Observation de la Terre
Lithosphère
Hydrosphère
Cryosphère
Atmosphère
Biosphère
Anthroposphère
Cartes couvrant de grandes zones
Cartes couvrant de petites zones

ATLAS SCOLAIRE DE L'ESA

La Terre vue de l'espace

ATLAS SCOLAIRE DE L'ESA

La Terre vue de l'espace

1. Édition de l'Atlas 2024

© 2024 eoVision GmbH
Franz-Josef-Strasse 19
5020 Salzburg, Autriche
Tél.: +43 662 243217
office@eovision.at
www.eovision.at

Coordination
Markus Eisl

Édition d'images
Markus Eisl, Gerald Mansberger

Idée et concept
Markus Eisl, Gerald Mansberger

Éditeur
Markus Eisl

Mise en page
eoVision, Salzbourg

Imprimé en l'Union européenne

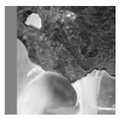
ISBN: 978-3-902834-34-8

Contenu

Préface 6

Utiliser l'Atlas 7

Objectifs de développement durable (ODD) 7



L'Agence spatiale européenne 8

l'ESA — L'Agence spatiale européenne 8

l'ESA — Établissements 9

Sciences spatiales 10

Vol spatial
- Les lanceurs 11
- Vol spatial habité 11

Observation de la Terre 12

Programme d'éducation 13

Copernicus
- Surveillance de l'état de la Terre 14
- Services d'information Copernicus 14
- La flotte de satellites Sentinel 15

Observation de la Terre 16

Types de satellites 16

Orbites de satellites 17

Satellites optiques 18

Satellites radar 19

Intérpretation des données — Indices 20

Des données satellitaires aux cartes 21

Vues satellitaires globales 22

Lithosphère 24

Tectonique globale
- Plaques tectoniques 24
- Montagnes plissées — Himalaya 24
- Vallées du rift — Vallée du rift est-africain 25

Paysages façonnés par l'érosion
- Érosion glaciaire — Himalayas 26
- Érosion fluviale — le Grand Canyon 27

Volcanisme
- Mont Etna 28
- La Palma 29

Exploitation minière
- Mine de cuivre — Aitik 30
- Extraction d'or — Madre de Dios 31
- Mine de charbon — Bełchatów 32
- Extraction de lithium — Salar de Atacama 33

Hydrosphère 34

Témperature de surface de la mer
- Témperature de surface de la mer globale 34
- El Niño et La Niña 34
- Gulf Stream et courant de l'Atlantique Nord 35

Systèmes de masses d'eau
- Le fleuve Nil 36
- Mer d'Aral 38
- Delta du Mississippi 39

Inundations et protection contre les crues
- Inundation — Plattsmouth 40
- Protection contre les crues — Venice 41

Contenu

Cryosphère 42

Arctique
- Glace de mer arctique 42
- Calotte glaciaire du Groenland 43

Antarctique
- Calotte et plate-forme glaciaire 44
- Iceberg A23a en mouvement 45

Glaciers
- Glacier Columbia 46
- Glacier d'Aletsch 47

Atmosphère 48

Températures et anomalies 48

Nuages et précipitations
- Distribution des précipitations 50
- Formation des nuages et précipitations 50
- Diagrammes climatiques 51

Saisons et heures du jour
- La Terre en lumière visible 52
- La Terre en lumière infrarouge 53

Gaz à l'état de traces
- Oxyde nitreux (NO_2) 54
- Dioxyde de carbone (CO_2) 54
- Méthane (CH_4) 55
- Ozone (O_3) — le trou d'ozone antactique 55

Zones climatiques 56

Biosphère 58

Distribution de la biomasse
- La vie dans l'eau 58
- Végétation terrestre 59

Couverture des sols et utilisation des terres 60

Agriculture et irrigation
- Agriculture sous serre — El Ejido 62
- Agriculture irriguée — Ha'il 63

Forêts et déforestation
- Déforestation — Rondônia 64
- Incendies de forêt — Colombie-Britannique 65

Aquaculture 66

Protection de la nature
- Parc national marin — Ilha de Orango 67
- Parc national alpin — Hohe Tauern 67

Anthroposphère 68

Répartition de la population 68

Urbanisation et développement urbain
- Urbanisation — Niamey 70
- Développement urbain — Suqian 71

Infrastructures de transport
- Trafic aérien — Nouvel aéroport d'Istanbul 72
- Transport maritime — Canal de Suez 73

Énergies renouvelables
- Hydroélectricité — Barrage de Belo Monte 74
- Parc éolien offshore — L'estuaire de la Tamise 75
- Énergie solaire — Böhlen 75

Glossaire 76

Indice géographique 79

Sources d'images et de données 80

La Terre vue de l'Espace

Les satellites d'observation de la Terre — ou de télédétection — ont changé la donne en nous aidant à mieux comprendre les complexités de notre planète tout en répondant aux défis auxquels nous sommes confrontés en matière d'environnement, de changement climatique et de développement durable. Les données satellitaires ne sont pas seulement utilisées pour répondre à des questions cruciales en matière de sciences de la Terre, mais aussi pour établir des prévisions météorologiques, aider à réagir en cas de catastrophe et fournir des informations essentielles pour optimiser les pratiques agricoles, la gestion de l'eau et l'implantation de centrales d'énergie renouvelable.

Les données satellitaires constituent désormais la base d'une prise de décision fondée sur des preuves et d'innombrables applications quotidiennes. L'Agence spatiale européenne (ESA), leader mondial de l'observation de la Terre, a pour mission de favoriser le développement de technologies spatiales de pointe nécessaires pour mieux comprendre la planète, améliorer la vie quotidienne des citoyens et soutenir l'élaboration de politiques efficaces pour un avenir plus durable, tout en profitant aux entreprises et aux économies du monde entier.

Les systèmes spatiaux ont connu des avancées significatives ces dernières années, sous l'impulsion de l'innovation technologique et de la demande croissante de données précises, opportunes et complètes sur notre planète. Ces innovations couvrent différents domaines, notamment la technologie des satellites, le traitement des données et le partage de l'information. Copernicus, le premier système d'observation de la Terre au monde et un élément clé du programme spatial de l'Union européenne, est le résultat d'un grand nombre de ces avancées.

Copernicus fournit des informations précises, opportunes et facilement accessibles, disponibles gratuitement pour un large éventail de services opérationnels et d'utilisateurs, ce qui permet d'améliorer la gestion de l'environnement, de comprendre et d'atténuer les effets du changement climatique et de garantir la sécurité civile.

En complément de Copernicus, le développement de missions scientifiques sophistiquées et de satellites d'imagerie à haute résolution équipés de capteurs avancés capables de capturer des images de la surface de la Terre d'une clarté et d'une précision sans précédent a donné naissance à de multiples nouvelles applications telles que la planification urbaine et la surveillance des cultures, tout en contribuant à une meilleure compréhension des systèmes terrestres.

Afin de favoriser une large utilisation des données satellitaires et de sensibiliser les citoyens, l'ESA a développé un large éventail de ressources et d'activités visant à informer les enseignants et les étudiants sur l'observation de la Terre en leur fournissant un accès facile à du matériel pouvant être utilisé en cours. Dans le cadre de ces activités, le premier Atlas scolaire de l'ESA a été publié en 2005. Aujourd'hui, plus de 15 ans plus tard, cet atlas mis à jour — la prochaine génération — est en cours de publication et permettra au grand public d'en apprendre davantage sur le potentiel des cartes numériques et des plateformes en ligne qui fournissent l'information.

J'espère sincèrement que les lecteurs et les utilisateurs de cet atlas scolaire auront envie d'en savoir plus sur l'observation de la Terre par satellite et de poursuivre des études et des formations sur l'utilisation de ces données vraiment remarquables et précieuses.

Simonetta Cheli
Directrice des programmes d'observation de la Terre
Agence spatiale européenne

Utiliser l'atlas scolaire

L'atlas scolaire de l'ESA se compose de deux éléments : cet atlas imprimé et un atlas numérique, une collection de documents accessibles en ligne via l'URL

www.schoolatlas.esa.int.

Cet atlas imprimé contient une sélection de documents de synthèse et d'études de cas qui permettent un accès hors ligne à des aspects importants de l'observation de la Terre, ainsi qu'une sélection de quelques études de cas mettant en évidence l'application des techniques d'observation de la Terre.

Structure de l'atlas

L'atlas est structuré selon le modèle des sphères géophysiques comprenant la lithosphère, l'hydrosphère, la cryosphère, l'atmosphère et la biosphère. En raison de la complexité de notre monde et de l'importance spécifique de l'empreinte humaine et du changement climatique, un chapitre couvrant l'anthroposphère a été ajouté. En outre, des chapitres distincts fournissent des informations générales sur l'Agence spatiale européenne et ses activités, et décrivent des questions fondamentales concernant les principes et l'application des outils d'observation de la Terre.

Afin de faciliter le passage à la version en ligne du matériel, des codes QR ont été ajoutés. Les codes QR encodent l'URL des pages correspondantes du site web de l'atlas de l'école.

Notre monde est devenu extrêmement complexe et impliqué. Les phénomènes à tous les niveaux sont devenus interdépendants et s'influencent mutuellement. Dans ce contexte, les Nations unies ont élaboré les objectifs de développement durable (ODD), qui permettent à la fois de classer les phénomènes sur Terre et d'aborder des domaines d'activité importants, ce qui facilite la définition et le respect des priorités. Ce cadre très utile, de plus en plus utilisé, a été intégré dans l'atlas. Les icônes indiquant les ODD pertinents ont été ajoutées aux études de cas respectives, ce qui permet aux enseignants et aux étudiants de vérifier plus facilement la pertinence des études de cas pour leur tâche éducative particulière.

Objectifs de développement durable des Nations unies

Créés en 2016, les objectifs de développement durable (ODD) des Nations unies constituent un cadre global pour relever les défis mondiaux, de la pauvreté et de la faim à l'action climatique et à la conservation de la biodiversité. L'observation de la Terre joue un rôle important dans la réalisation de ces objectifs en fournissant des données et des informations essentielles.

Quelques exemples peuvent l'illustrer. Le suivi et l'évaluation des changements de la couverture terrestre, de la productivité agricole et des ressources en eau grâce aux satellites contribuent à la réalisation d'objectifs de développement durable tels que la faim zéro, l'eau propre et l'assainissement, et la vie sur terre. Les données d'observation de la Terre facilitent la gestion des catastrophes et soutiennent l'objectif de développement durable n° 11 (Villes et communautés durables) en fournissant des informations en temps réel en cas d'urgence. L'observation de la Terre joue également un rôle crucial dans la surveillance du climat (ODD 13 — Action pour le climat) en mesurant les concentrations de gaz à effet de serre, l'élévation du niveau de la mer et les anomalies de température. En outre, l'imagerie satellitaire aide à cartographier l'expansion urbaine, soutenant ainsi la planification urbaine durable (ODD 11). Les efforts de conservation de la biodiversité (ODD 15 - Vie sur terre) bénéficient de l'observation de la Terre en surveillant les écosystèmes, la déforestation et les habitats de la faune et de la flore.

L'ESA

- Allemagne
- Autriche
- Belgique
- Danemark
- Espagne
- Estonie
- Finlande
- France
- Grèce
- Hongrie
- Irlande
- Italie
- La Suisse
- Luxembourg
- Norvège
- Pays-Bas
- Pologne
- Portugal
- République Tchèque
- Roumanie
- Royaume-Uni
- Slovénie
- Suède

1. États membres de l'Agence spatiale européenne (ESA).

2. États membres, pays coopérants et installations de l'ESA.

L'Agence spatiale européenne

L'Agence spatiale européenne (ESA) a été fondée en 1975. Elle a pour mission d'orienter le développement des capacités spatiales de l'Europe et de veiller à ce que les investissements dans l'espace continuent de profiter aux citoyens européens. L'ESA compte aujourd'hui 22 États membres. En coordonnant les ressources financières et intellectuelles de ses membres, elle peut entreprendre des programmes et des activités qui dépassent de loin le champ d'action d'un seul pays européen.

Depuis plus de quarante ans, les États membres de l'ESA travaillent ensemble et mettent en commun leurs ressources pour ouvrir de nouvelles voies dans l'exploration spatiale, développer des technologies de pointe et construire une industrie compétitive capable d'affronter la concurrence mondiale.

Les programmes de l'ESA dans les domaines de la science, des lanceurs, des télécommunications, de l'observation de la Terre et des vols spatiaux habités ont démontré un haut niveau de compétence et ont déjà apporté de nombreux avantages dans la vie de tous les jours. Tout en travaillant sur ses propres projets indépendants, l'ESA coopère régulièrement avec d'autres agences et institutions aux États-Unis, en Russie, au Canada, au Japon et en Chine.

Une vision européenne

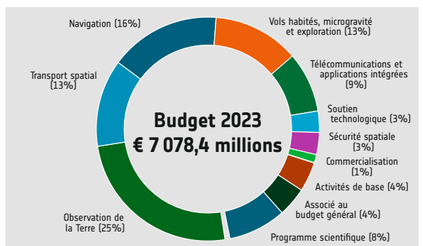
L'idée de créer une organisation spatiale indépendante en Europe remonte au début des années 1960, lorsque six pays européens (Allemagne, Belgique, France, Italie, Pays-Bas et Royaume-Uni), associés à l'Australie, ont formé l'ELDO (European Launcher Development Organisation) pour développer et construire un lanceur lourd appelé Europa. En 1962, les mêmes pays ainsi que le Danemark, l'Espagne, la Suède et la Suisse ont créé l'ESRO (Organisation européenne de recherche spatiale) pour entreprendre des programmes de satellites scientifiques et couvrir tous les types d'activités spatiales, des satellites de télécommunication aux lanceurs, qui ont été proposés au niveau national.

En 1975, une convention a été approuvée au niveau politique pour créer l'Agence spatiale européenne (ASE). La même année, l'Irlande est devenue membre de l'ESA et, en 1979, le premier d'une série d'accords de coopération a été signé pour permettre au Canada de participer à certains programmes de l'ESA et de siéger au Conseil de l'ESA. La convention est entrée en vigueur le 31 octobre 1980. Depuis lors, les membres fondateurs ont été rejoints par treize pays européens supplémentaires. Outre les membres réguliers, la Lettonie, la Lituanie, la Slovaquie et la Slovénie ont rejoint l'ESA en tant que membres à part entière.

En tant qu'institution européenne importante, l'ESA coopère étroitement avec la Commission européenne et des institutions telles que l'Agence européenne pour l'environnement (AEE) et EUMETSAT.

Les activités de l'ESA

Conformément à la stratégie définie par l'ESA, ses activités couvrent un large éventail de domaines divers, tous liés à la recherche et à l'utilisation de l'espace.
Les activités les plus importantes sont les suivantes :
- Observation de la Terre
- Exploration humaine et robotique
- Lanceurs
- Navigation
- Sciences de l'espace
- Ingénierie et technologie spatiales
- Opérations
- Télécommunications et applications intégrées
- Préparer l'avenir
- L'espace au service du climat.



3. Deux tiers du budget de l'ESA sont consacrés à l'observation de la Terre, à la navigation, au transport spatial et aux vols habités.

4- ESRIN, Frascati, Italie.

5. ECSAT, Harwell, Royaume-Uni.

6. ESOC, Darmstadt, Allemagne.

7. ESTEC, Nordwijk, Pays-Bas.

8- ESEC, Redu, Belgique.

Siège de l'ESA — Le directeur général et son cabinet ont leurs bureaux au siège situé à Paris, en France. Il s'agit du centre administratif de l'organisation, qui comprend les principaux bureaux du personnel, des affaires juridiques, des finances, de la stratégie, des relations internationales et de la communication.

ESA ESTEC — Le Centre européen de recherche et de technologie spatiales, situé à Noordwijk, aux Pays-Bas, est le plus grand établissement de l'ESA, un centre d'essai et une plaque tournante pour les activités spatiales européennes. Il est responsable de la préparation technique et de la gestion des projets spatiaux de l'ESA et fournit un soutien technique aux activités spatiales.
ESA ESOC — Le Centre européen d'opérations spatiales, situé à Darmstadt, en Allemagne, assure le bon fonctionnement des engins spatiaux en orbite. Relié à des stations terrestres dans le monde entier, il suit et contrôle les satellites, et effectue des opérations sur les charges utiles et la surveillance des systèmes.
ESA ESRIN — Le centre d'observation de la Terre de l'ESA à Frascati, près de Rome en Italie, gère le segment terrestre des satellites d'observation de la Terre de l'ESA et de tiers. Il gère les plus grandes archives de données environnementales en Europe et coordonne plus de 20 stations terrestres et installations du segment terrestre en Europe.
ESA EAC — Le Centre des astronautes européens de Cologne, en Allemagne, est un centre d'entraînement et la base d'attache de tous les astronautes européens. C'est un centre d'excellence pour la formation des astronautes et le soutien médical.
ESA ESAC — Le Centre européen d'astronomie spatiale de Villafranca de la Cañada, en Espagne, héberge les centres d'opérations scientifiques des missions astronomiques et planétaires de l'ESA ainsi que leurs archives. Il fournit des services aux projets de recherche astronomique dans le monde entier.
Le **port spatial de l'Europe**, en Guyane française, est la porte d'entrée de l'Europe dans l'espace. D'une superficie de plus de 96 000 hectares, il est idéalement situé pour le lancement de satellites, notamment en raison de sa proximité avec l'équateur. L'ESA est propriétaire des installations de lancement et de production de lanceurs.
ESA ESEC — Le Centre européen d'éducation et de sécurité spatiale, situé à Redu, en Belgique, est un centre d'excellence pour les services de cybersécurité spatiale. Il abrite le Centre de données de météorologie spatiale, le Centre de formation de l'ESA dédié à la formation des enseignants et des étudiants dans le cadre du programme d'éducation de l'ESA, et une partie du réseau de stations au sol de l'ESTEC.
ESA ECSAT — Le Centre européen pour les applications spatiales et les télécommunications, situé à Harwell, au Royaume-Uni, soutient les activités liées aux télécommunications, aux applications intégrées, au changement climatique, à la technologie et à la science.

9. Siège de l'ESA à Paris, France.

10. Port spatial européen, Kourou, Guyane française.

11. EAC, Cologne, Allemagne.

12. ESAC, Villafranca, Espagne.

L'ESA

1. Sélection de missions de sciences spatiales de l'ESA pour les sciences planétaires et l'astrophysique.

Missions de sciences planétaires
[2024] Hera
[2023] Juice
[2018] BepiColombo
[2016] ExoMars TGO & Schiaparelli
[2004] Rosetta
[2005] Venus Express
[2003] Mars Express
[2003] Double Star
[2003] SMART-1
[2000] Cluster
[1997] Cassini-Huygens
[1985] Giotto

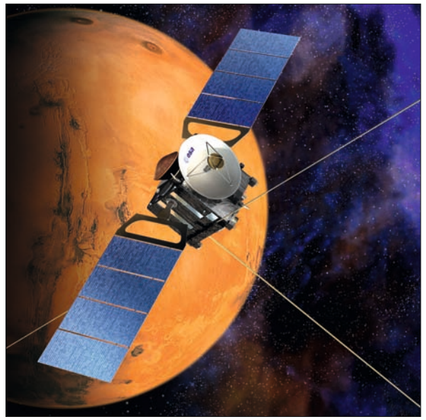
Missions astrophysiques
[2021] JWST
[2019] CHEOPS
[2013] Gaia
[2009] Planck
[2009] Herschel
[2002] INTEGRAL
[1999] XMM-Newton
[1995] ISO
[1990] Hubble
[1989] Hipparcos
[1983] EXOSAT
[1978] IUE
[1975] Cos-B

Exploration du système solaire

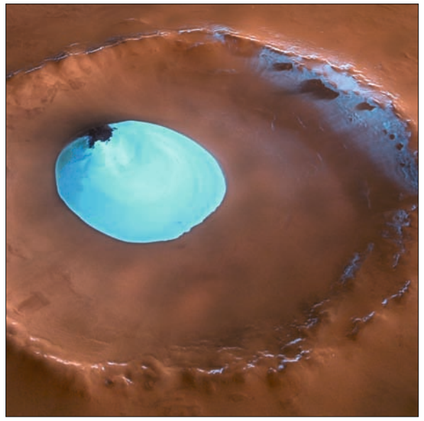
Les sciences spatiales abordent certaines des questions scientifiques les plus fondamentales de l'humanité, telles que la formation de notre Terre, les raisons pour lesquelles elle offre l'environnement nécessaire à notre existence et l'existence d'autres endroits dans l'univers où la vie existe. La science planétaire s'intéresse à notre système solaire. À l'origine, elle se faisait uniquement à l'aide de télescopes, mais la technologie spatiale permet aujourd'hui de voyager vers le Soleil, les planètes et d'autres objets de notre système solaire. Outre les missions d'acquisition de données au passage ou en orbite autour de ces objets, un certain nombre d'explorateurs se sont posés sur certains d'entre eux. En outre, des rovers ont parcouru la Lune et Mars. Les informations recueillies par les missions scientifiques planétaires permettent non seulement de comprendre les autres planètes du système solaire, mais aussi de mieux comprendre l'évolution du système terrestre, par exemple en ce qui concerne le changement climatique.

Vers les frontières de l'Univers

D'autres missions de l'ESA visent des cibles situées bien au-delà du système solaire. La lumière qui nous parvient d'une distance de plusieurs milliards d'années-lumière est utilisée pour étudier les conditions de l'univers primitif, par exemple par le télescope spatial James Webb (JWST). Un aperçu de l'époque où l'univers n'avait que 380 000 ans a été obtenu grâce à la mission Planck, qui a mesuré le fond diffus cosmologique (CMB, *cosmic microwave background*) avec une précision sans précédent.
Ces missions à la limite de ce qui est technologiquement possible sont très coûteuses. Par conséquent, une partie d'entre elles est réalisée en coopération avec d'autres organisations spatiales. Le télescope spatial Hubble (HST) et le JWST, qui ont été développés et sont exploités en coopération avec l'agence spatiale américaine NASA, en sont des exemples.

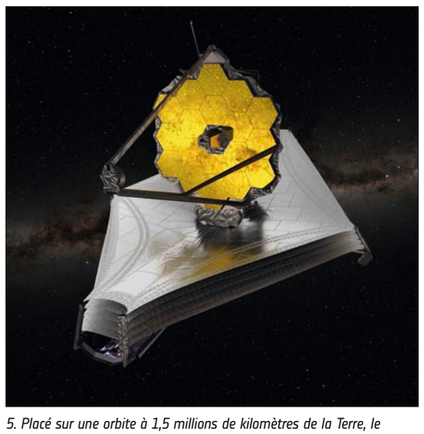


2. Lancée en 2003, Mars Express est l'une des missions les plus réussies vers notre planète voisine.



3. Glace d'eau résiduelle dans le cratère Vastitas Borealis. Les données de Mars Express ont changé notre vision de l'existence et de la quantité d'eau sur la planète.

4. Les données combinées prises par les télescopes spatiaux Hubble et James Webb offrent des vues sans précédent de l'espace lointain, comme cet amas de centaines de galaxies.



5. Placé sur une orbite à 1,5 millions de kilomètres de la Terre, le télescope spatial James Webb est équipé d'un miroir primaire de 6,5 mètres de diamètre. Il est protégé du rayonnement solaire par un ensemble d'écrans d'environ 21 x 14 mètres.

Les lanceurs

Les satellites et les vols spatiaux habités reposent sur des technologies qui leur permettent d'atteindre leurs « lieux de travail » dans l'espace. Grâce au programme de lanceurs Ariane, l'ESA a fourni à l'Europe un accès autonome à l'espace, une clé stratégique pour le développement de toutes les applications spatiales. Développée à l'origine pour l'indépendance européenne, la famille de lanceurs Ariane est devenue le succès commercial spatial européen le plus spectaculaire par le volume d'activité et la part du marché mondial. Elle est devenue un facteur essentiel de la crédibilité de l'Europe en tant que puissance spatiale.
Les activités de l'Europe dans ce domaine bénéficient de la base de lancement la mieux placée et la plus efficace au monde, près de Kourou, en Guyane française, en Amérique du Sud.

Arianespace, la société internationale créée pour commercialiser le lanceur européen, s'est assurée plus de la moitié du marché mondial du lancement de satellites de communication commerciaux sur l'orbite de transfert géostationnaire. Alors que l'ESA continue de financer des améliorations d'Ariane et d'un petit lanceur appelé Vega, l'Agence est également attentive à des possibilités plus radicales à long terme, telles que des lanceurs réutilisables.

Ariane 5 et 6 : Le lanceur lourd Ariane 5 a été conçu par l'ESA pour permettre à l'Europe de conserver son avantage concurrentiel sur le marché mondial des lanceurs. Il a remplacé la série Ariane 4, qui a connu un grand succès, et a effectué environ cinq missions par an. La mission principale d'Ariane 5 est de placer des satellites en orbite géostationnaire. Sa polyvalence lui permet de répondre à un large éventail de besoins de lancement, notamment le déploiement de constellations de satellites, l'exploration des planètes de notre système solaire et la mise en orbite de cargaisons pour la station spatiale. La version ECA d'Ariane 5 transporte en orbite des charges utiles pouvant atteindre 10 tonnes.
Ariane 6 a été développée pour succéder à Ariane 5 avec pour objectif principal de réduire de manière significative le coût du lancement. Le premier lancement a eu lieu le 9 juillet 2024.

Vega : En 2012, un nouveau petit lanceur européen appelé Vega a effectué son premier vol. Vega a été conçu pour placer principalement des satellites scientifiques et d'observation de la Terre pesant jusqu'à 2500 kg sur des orbites polaires et basses.

Vol spatial habité

La Station spatiale internationale (ISS), la plus grande coopération technique jamais réalisée en temps de paix, est un puissant laboratoire scientifique, un banc d'essai pour les technologies futures et une installation pour la recherche médicale, biologique, physique et matérielle de pointe dans l'environnement particulier de l'espace. L'Europe détient une part substantielle de l'ISS et les principales contributions matérielles de l'ESA sont Columbus, un laboratoire scientifique et technologique polyvalent, et le véhicule de transfert automatisé (ATV). Des astronautes européens effectuent des visites régulières pendant la phase de construction et font partie de l'équipage de longue durée de l'ISS, qui est habitée en permanence depuis la fin de l'année 2000.

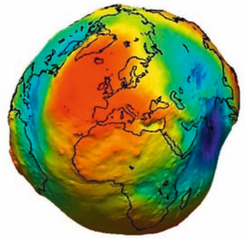
6. Décollage d'Ariane 5 depuis Kourou..

7. Comparaison des tailles de Vega, Vega-C, Ariane 5 ECA, Ariane 62 et Ariane 64 (de gauche à droite).

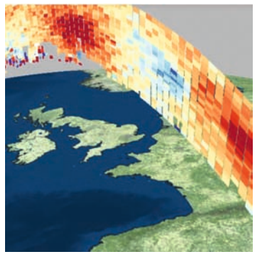
Recherche et développement

L'ISS offre une possibilité unique d'étudier l'influence de la gravité sur les processus biologiques, physiques et chimiques. L'absence effective de gravité à bord de la station spatiale permet de mieux comprendre la santé humaine, la prévention et le traitement des maladies.

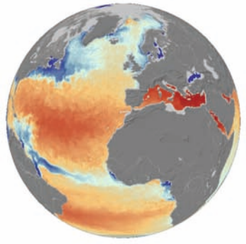
8. Sortie dans l'espace de l'astronaute de l'ESA Luca Parmitano lors d'une mission à bord de l'ISS.



1. GOCE a fourni des informations sur le champ de gravité de la Terre (du bleu au rouge : à la gravité plus élevée).

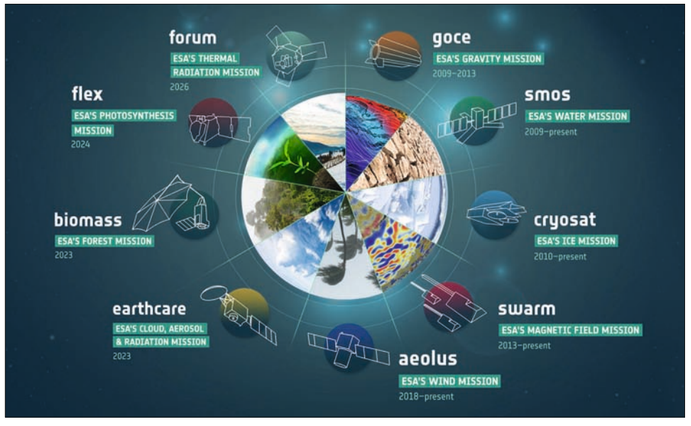


2. Aeolus mesure la vitesse du vent à différentes altitudes (du bleu au rouge : à la vitesse du vent plus élevée).



3. SMOS mesure la salinité des océans et la teneur en eau des sols (du bleu au rouge : à concentration en sel plus élevée).

4. Les satellites Earth Explorer sont des plateformes pour le développement d'outils d'observation de la Terre.



Recherche en observation de la Terre

Depuis sa création, la recherche a joué un rôle clé pour l'Agence spatiale européenne (ESA). Cela vaut non seulement pour l'exploration du système solaire et les sciences spatiales, mais aussi pour les activités de recherche de l'ESA, qui se concentrent tout particulièrement sur l'observation de la Terre.

Dans ce contexte, l'ESA est activement impliquée dans les domaines de la technologie des satellites et des capteurs, ainsi que dans le développement de méthodes d'analyse de données et d'applications d'observation de la Terre. De nombreux projets de recherche ont été menés à bien, couvrant un large éventail de questions importantes sur le plan scientifique.

Les premiers satellites d'observation de la Terre de l'ESA ont été les satellites radar ERS-1 et ERS-2, lancés respectivement en 1991 et 1995. L'énorme valeur scientifique de ces missions se reflète dans le fait qu'elles ont servi de base à environ 5 000 projets de recherche qui ont donné lieu à quelque 4 000 publications.

En 2002, le lancement du satellite Envisat a marqué un tournant dans l'histoire de l'observation de la Terre. Opérationnel jusqu'en 2012, ce satellite de la taille d'un bus pesait plus de 8 tonnes, ce qui en faisait le plus gros satellite d'observation de la Terre jamais construit. Envisat était un laboratoire de recherche en orbite à 800 km au-dessus de la surface de la Terre. De nombreuses technologies de capteurs et de traitement des données ont été testées quant à leur applicabilité dans les services opérationnels.

Explorateurs de la Terre

GOCE (2009-2013) — La mission GOCE *(Gravity field and steady state Ocean Circulation Explorer)* a fourni des données permettant de déterminer des modèles globaux et régionaux de la gravité et du géoïde de la Terre. Ces données font progresser la recherche dans les domaines de la circulation océanique, de la physique de l'intérieur de la Terre, de la géodésie et de la topographie, ainsi que de l'évolution du niveau de la mer.

SMOS (lancé en 2009) : La mission SMOS *(Soil Moisture and Ocean Salinity)* effectue des observations mondiales de l'humidité des sols et de la salinité des océans. En cartographiant ces deux variables, SMOS nous aide à comprendre les processus d'échange entre la surface de la Terre et l'atmosphère et contribue à améliorer les modèles météorologiques et climatiques.

CryoSat (lancé en 2010) : La mission CryoSat surveille les changements à l'échelle centimétrique de l'épaisseur de la glace flottant dans les océans et des couches de glace recouvrant le Groenland et l'Antarctique. Cela permet de comprendre l'évolution du volume des glaces terrestres et l'interaction entre les glaces et le climat.

Swarm (lancé en 2013) : Swarm est une constellation de trois satellites destinés à mesurer avec précision les signaux magnétiques provenant de la magnétosphère, de l'ionosphère, du noyau, du manteau et de la croûte terrestres, ainsi que des océans. Ces mesures permettront de mieux comprendre les processus qui régissent la « dynamo » de la Terre.

Aeolus (2018-2023) : La mission Aeolus a permis de progresser dans l'observation des profils de vent à l'échelle mondiale et a fourni des informations permettant d'améliorer les prévisions météorologiques. En faisant la démonstration d'une nouvelle technologie laser, Aeolus a ouvert la voie à la future mission météorologique opérationnelle consacrée à la mesure des champs de vent de la Terre.

EarthCARE (lancé en 2024) : La mission EarthCARE *(Earth Clouds Aerosols and Radiation Explorer)* est une mission euro-japonaise visant à améliorer la représentation et la compréhension de l'équilibre radiatif de la Terre dans les modèles climatiques et les modèles numériques de prévisions météorologiques.

Biomass (lancement prévu en 2025) : La mission Biomass fournira des informations sur l'état de nos forêts et leur évolution. Les données seront utilisées pour améliorer notre connaissance du rôle des forêts dans le cycle du carbone.

FLEX (lancement prévu en 2025) : L'explorateur de fluorescence (FLEX) cartographiera la fluorescence de la végétation pour quantifier l'activité photosynthétique. Cela nous permettra de mieux comprendre comment la photosynthèse affecte les cycles du carbone et de l'eau.

FORUM (lancement prévu en 2027) : La mission infrarouge FORUM *(Far-infrared Outgoing Radiation Understanding and Monitoring)* permettra de mieux comprendre le bilan radiatif de la planète et donc d'améliorer les modèles climatiques.

Harmony (lancement prévu en 2029) : En tandem avec les satellites Sentinel-1, Harmony fournira un large éventail d'observations à haute résolution des mouvements se produisant à la surface de la Terre ou à proximité, ce qui permettra d'obtenir des informations sur les océans, les glaces, les tremblements de terre et les volcans.

Programme d'éducation de l'ESA

Dans la Convention de l'ESA, le programme d'éducation de l'ESA est une activité obligatoire. L'éducation est fondamentale pour préparer la future main-d'œuvre qui concrétisera la stratégie et les ambitions spatiales de l'Europe, et parce qu'elle contribue à former des générations de futurs citoyens informés, capables de décider et d'agir de manière responsable, et équipés pour relever les défis de l'avenir, quelle que soit la profession qu'ils choisissent.

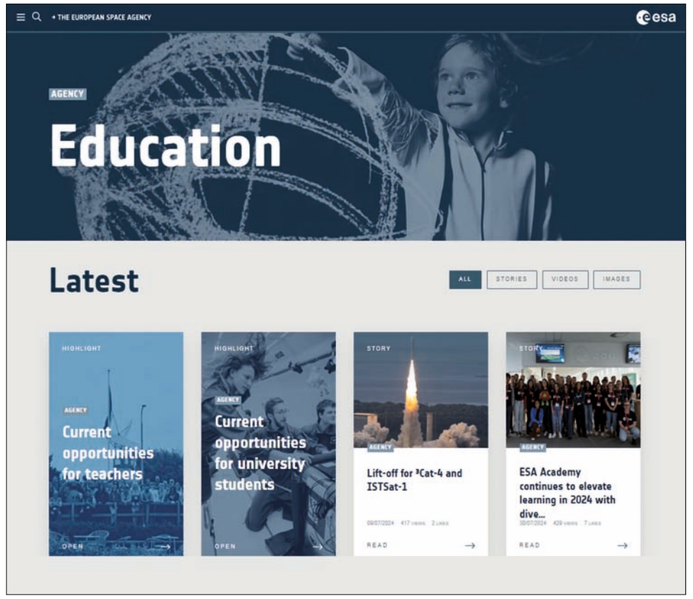
L'espace est utilisé comme un atout pour soutenir l'enseignement des STIM *(sciences, technologies, ingénierie et mathématiques)*. L'espace est un élément important de la culture contemporaine ; c'est un moteur et un catalyseur sociétal et économique. Apprendre en utilisant l'espace signifie accéder à des connaissances de pointe, apprendre à collaborer, à créer, à innover. En d'autres termes, cela signifie être accompagné sur une voie inspirée et unique pour développer ce que l'on appelle les compétences du 21e siècle c'est-à-dire tout ce qu'un jeune devrait avoir la possibilité de développer pour réussir sa carrière et contribuer à un avenir meilleur.

L'éducation inspirée est un élément fondamental de la stratégie de l'ESA pour l'avenir de l'Europe dans l'espace — Agenda 2025. En décembre 2022, les États membres de l'ESA ont approuvé la vision et le plan « Espace pour l'éducation 2030 » (S4E 2030), donnant ainsi leur feu vert au programme éducatif de l'ESA pour qu'il soit plus large, plus innovant, plus inspirant et qu'il aille beaucoup plus loin qu'auparavant.

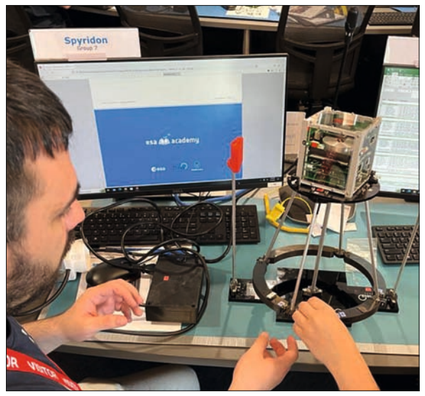
Le programme **Espace pour l'éducation 2030** cible un large éventail d'âges, depuis le plus jeune âge jusqu'aux toutes premières étapes de la carrière, grâce au programme d'apprentissage et d'inspiration STEM, destiné à l'éducation et à l'inspiration des enfants et des élèves âgés de 3 à 18 ans, et au programme de l'Académie ESA, destiné au développement des compétences et à l'engagement des étudiants de l'enseignement supérieur.

Le programme *STEM Learning and Inspiration* se compose de deux ensembles d'activités. *Learn with Space* (Apprendre avec l'espace), est strictement éducatif, avec des activités conçues avec des objectifs d'apprentissage spécifiques à l'esprit, pour les jeunes et pour leurs éducateurs. Le second, *Let Space Inspire You*, est strictement inspirant ; il vise à utiliser le facteur « waouh » généré par l'espace pour éveiller la curiosité et l'imagination des enfants et des adolescents, et pour stimuler leur intérêt pour les études et les carrières dans le domaine des STIM et de l'espace. Dans la mesure du possible, une synergie des activités est recherchée au sein des deux ensembles, afin de renforcer mutuellement les éléments d'apprentissage et d'inspiration de l'expérience proposée.

Toutes ces activités sont solidement ancrées et mises en œuvre au niveau national par le biais du projet-cadre ESERO, un réseau de bureaux nationaux spécialisés et de consortiums de partenaires mis en place par l'ESA dans ses États membres et associés.



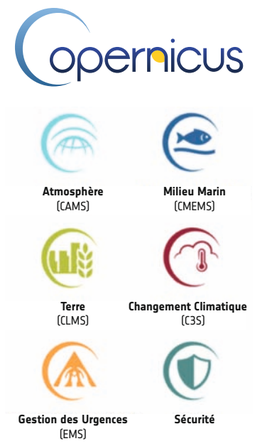
5. Les sites web de l'ESA Education et des ESERO offrent de nombreuses ressources multilingues sur l'espace pour les enseignants.



6. Dans le cadre de cours spéciaux, les étudiants peuvent développer leurs propres nanosats, de petits satellites effectuant des tâches spécifiques..

7. Dans le cadre des concours CanSat, des équipes d'écoles de toute l'Europe conçoivent leurs projets, dans lesquels des capteurs sont lancés pour de courts vols au cours desquels les données mesurées sont enregistrées et transmises à une station au sol.

1. Dans le cadre de la composante spatiale du programme Copernicus, de nombreux satellites d'observation de la Terre ont été lancés et devraient l'être au cours des prochaines années.



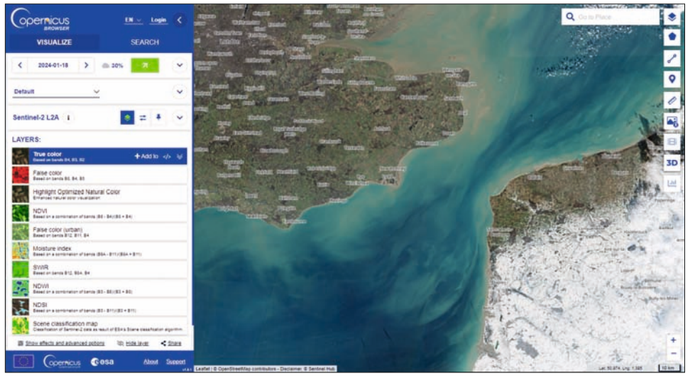
2. Le Copernicus Browser donne accès à une multitude de données d'observation de la Terre. L'exemple montre un résultat de recherche de données Sentinel-2 de la Manche britannique.

Copernicus – Surveillance de l'état de la Terre

Le programme Copernicus, financé par la Commission européenne, est une initiative très réussie de surveillance de l'état de la Terre. Fournissant des informations précises, opportunes et facilement accessibles pour améliorer la gestion de l'environnement, comprendre et atténuer les effets du changement climatique et assurer la sécurité civile, Copernicus est le programme d'observation de la Terre le plus ambitieux à ce jour.

Le nom du programme rend hommage au grand scientifique et observateur européen Nicolaus Copernicus. Sa théorie de l'univers héliocentrique a apporté une contribution pionnière à la science moderne. Le programme Copernicus est mis en œuvre en partenariat avec les États membres, l'Agence spatiale européenne (ESA), l'Organisation européenne pour l'exploitation de satellites météorologiques (EUMETSAT), le Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme (CEPMMT), les agences de l'UE et Mercator Ocean International.

De grandes quantités de données mondiales provenant de satellites et de systèmes de mesure au sol, aéroportés et maritimes fournissent des informations qui aident les prestataires de services, les autorités publiques et d'autres organisations internationales à améliorer la vie des citoyens d'Europe et d'ailleurs. Les services d'information fournis sont gratuits et librement accessibles aux utilisateurs via l'écosystème de l'espace de données Copernicus *(https://dataspace.copernicus.eu/)*.



Services d'information Copernicus

Les données brutes acquises par les satellites constituent la base de toutes les informations relatives à l'observation de la Terre. Cependant, dans toutes les applications, des données ou des informations traitées sont nécessaires. Les services d'information Copernicus fournissent des données complètes dans six domaines thématiques : Atmosphère, Marine, Terre, Changement climatique, Gestion des urgences et Sécurité. Ces services s'appuient sur une infrastructure sophistiquée qui intègre des données provenant de satellites d'observation de la Terre, de capteurs aéroportés et de mesures in situ :

Le **service Atmosphère** se concentre sur la surveillance des principaux composants atmosphériques tels que le CO_2, la concentration d'ozone et les niveaux de rayonnement UV. En fournissant des données en temps réel et historiques, le service Atmosphère contribue à l'identification des sources de pollution, à l'évaluation des tendances en matière de qualité de l'air et à la formulation de politiques efficaces.

Le **service Marine** fournit des données sur les conditions océaniques, notamment la température de surface de la mer, la couleur de l'océan et l'étendue de la glace de mer. Ces ensembles de données sont essentiels pour des applications telles que la sécurité maritime, la gestion de la pêche, la conservation des écosystèmes marins et la recherche sur le climat.

Le **service Terre** se concentre sur la surveillance de la couverture terrestre, des changements d'utilisation des sols et de la santé de la végétation. Ce service est utilisé dans des applications allant de la gestion de l'agriculture et de la sylviculture à la planification urbaine et à la conservation de la biodiversité.

Le **service Changement climatique** fournit des informations essentielles sur les paramètres climatiques, notamment les concentrations de gaz à effet de serre, les anomalies de température et l'élévation du niveau de la mer. Ce service aide les scientifiques, les décideurs politiques et les chercheurs à évaluer les effets du changement climatique et à élaborer des stratégies d'atténuation et d'adaptation.

Le **service Gestion des urgences** offre des capacités de cartographie rapide et d'alerte précoce. Lors de catastrophes naturelles ou de crises humanitaires, ces services fournissent des informations géospatiales précises et opportunes, contribuant à la coordination des interventions en cas de catastrophe, à l'évaluation des dommages et à l'affectation des ressources.

Le **service Sécurité** se concentre sur le contrôle des frontières et la surveillance maritime, en utilisant l'observation de la Terre pour surveiller et analyser les activités dans les régions sensibles. Ce service contribue à la sécurité et à la stabilité des frontières terrestres et maritimes.

La flotte de satellites Sentinel

Les satellites Sentinel constituent l'épine dorsale de la partie du programme Copernicus consacrée à la recherche d'informations à partir de l'espace. Ils fournissent une multitude de données d'observation de la Terre. Les satellites fonctionnent par paires afin d'assurer une livraison permanente des données, même en cas de défaillance de l'un d'entre eux. En outre, il est prévu de remplacer les Sentinel lorsqu'ils auront atteint la fin de leur cycle de vie. Ceci est important pour permettre une utilisation à long terme des applications développées dans le cadre du programme Copernicus. Actuellement, les satellites suivants sont opérationnels ou en projet :

Sentinel-1 (depuis 2014) : Capacité d'imagerie radar jour et nuit, par tous les temps, pour les services terrestres et océaniques de Copernicus, avec des résolutions au sol allant jusqu'à 5 mètres.

Sentinel-2 (depuis 2015) : Données d'images optiques à haute résolution pour soutenir les études de surveillance des terres de Copernicus, y compris la surveillance de la végétation, du sol et de la couverture aquatique, ainsi que l'observation des voies navigables intérieures et des zones côtières. La résolution au sol des données fournies se situe entre 10 et 60 mètres par pixel.

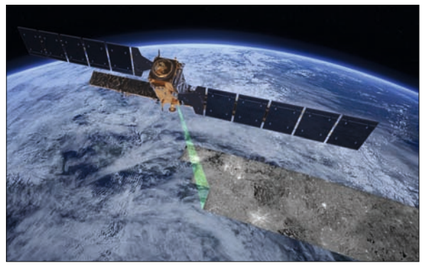
Sentinel-3 (depuis 2016) : Capacité multi-instruments pour soutenir les mesures précises de sujets tels que la température à la surface des terres et la couleur des terres. L'instrument optique de ce système à résolution moyenne acquiert des données avec une résolution d'environ 300 mètres par pixel. Un altimètre mesure par exemple le niveau de la mer, la hauteur des vagues et la glace de mer.

Sentinel-4 (depuis 2023, à bord de Meteosat MTG) : Spectromètre ultraviolet visible et infrarouge (UVN) et données du sondeur infrarouge thermique (IRS) d'Eumetsat, tous deux à bord du satellite MTGSounder (MTG-S).

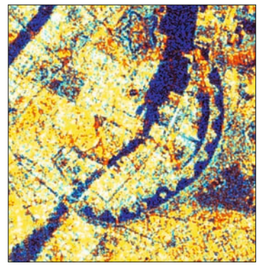
Sentinel-5P (depuis 2017) et **-5** (lancement prévu en 2024) : Mission dédiée à la surveillance de l'atmosphère, qui mesure la qualité de l'air, l'ozone et le rayonnement ultraviolet, et fournit des données pour des applications de surveillance et de prévision du climat.

Sentinel-6 Michael Freilich (depuis 2020) : Mission altimétrique réalisée en coopération avec EUMETSAT et la NOAA pour la surveillance du niveau de la surface de la mer. Cette mission poursuit l'acquisition de données commencée par TOPEX Poseidon il y a 20 ans.

En plus de maintenir cette flotte de satellites, il est prévu de lancer dans un futur proche des Sentinel supplémentaires dédiés par exemple à la surveillance du CO2, aux mesures de température à haute résolution, et à la surveillance de la glace et de la neige.



3a. Satellite radar Sentinel-1, impression d'artiste.

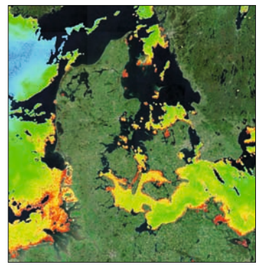


3b. Image radar de Copenhague, données acquises par Sentinel-1.

4a. Satellite optique à haute résolution Sentinel-2, impression d'artiste.

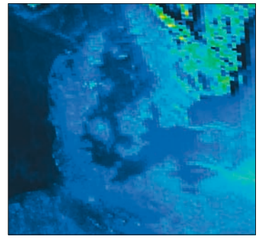
4b. Image satellite de Copenhague, données acquises par Sentinel-2.

5a. Sentinel-3, satellite à moyenne résolution, impression d'artiste.

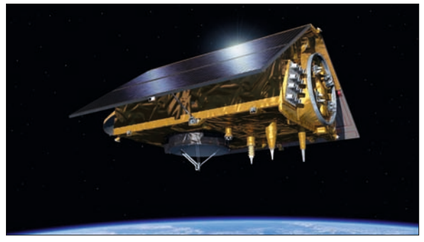


5b. Danemark, concentration de pigments d'algues dans la mer (Sentinel-3).

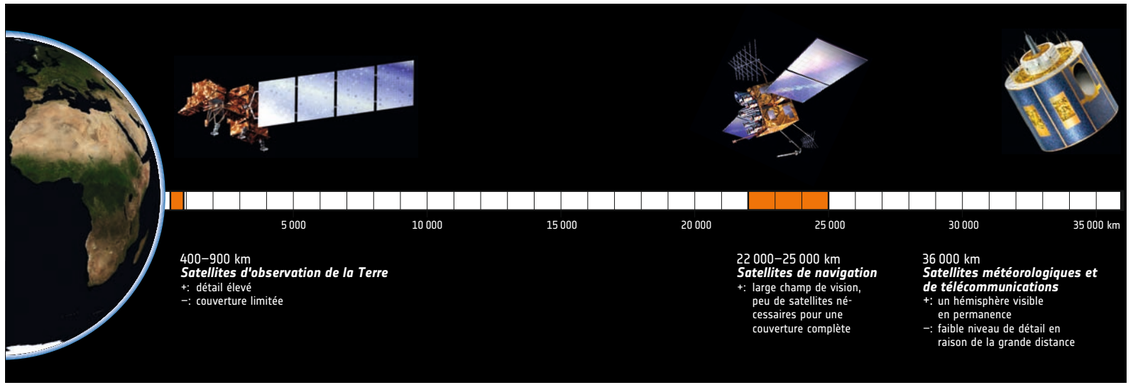
6a. Satellite de surveillance atmosphérique Sentinel-5, impression d'artiste.



6b. Concentration de SO_2 chez Danemark et le sud de la Suède, données Sentinel-5P.



7. Satellite de mission altimétrique Sentinel-6, impression d'artiste.



1. En fonction de leur objectif, les satellites opèrent sur des orbites situées à différentes distances de la Terre.

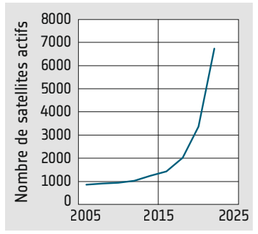
Types de satellites

Il existe différents types de satellites, chacun conçu pour des objectifs spécifiques, notamment l'observation de la Terre, la communication, la navigation et la recherche scientifique. En fonction de leur mission, ils évoluent sur des orbites et des distances différentes de la Terre.

Les **satellites de communication** facilitent les télécommunications mondiales en relayant les signaux entre les stations terrestres, ce qui permet la transmission de données, de voix et de vidéos sur de grandes distances. Positionnés en orbite géostationnaire ou en orbite terrestre basse, ces satellites fournissent des services essentiels pour la télédiffusion, la connectivité à l'internet et la communication mobile. Les constellations de satellites Intelsat et Iridium et, plus récemment, la constellation Starlink, qui compte plusieurs milliers de satellites, en sont des exemples marquants.

Les **satellites de navigation** constituent l'épine dorsale des systèmes mondiaux de navigation par satellite (GNSS), permettant une détermination précise de la localisation et de la navigation à la surface de la Terre. Ces satellites émettent des signaux qui sont reçus et triangulés par les récepteurs GNSS, fournissant aux utilisateurs des données de positionnement précises à des fins de navigation, de cartographie et d'arpentage. La constellation GPS exploitée par les États-Unis, ainsi que d'autres systèmes tels que Galileo (Europe), GLONASS (Russie) et Beidou (Chine) constituent les réseaux de satellites de navigation. Les satellites de navigation opèrent à une distance de 20 000 à 25 000 kilomètres de la Terre.

Les **satellites d'observation de la Terre** sont équipés de capteurs et de caméras pour surveiller la surface, l'atmosphère et les océans de la planète. Ces satellites capturent des images à haute résolution, détectent les changements dans la couverture terrestre, suivent les conditions météorologiques et surveillent les phénomènes environnementaux tels que la déforestation, l'urbanisation et l'élévation du niveau de la mer. Parmi les exemples, on peut citer la série Sentinel pour l'imagerie terrestre et la série Meteosat pour la surveillance météorologique. Ces satellites fournissent des données pertinentes à la fois pour la recherche scientifique (comme les Earth Explorers) et pour les applications opérationnelles.



2. Au cours des dernières années, le nombre de satellites actifs a augmenté rapidement.

3. L'espace autour de la Terre est devenu un lieu très encombré, dans lequel plusieurs milliers de satellites opérationnels et hors service, ainsi que de nombreux débris provenant de toutes les régions du monde, sont en train de s'accumuler.

Les **satellites scientifiques** sont conçus pour explorer le cosmos et étudier les objets et phénomènes célestes. Ces satellites sont équipés d'instruments spécialisés pour effectuer des observations astronomiques, mesurer le rayonnement cosmique et étudier les corps célestes tels que les étoiles, les galaxies et les trous noirs. Citons par exemple le télescope spatial Hubble pour l'astronomie optique, le télescope spatial James Webb pour l'astronomie infrarouge et l'observatoire de rayons X Chandra pour l'étude des émissions de rayons X des objets célestes.

Satellites en orbite autour de la Terre

En fonction des objectifs et des applications de la mission, les satellites d'observation de la Terre sont déployés sur différentes orbites, chacune offrant ses avantages et ses inconvénients. Le choix du type d'orbite influe sur des paramètres tels que le temps de revisite, la résolution spatiale et la zone de couverture. Les principaux types d'orbites utilisés par les satellites d'observation de la Terre sont les orbites terrestres basses et les orbites géostationnaires.

Les **orbites basses (LEO)** sont les orbites les plus courantes pour les satellites d'observation de la Terre, allant d'environ 180 à 2 000 kilomètres au-dessus de la surface de la Terre. Les satellites LEO ont des périodes orbitales courtes, ce qui permet de revisiter fréquemment des zones spécifiques. La résolution temporelle est donc élevée, ce qui les rend idéaux pour des applications telles que la surveillance météorologique, les interventions en cas de catastrophe et la surveillance environnementale. En raison de leur faible altitude, la zone couverte lors de chaque passage est limitée.

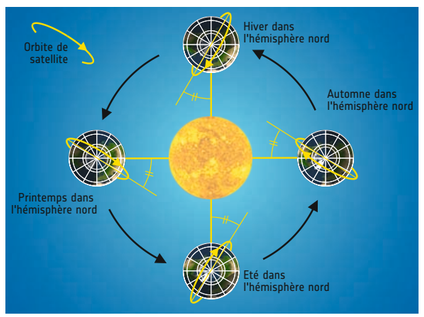
- *Orbite héliosynchrone (SSO)* : Les orbites héliosynchrones sont un sous-type d'orbite terrestre basse conçu pour maintenir un angle constant entre le satellite, le soleil et la surface de la Terre. Il en résulte des conditions d'éclairage constantes à chaque passage, ce qui est crucial pour les capteurs optiques qui dépendent de la lumière du soleil. Les satellites SSO sont couramment utilisés pour des applications d'imagerie et de télédétection, fournissant des images régulières et bien éclairées pour des tâches telles que la cartographie de l'occupation des sols et la surveillance de la végétation.

- *Orbite polaire* : Les orbites polaires passent au-dessus des pôles de la Terre, ce qui permet aux satellites d'observer l'ensemble de la surface lorsque la Terre tourne sous eux. Ce type d'orbite est commun pour les satellites d'observation de la Terre qui visent une couverture globale. Les satellites en orbite polaire offrent des vues complètes de la planète, ce qui les rend bien adaptés à des tâches telles que la surveillance du climat, la cartographie des glaces et la détection des changements environnementaux.

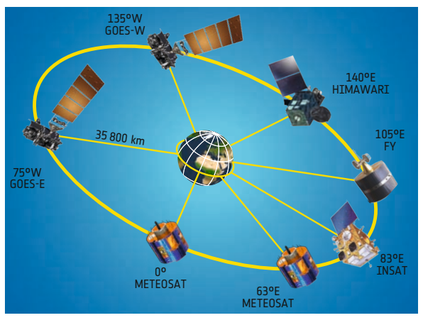
Les **orbites géostationnaires (GEO)** sont le deuxième type d'orbite utilisé pour l'observation de la Terre. Elles sont situées à une altitude de 35 786 kilomètres au-dessus de l'équateur. Un satellite en orbite géostationnaire tourne autour de la Terre au-dessus de l'équateur, à la vitesse de rotation de la Terre, ce qui lui donne l'air d'être stationnaire par rapport à un point spécifique de la surface de la Terre. Cela permet une surveillance continue de cette zone. Si les satellites GEO offrent une couverture continue, leur résolution spatiale est inférieure à celle des satellites LEO en raison de leur plus grande distance par rapport à la Terre. Ils sont souvent utilisés pour la surveillance météorologique, les communications et la surveillance de l'environnement.

Les autres types d'orbite, très importants pour des objectifs spécifiques, sont les suivants :

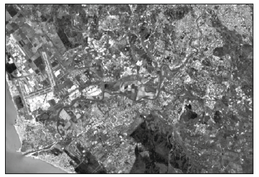
- L'**orbite terrestre moyenne (MEO)** : Les orbites terrestres moyennes se situent entre les orbites basses et les orbites géostationnaires, et s'étendent généralement de 2 000 à 35 786 kilomètres au-dessus de la Terre. Les constellations de satellites de navigation comme GPS et Galileo utilisent des orbites MEO pour fournir des services de positionnement mondial.
- **Orbite hautement elliptique (HEO)** : Les orbites hautement elliptiques ont une forme allongée, avec une extrémité plus proche de la Terre et l'autre plus éloignée. Ces orbites conviennent aux missions nécessitant des temps d'arrêt prolongés au-dessus de régions spécifiques, telles que les zones de haute latitude. Les satellites HEO offrent des périodes d'observation prolongées, ce qui les rend précieux pour la surveillance de phénomènes tels que les aurores boréales et la magnétosphère terrestre.



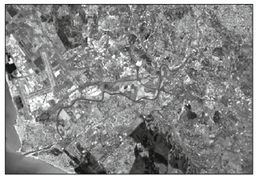
4. De nombreux satellites d'observation de la Terre opèrent sur des orbites héliosynchrones, ils traversent chaque point à la même heure.



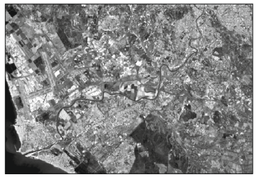
5. Le principal avantage des orbites géostationnaires est que les satellites restent au-dessus du même point de la surface de la Terre.



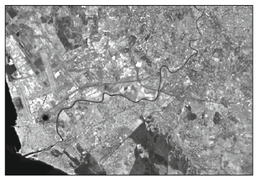
1a. Sentinel-2, bande 2 (490nm, bleu)



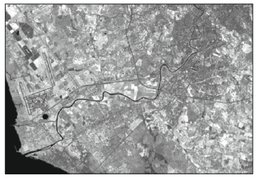
1b. Sentinel-2, bande 3 (560nm, vert)



1c. Sentinel-2, bande 4 (665nm, rouge)

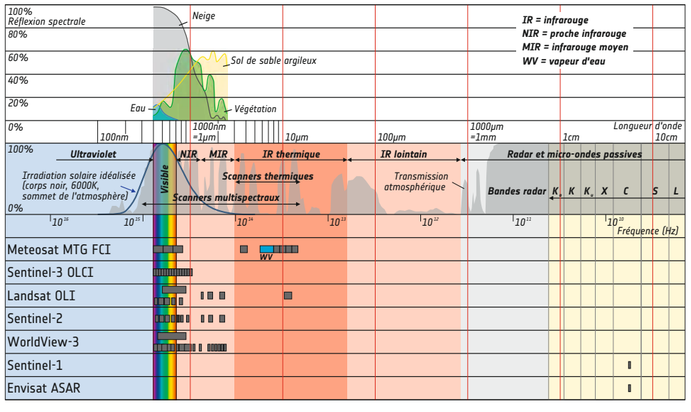


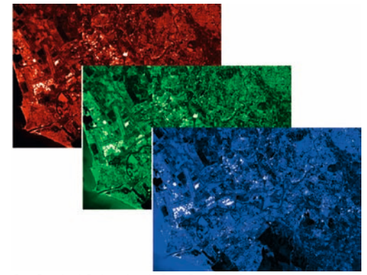
1d. Sentinel-2, bande5 (705nm, red edge)



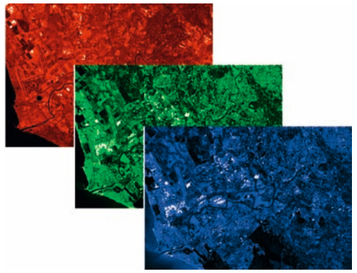
1e. Sentinel-2, bande 8 (865nm, infrarouge)

4. Spectre électromagnétique, transmission atmosphérique, propriétés des capteurs sélectionnés.





2a. Sentinel-2, bandes 4, 3 et 2 préparées pour être combinées en une image en vraies couleurs.

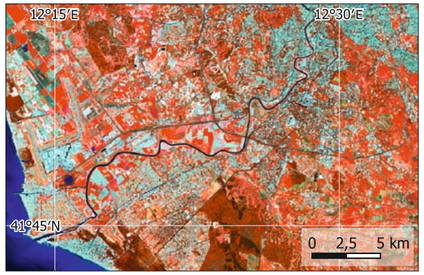


2b. Sentinel-2, bandes 8, 4 et 3 préparées pour être combinées en une image en fausses couleurs infrarouges.

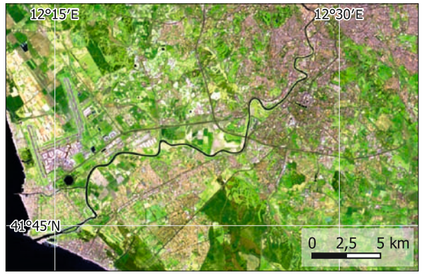
Des données aux images

La plupart des satellites d'observation de la Terre ne fournissent pas d'images couleur. Ils acquièrent des séries d'images en niveaux de gris dans différentes parties du spectre électromagnétique. Ces bandes d'images sont utilisées pour des évaluations scientifiques et, à l'instar des procédures appliquées dans les technologies d'impression et d'affichage, elles sont combinées pour produire des images en couleur de différents types. Contrairement à la photographie, les bandes d'images en niveaux de gris sont combinées de différentes manières. Selon l'application, les images sont produites en couleurs naturelles (image en vraies couleurs), en fausses couleurs infrarouges ou dans d'autres combinaisons de bandes.

3a. Image en vraies couleurs de la région à l'ouest de Rome produite par Sentinel-2 en utilisant les bandes 4, 3 et 2.



3b. Image en fausses couleurs infrarouges de la région à l'ouest de Rome produite par Sentinel-2 en utilisant les bandes 8, 4 et 3.



3c. Image en fausses couleurs infrarouges de la région à l'ouest de Rome produite par Sentinel-2 en utilisant les bandes 12, 11 et 4.

Images en vraies et fausses couleurs

Bien que les images en vraies couleurs montrent la Terre « telle qu'elle est » (c'est-à-dire telle qu'elle apparaîtrait à l'œil humain) à des fins de cartographie et d'illustration, d'autres représentations sont utilisées pour mettre en évidence des propriétés spécifiques de la zone affichée.

Des informations supplémentaires importantes sont contenues en particulier dans les bandes d'images infrarouges. Ces informations sont utilisées, par exemple, pour analyser les propriétés des plantes, car la chlorophylle contenue dans les feuilles reflète bien la partie infrarouge de la lumière du soleil. Ces données constituent une source d'information précieuse pour les applications dans les domaines de l'agriculture et de la protection de la nature.

Les images en fausses couleurs infrarouges utilisant d'autres bandes infrarouges sont également employées pour analyser les incendies et les activités volcaniques, ainsi que les propriétés des espaces urbains.

Satellites radar

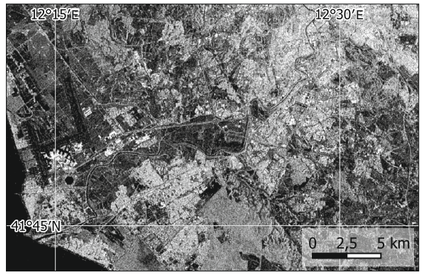
Les données des satellites radar offrent une perspective particulière sur la surface de la Terre, en capturant des informations au-delà de ce que les capteurs optiques peuvent révéler. Contrairement aux données optiques, qui reposent sur la réflexion de la lumière du soleil, les capteurs radar émettent activement des impulsions micro-ondes et mesurent le signal de retour. Cette capacité de détection active permet aux satellites radar de fonctionner indépendamment de l'éclairage par la lumière du soleil, ce qui les rend adaptés à plus des tâches d'observation de la Terre.

L'un des principaux avantages des données des satellites radar est leur capacité à pénétrer la couverture nuageuse, une limitation importante pour les capteurs optiques. Le SAR peut « voir » à travers les nuages grâce à sa plus grande longueur d'onde, ce qui permet une surveillance continue dans les régions sujettes à une couverture nuageuse persistante, telles que les forêts tropicales humides ou les zones de haute latitude. Cette caractéristique est particulièrement importante pour des applications telles que la surveillance des catastrophes, où il est essentiel de disposer d'informations en temps réel. Les données radar ne sont pas affectées par la lumière du jour, ce qui permet une surveillance permanente. Cette capacité d'observation constante s'avère inestimable pour des applications telles que la surveillance maritime, où le suivi des navires dans des régions éloignées ou mal éclairées peut s'avérer difficile pour les capteurs optiques.

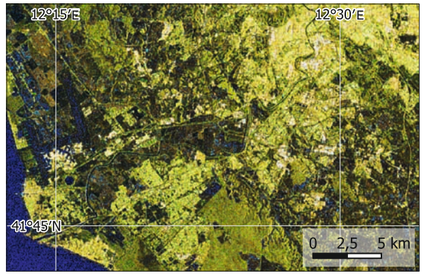
Les données radar se distinguent également par leur capacité à mesurer la topographie et les déformations de surface avec une grande précision. Les techniques SAR interférométriques (InSAR) sont utilisées pour analyser la différence de phase entre plusieurs images radar, ce qui permet de détecter les affaissements de terrain, les changements d'altitude et même les déformations de l'ordre du millimètre. Les données radar sont donc indispensables pour surveiller la stabilité du sol dans les régions sujettes aux tremblements de terre ou pour suivre les déplacements subtils des infrastructures.

La capacité des données radar à pénétrer la végétation est un avantage unique pour les applications forestières. Alors que les capteurs optiques sont limités dans leur capacité à voir à travers des canopées denses, le radar peut pénétrer les couches de végétation et capturer des informations sur la structure de la forêt, la biomasse, et même détecter des activités d'exploitation forestière illégales.

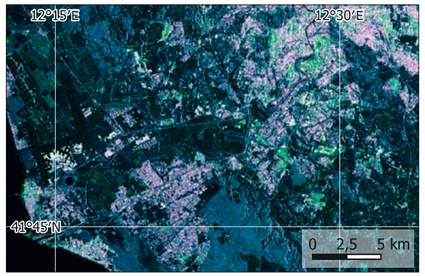
Comme toute technologie, les données radar ont leurs limites. La résolution spatiale de l'imagerie radar est généralement plus grossière que celle des données optiques à haute résolution. Alors que les capteurs optiques peuvent fournir des informations détaillées sur les caractéristiques de la surface, les données radar peuvent ne pas être suffisamment détaillées pour certaines applications. En outre, l'interprétation des données radar est moins intuitive que celle des données optiques, et leur évaluation nécessite des outils logiciels sophistiqués permettant d'extraire les informations subtiles des données.



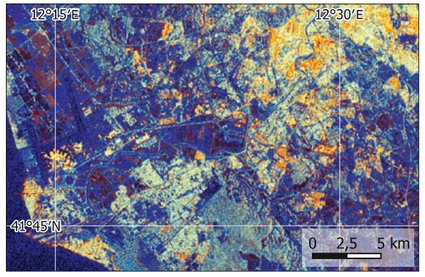
5. Image radar de la région au sud-ouest de Rome, image en polarisation simple. Données : Sentinel-1, 2022-03-23.



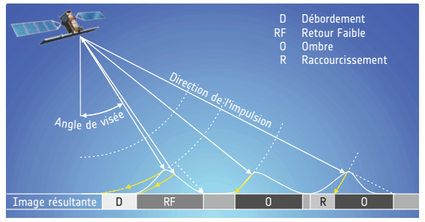
6. Image radar de la région au sud-ouest de Rome, image multi-polarisation. Données : Sentinel-1, 2022-03-23.



7. Image radar de la région au sud-ouest de Rome, image multipolarisée optimisée pour les analyses urbaines (les zones bâties apparaissent en violet). Données : Sentinel-1, 2022-03-23.



8. Image radar de la région au sud-ouest de Rome, image multipolarisée optimisée pour une bonne discrimination des différentes classes de couverture du sol. Données : Sentinel-1, 2022-03-23.



9. Les satellites radar envoient des impulsions de rayonnement à la surface de la Terre et mesurent le signal réfléchi. Le temps de retour du signal vers le satellite permet de calculer la distance du point de réflexion. C'est la base de la production des cartes d'images radar.

Interprétation des données satellitaires — Indices

L'interprétation des données satellitaires pour obtenir des informations sur les caractéristiques et les changements à la surface de la Terre est une tâche complexe. L'analyse basée sur des indices s'est révélée être un outil puissant pour extraire des informations des données satellitaires. Différents indices, dérivés de combinaisons de bandes spectrales, mettent en évidence des caractéristiques, des modèles et des conditions environnementales spécifiques :

Végétation : Les indices de végétation sont essentiels pour surveiller la santé des plantes, la biomasse et les changements de la couverture terrestre. Des indices tels que l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI) utilisent le contraste entre la réflectance dans les bandes rouge et proche infrarouge pour quantifier la densité de la végétation. Des valeurs élevées de NDVI indiquent généralement une végétation saine et dense, tandis que des valeurs plus faibles peuvent indiquer une végétation stressée ou clairsemée. Ces indices sont essentiels pour des applications allant de la surveillance de l'agriculture à l'évaluation de la santé des écosystèmes.

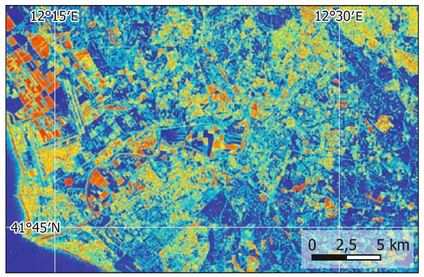
Urbanisation : Les indices d'urbanisation permettent d'analyser et de surveiller l'étendue et les caractéristiques des zones urbaines dans l'imagerie satellitaire. L'indice d'îlot de chaleur urbain (UHII), par exemple, compare la température des zones urbaines et rurales, mettant en évidence la chaleur accrue dans les environnements urbains. D'autres indices, comme l'indice de construction par différence normalisée (NDBI), se concentrent sur les zones bâties dans le paysage, ce qui facilite les études de planification urbaine et de développement d'infrastructures.

L'eau : Les données satellitaires sont utilisées pour évaluer la qualité de l'eau au moyen d'indices spécifiques. L'indice d'eau différence normalisée (NDWI) est utilisé pour identifier les masses d'eau de surface, tandis que des indices comme l'indice de qualité de l'eau (WQI) utilisent plusieurs bandes pour évaluer des paramètres tels que la concentration en chlorophylle et les charges sédimentaires, offrant ainsi un aperçu des écosystèmes aquatiques et de la gestion des ressources en eau.

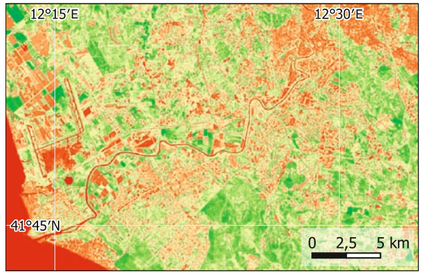
Zones brûlées : La surveillance des zones brûlées et des incendies de forêt sont des applications essentielles des données satellitaires. Des indices tels que le ratio de brûlure normalisé (NBR) mettent en évidence les changements de la couverture végétale après un incendie. Grâce à eux, les analystes peuvent quantifier la gravité de la zone brûlée, ce qui facilite la planification du rétablissement après l'incendie et la restauration écologique.

Neige et glace : Dans les régions polaires et montagneuses, la surveillance de la couverture neigeuse et glaciaire est essentielle pour comprendre les effets du changement climatique. Des indices tels que l'indice de neige par différence normalisée (NDSI) permettent de différencier la neige des autres surfaces. Ces indices contribuent à l'évaluation du manteau neigeux, à la surveillance des glaciers et à la prévision des ressources en eau.

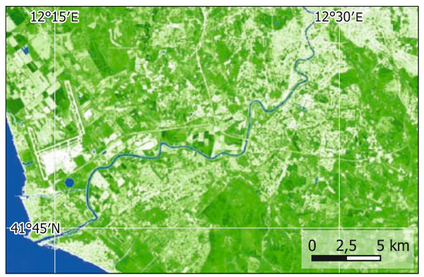
1. Image Sentinel-2 en vraies couleurs de la région au sud-ouest de Rome, montrant l'embouchure du Tibre, Ostie et l'aéroport de Fiumicino.



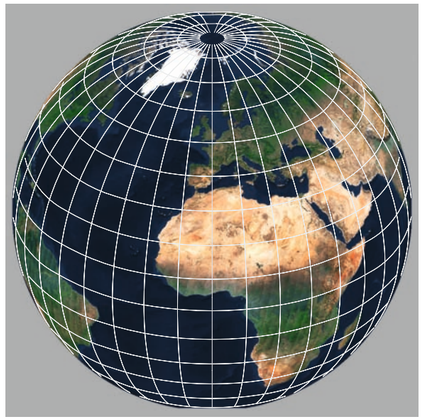
2. Carte de l'indice d'humidité du sol de Sentinel-2 pour la région au sud-ouest de Rome. Les couleurs rouges indiquent les zones sèches telles que les zones bâties et les terres dénudées, le bleu foncé met en évidence les zones humides, principalement végétalisées.



3. Carte NDVI (indice de végétation par différence normalisée) de Sentinel-2 pour la région au sud-ouest de Rome. Du rouge au vert, l'intensité ou la vitalité de la végétation augmente.



4. Carte Sentinel-2 NDWI (indice d'eau par différence normalisée) de la région au sud-ouest de Rome. Les masses d'eau (bleu) peuvent être clairement identifiées, du vert au blanc la teneur en eau de la surface diminue.



5- La Terre est un corps tridimensionnel. La représentation de sa surface en deux dimensions s'accompagne de distorsions, entraînant des erreurs dans les distances, les angles ou les surfaces affichées.

Des données satellitaires aux cartes

La production de cartes précises et fiables à partir de données satellitaires repose sur deux facteurs essentiels : le géoréférencement et les projections cartographiques. Ces aspects jouent un rôle fondamental en garantissant que l'imagerie satellitaire est non seulement visuellement interprétable, mais aussi spatialement précise et compatible avec les ensembles de données géographiques existants. Cela permet de créer des séries chronologiques et d'utiliser les données satellitaires pour mettre à jour les cartes avec des informations plus anciennes.

Le **géoréférencement** consiste à attribuer des coordonnées géographiques à les pixels de l'image satellite, établissant ainsi une relation spatiale entre l'image et la surface de la Terre. Cette étape permet d'intégrer les données satellitaires à d'autres informations géographiques, facilitant ainsi une analyse précises. Les aspects importants du géoréférencement sont les suivants

Les points de contrôle au sol (GCP) : Le géoréférencement est souvent réalisé en identifiant des points de contrôle au sol, qui sont des caractéristiques bien définies dont les coordonnées géographiques sont connues. Ces points servent de marqueurs de référence, permettant d'aligner l'image sur un système de référence de coordonnées.

Méthodes de transformation : Diverses méthodes de transformation, telles que les transformations polynomiales ou affines, sont appliquées pour déformer l'image satellite afin qu'elle corresponde aux emplacements connus des points de contrôle au sol.

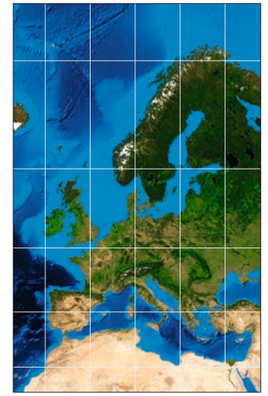
Évaluation de la précision : La précision du géoréférencement est cruciale pour une cartographie fiable. Les évaluations de la précision comparent les coordonnées cartographiées des points sélectionnés à leurs véritables coordonnées au sol.

Projections cartographiques : La surface de la Terre est tridimensionnelle, mais les cartes sont des représentations bidimensionnelles, ce qui nécessite l'utilisation de projections cartographiques. Une projection cartographique est une méthode systématique pour représenter la surface courbe de la Terre sur une carte plane.

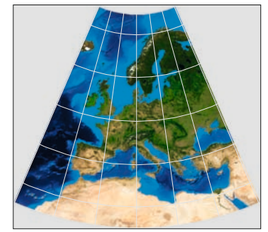
Le choix d'une projection cartographique appropriée est crucial pour minimiser les distorsions de forme, de surface, de distance ou de direction. Elle dépend donc des exigences spécifiques du projet de cartographie. Les principaux types de projections sont les suivants

- La *projection cartoographique*, qui permet d'accéder facilement aux coordonnées d'un point,
- La *projection de Mercator*, qui préserve les angles et est souvent utilisée pour la navigation,
- Les projections à surfaces égales, comme la *projection d'Albers* ou la *projection de Mollweide*, qui conservent des représentations précises des surfaces relatives.

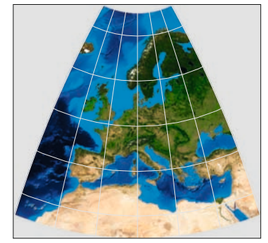
6a. Dans la projection cartographique, les lignes de latitude et de longitude constantes forment des lignes droites.



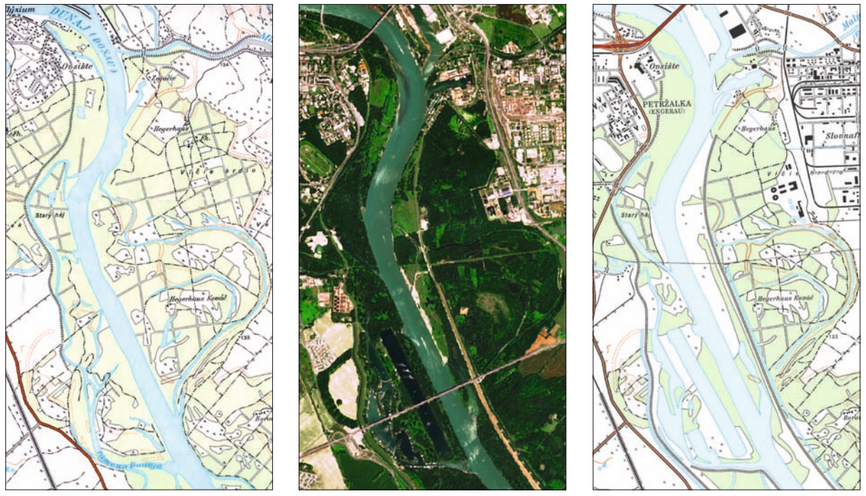
6b. La projection de Mercator est une projection qui préserve les angles.



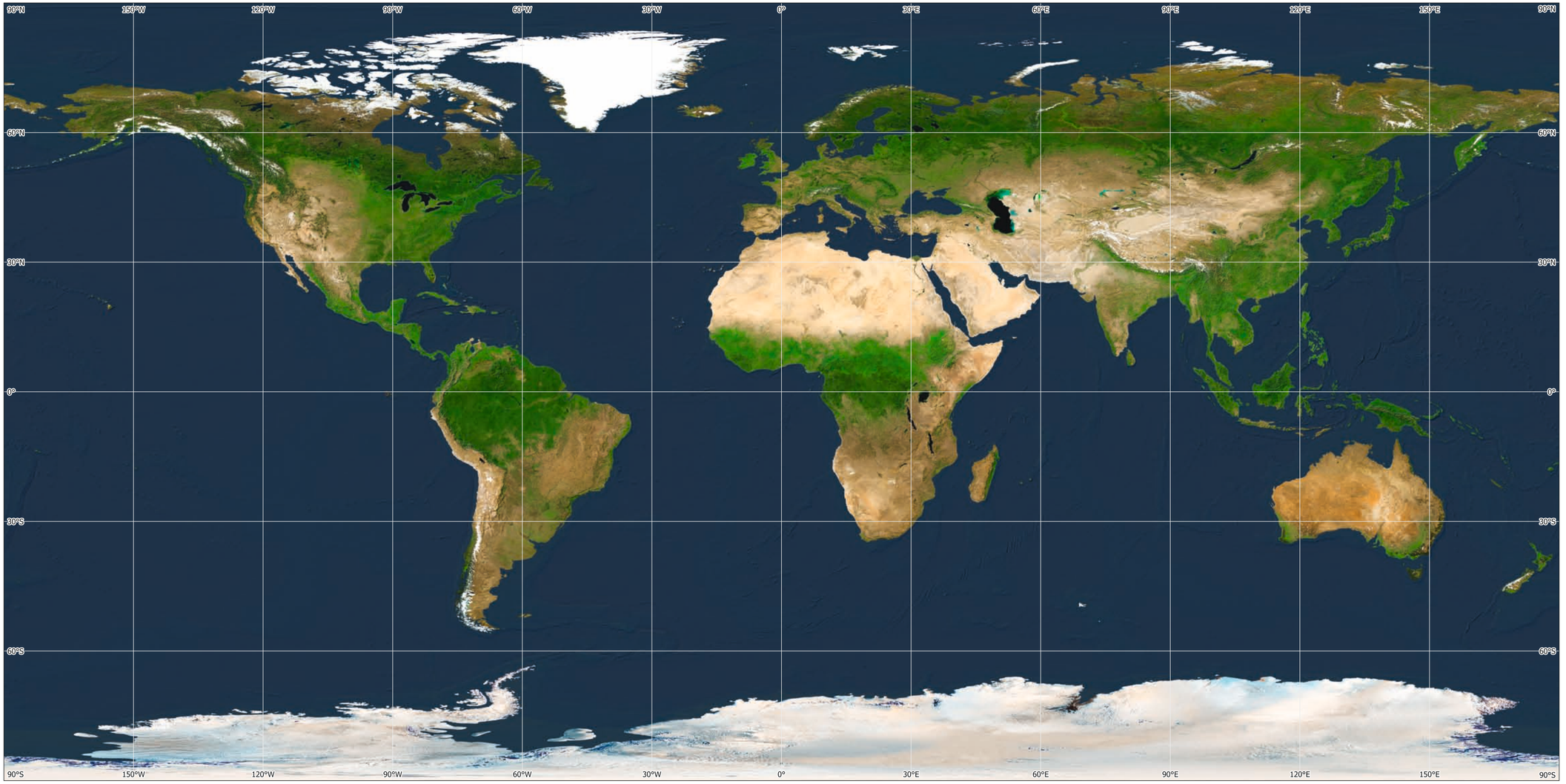
6c. La projection d'Albers à surfaces égales drape la surface sur un cône.



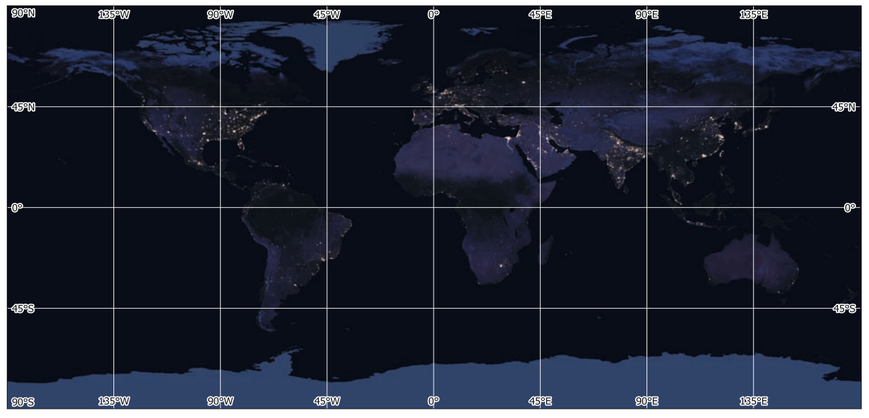
6d. Autour de son point central, la projection azimutale à surfaces égales de Lambert présente des distorsions faibles.



7. Montrant les changements récents, les données satellitaires sont un outil important pour mettre à jour les cartes topographiques (à gauche : carte de 1972, au centre : image Sentinel-2 de 2023, à droite : carte de 2023).



1. Carte mondiale d'images satellites de jour dérivée d'une large collection d'images satellites acquises par le capteur SPOT Vegetation.

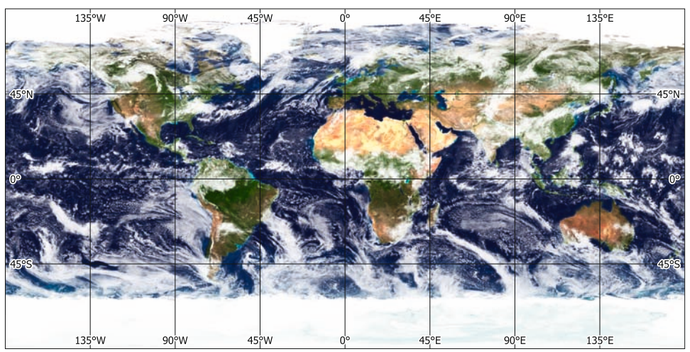


2. Carte mondiale d'images satellites nocturnes (marbre noir). Données acquises par le DMSP — Operational Linescan System.

3. Vue spatiale de la Terre, prise le 7 décembre 1972 par l'équipage du vaisseau spatial Apollo 17 en route vers la Lune, à une distance d'environ 29 400 kilomètres.

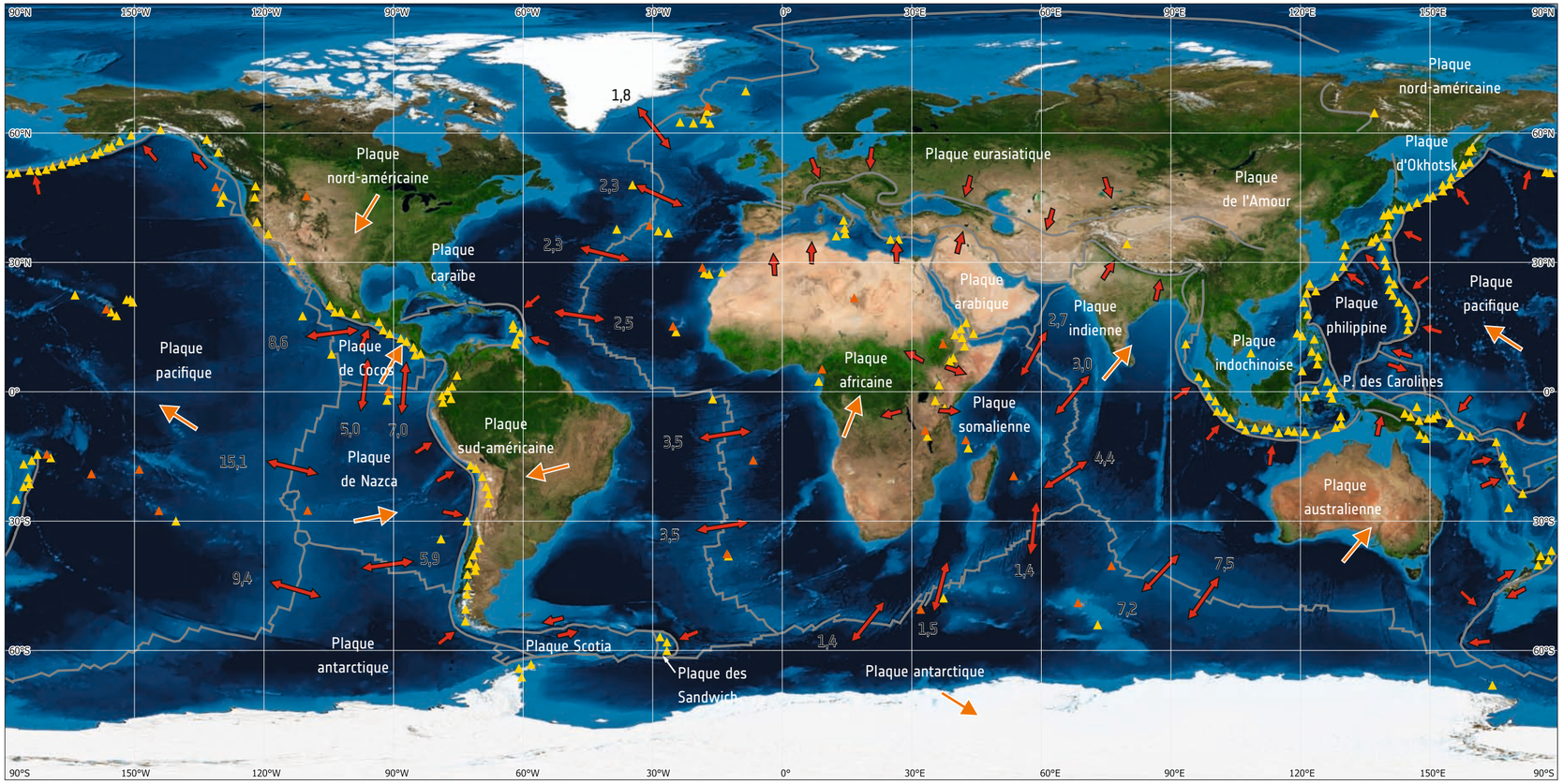
Vues satellitaires globales

Les satellites d'observation de la Terre permettent de visualiser notre planète de manière homogène. Habituellement, de grandes parties de la surface de la Terre sont couvertes par des nuages. Pour obtenir une vue complète, un combine des images sans nuages, idéalement prises au même moment au cours de la période de végétation. Les cartes d'images satellite globales sont produites non seulement pour présenter la lumière du jour et les couleurs naturelles, mais aussi pour donner une vue d'ensemble de nombreux aspects. Les cartes des températures, des précipitations et des gaz à l'état de traces sont des exemples du large éventail d'informations produites. Les cartes nocturnes, qui mettent en évidence l'activité humaine sur Terre, constituent une application particulière.



4. Cette mosaïque d'images satellitaires de jour montre la Terre avec des nuages, qui couvrent à tout moment une grande partie de la planète.

LITHOSPHÈRE



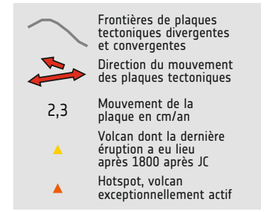
1. Plaques tectoniques.

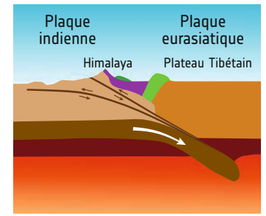
L'activité tectonique façonne la Terre

Les mouvements et les déformations de la croûte terrestre provoqués par le déplacement des plaques tectoniques sont des processus puissants qui façonnent la surface de la Terre pendant des millions d'années. La lithosphère terrestre, qui comprend la croûte et le manteau supérieur, est soumise à d'immenses forces liées au mouvement et à l'interaction de ces plaques, ce qui entraîne la formation de montagnes, de vallées de rift, de tremblements de terre et d'autres phénomènes géologiques. L'Himalaya et la vallée du rift est-africain sont des exemples illustrant les processus tectoniques.

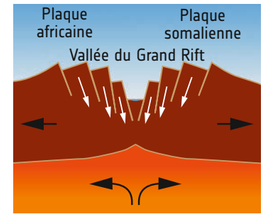
L'Himalaya, qui s'étend sur l'Asie du Sud, est le résultat de la collision entre les plaques tectoniques indienne et eurasienne. Cette collision a commencé il y a environ 50 millions d'années et continue de façonner le paysage de la région. Les plaques convergentes ont provoqué le soulèvement de chaînes de montagnes, dont le mont Everest, le plus haut sommet du monde. L'Himalaya présente une multitude de processus géologiques, notamment le plissement et l'érosion.

En revanche, la vallée du rift est-africain est le résultat de forces divergentes qui ont déchiré le continent africain. La croûte terrestre est déchirée le long d'un système de rifts, résultant de l'éloignement des plaques tectoniques. Ce « rifting continental » constitue les premières étapes de l'évolution des limites de plaques. Le magma provenant du manteau contribue à l'amincissement et à la séparation éventuelle des masses continentales. Le paysage de la vallée du rift est caractérisé par des falaises abruptes, une activité volcanique et des lacs.

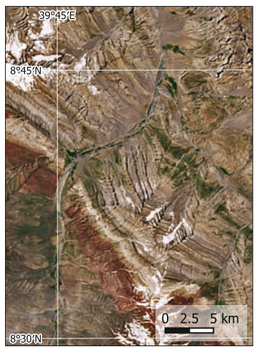




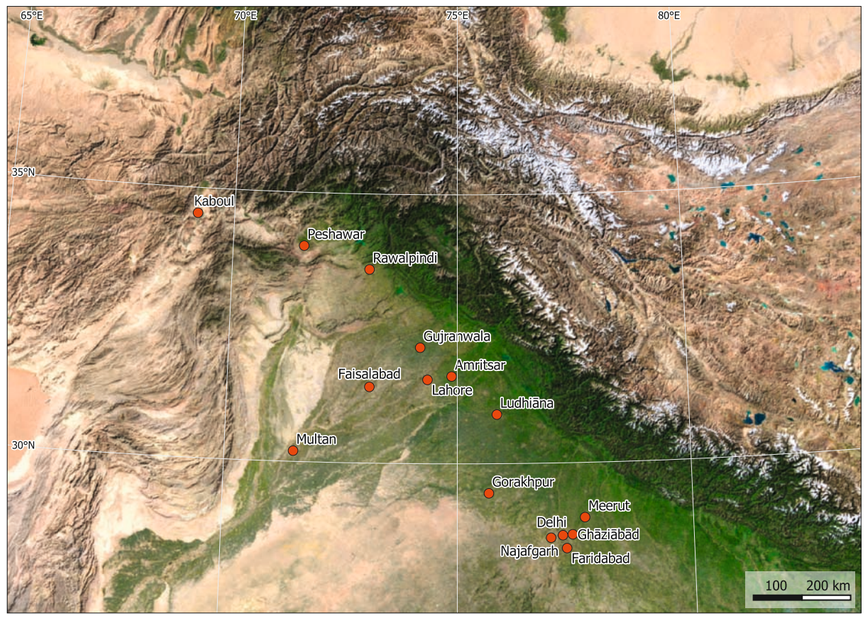
4. Coupe schématique de l'Himalaya et du plateau tibétain, montrant la formation de la chaîne de montagnes par la collision des plaques indienne et eurasienne.



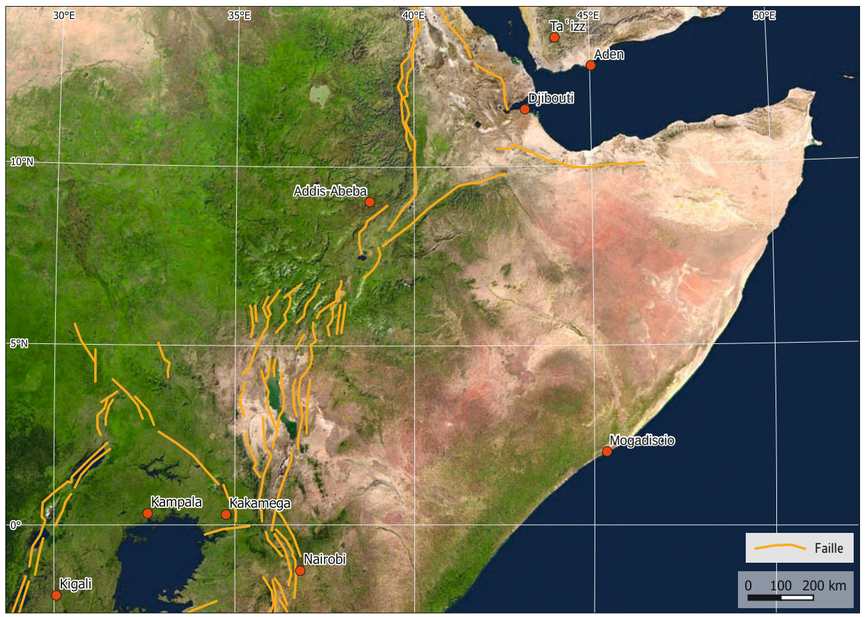
5. Coupe transversale schématique de la vallée du rift est-africain, montrant la formation de la vallée par la divergence des plaques africaine et somalienne.



2. Structures de plis typiques sur le versant nord de l'Himalaya, montrant des couches de roches de différentes couleurs. Données : Sentinel-2, 2023-08-02.

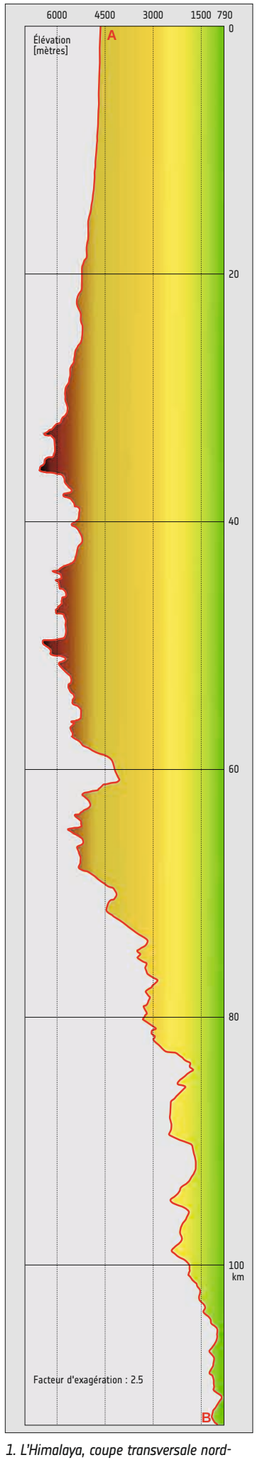


3. Les montagnes de l'Himalaya sont des montagnes plissées caractéristiques. Elles résultent du mouvement de la plaque indienne vers le nord, où elle entre en collision avec la plaque eurasienne.



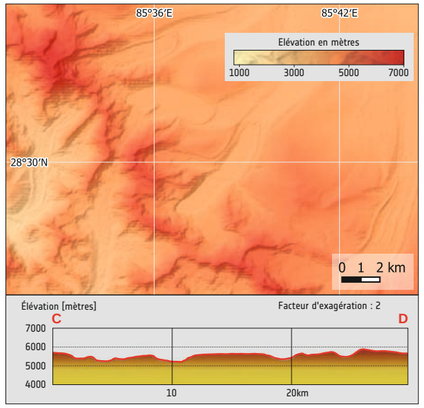
6. Vue détaillée des rifts de la vallée du rift est-africain à l'est d'Addis-Abeba, Éthiopie. Données : Sentinel-2, 2023-08-26.

7. Le rift est-africain est formé par la séparation en cours de la plaque somalienne de la plaque africaine, entraînant un amincissement de la croûte terrestre autour de la ligne de séparation.



1. L'Himalaya, coupe transversale nord-sud.

2. L'Himalaya sépare les basses terres verdoyantes du sud du plateau tibétain aride du nord. Données : Sentinel-2, 2023-10-22.



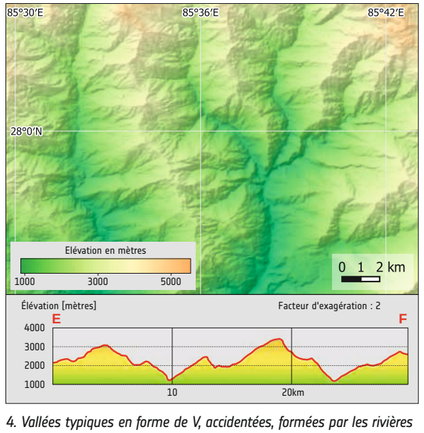
3. Les vallées lisses en forme de U formées par les glaciers sont accompagnées de moraines et de lacs glaciaires.

Des paysages façonnés par l'érosion

Les pentes de l'Himalaya sont tectoniquement actives. La collision entre la plaque indienne et la plaque eurasiatique entraîne un soulèvement de la croûte terrestre et la formation de la chaîne de montagnes de l'Himalaya. Différents processus d'érosion ralentissent le soulèvement de la chaîne de montagnes.

Le versant nord de l'Himalaya, le plateau tibétain, est caractérisé par de hauts plateaux, des vallées profondes et un terrain accidenté. Cette région est en grande partie aride et son altitude moyenne est plus élevée que celle du versant sud. Ici, l'érosion est en grande partie régie par les glaciers, ce qui donne lieu aux vallées en forme de U typiques de l'érosion glaciaire.

Le versant sud présente un relief plus varié, avec des vallées plus basses et des sommets plus élevés. Cette région comprend les contreforts de l'Himalaya, qui se transforment progressivement en vastes plaines du sous-continent indien. On y observe une érosion fluviale. Le paysage est formé par les rivières et les glissements de terrain, qui donnent naissance à des vallées en forme de V.

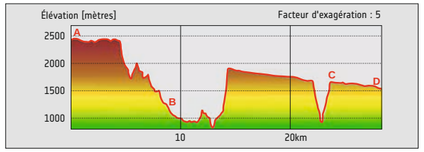


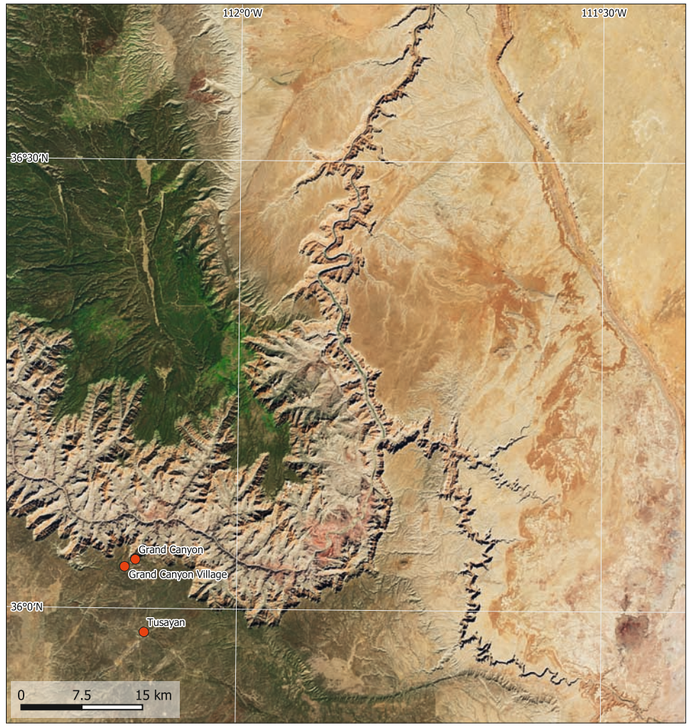
4. Vallées typiques en forme de V, accidentées, formées par les rivières le long des pentes sud de l'Himalaya.

Sculpté dans les couches de sédiments

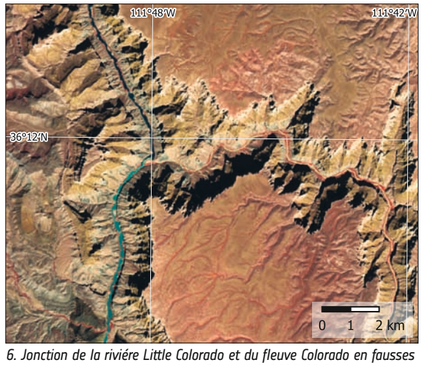
Le plateau du Colorado, dans le sud-ouest des États-Unis, est traversé par le fleuve Colorado. Le plateau de Kaibab, à l'ouest, apparaît en vert car il est couvert de trembles, d'épicéas et de genévriers. Le Désert peint, à l'est, est constitué de bandes de dunes de sable pétrifié parallèles à la surface. Le Colorado s'écoule de sa source dans le Rocky Mountains National Park vers le sud-ouest, en passant par le Marble Canyon. À l'extrémité sud du canyon, le fleuve est rejoint par la rivière Little Colorado. Au cours de millions d'années, la force érosive de l'eau a creusé le Grand Canyon à travers les couches de sédiments au fur et à mesure que le plateau du Colorado s'est soulevé.

Les cartes détaillées mettent en évidence la situation géologique et géomorphologique spécifique de la région, résultant de l'érosion fluviale des couches de sédiments, par ailleurs pour la plupart intactes. La carte du terrain et le profil illustrent le caractère de gorge du canyon creusé à la surface du plateau du Colorado.

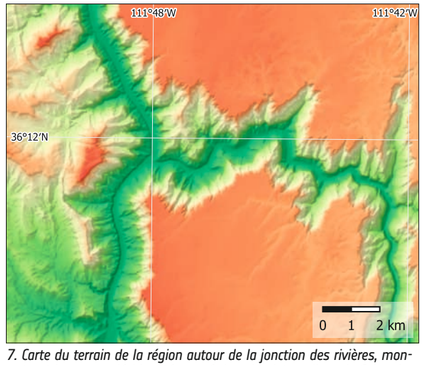




5. Le fleuve Colorado a creusé le Grand Canyon jusqu'à 1500 mètres de profondeur dans les couches de roches sédimentaires formant le plateau du Colorado. Données : Sentinel-2, 2023-09-24.

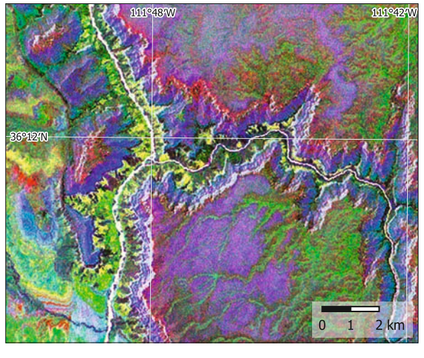


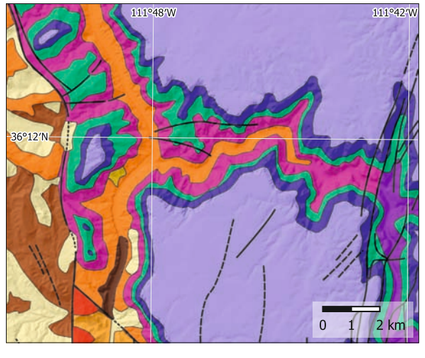
6. Jonction de la rivière Little Colorado et du fleuve Colorado en fausses couleurs infrarouges. Données : Sentinel-2, 2023-09-24.



7. Carte du terrain de la région autour de la jonction des rivières, montrant le canyon déchiqueté creusé dans le plateau lisse du Colorado.

8. Les composantes principales des données satellitaires permet de séparer les couches géologiques (à gauche).





9. Carte géologique.

LITHOSPHÈRE

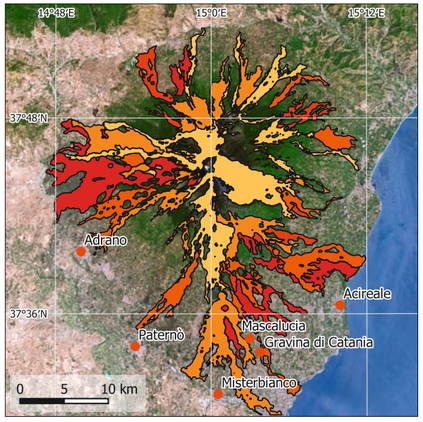
1. Sicile, mosaïque satellitaire. Données : Sentinel-2, juin 2023.

6. Mont Etna lors d'une éruption.

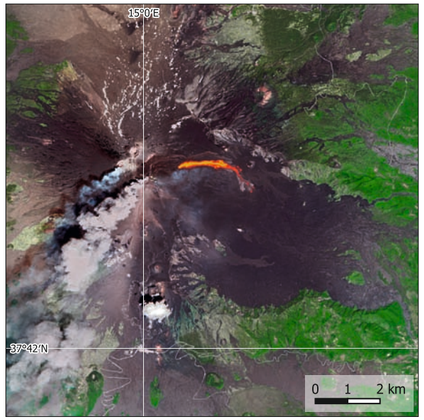
Mont Etna, Italie

L'Etna, situé sur l'île de Sicile en Italie, est le plus grand volcan d'Europe et un des volcans plus actifs de la planète. Cela se traduit par une fréquence élevée d'éruptions. Les personnes qui vivent sur les pentes du volcan et à proximité ont l'habitude d'être régulièrement dérangées par l'activité volcanique. Ils tirent parti des avantages de la situation, en particulier de la fertilité du sol volcanique et du rôle du volcan en tant que site touristique.

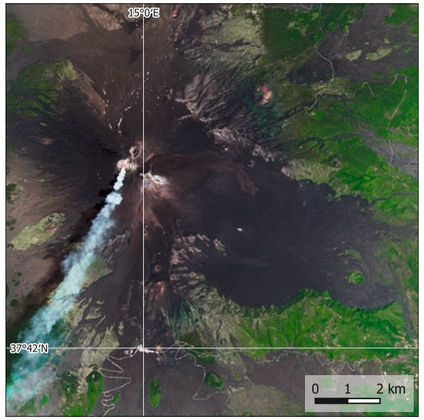
Les données satellitaires sont utilisées pour surveiller et quantifier les dommages causés par cet événement naturel. La technologie satellitaire joue un rôle crucial dans le suivi de la progression de l'éruption, en fournissant des informations en temps réel sur le comportement du volcan, ce qui permet de cartographier les coulées de lave, les panaches de cendres et les émissions de gaz. Ces observations permettent d'émettre des alertes pour protéger les communautés voisines et le trafic aérien.



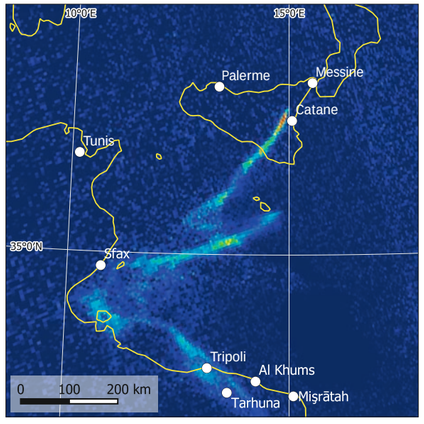
5. Carte de l'âge des champs de lave couvrant les pentes de l'Etna.



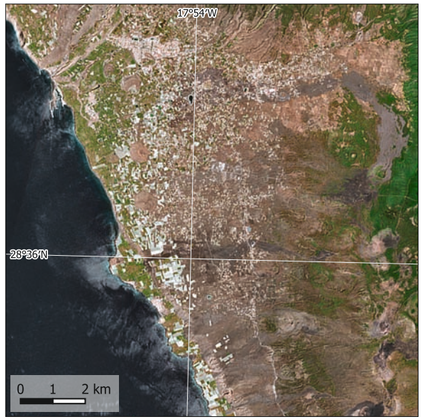
2. Début de l'éruption de l'Etna en juin 2022, montrant une coulée de lave à l'est du sommet. Données : Sentinel-2, 2022-06-03



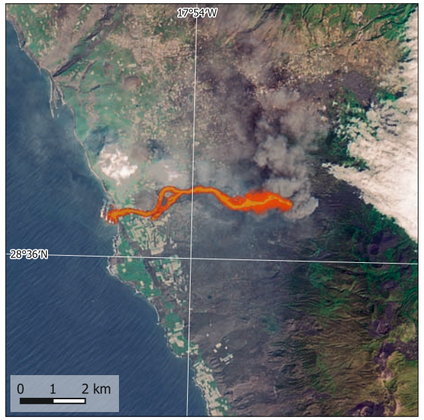
3. L'éruption de juin 2022 de l'Etna après l'arrêt des coulées de lave. Données : Sentinel-2, 2022-06-21.



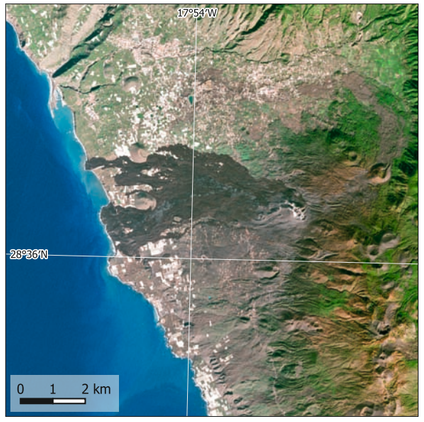
4. Concentration de SO_2 (colonne totale) le 2022-06-21, mesurée par Sentinel-5B.



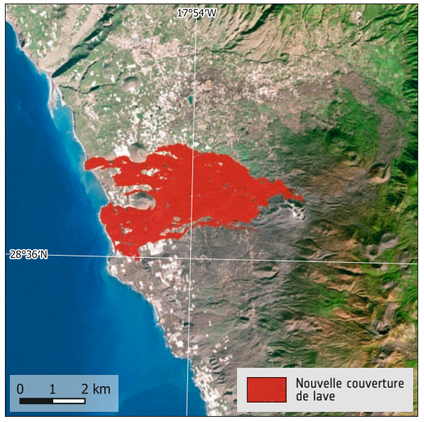
7. Image satellite de La Palma, Espagne, montrant la région autour de Los Llanos de Ariadne avant l'éruption de la crête Cumbre Vieja. Données : Sentinel-2, 2021-08-21.



8. La Palma, Espagne, image montrant la coulée de lave pendant l'éruption. Données: Sentinel-2, 2021-09-30.



9. La Palma, Espagne, image montrant la nouvelle couverture de lave. La comparaison avec l'image prise avant l'éruption montre la perte d'habitations et de champs. Données : Sentinel-2, 2022-01-03.



10. La Palma, Espagne, image mettant en évidence en rouge la nouvelle couverture de lave telle que dérivée des données satellitaires. Données : Sentinel-2, 2022-01-03.

Volcanisme de point chaud

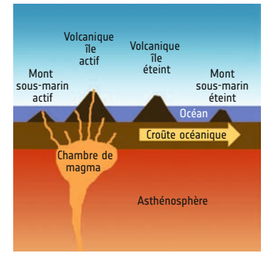
Les points chauds sont des régions de la croûte terrestre situées au-dessus de ce que l'on appelle les panaches mantelliques, des régions du manteau terrestre où le magma s'élève en raison de processus de convection. En conséquence, la croûte terrestre située au-dessus du panache peut s'amincir et l'activité volcanique de la région peut augmenter. Lorsque la croûte terrestre se déplace à travers le point chaud, la zone d'activité volcanique se déplace et peut créer des chaînes de volcans. Hawaï et les îles Canaries sont des exemples marquants de volcanisme de point chaud.

La Palma, Espagne

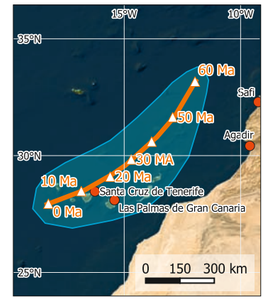
Les îles Canaries sont situées au-dessus de ce que l'on appelle le point chaud des Canaries, une région volcanique active au large de la côte nord-ouest de l'Afrique. À l'automne 2021, l'île de La Palma, qui fait partie de l'archipel espagnol des Canaries, au large de la côte ouest de l'Afrique, a connu une éruption volcanique spectaculaire.

Le 19 septembre, le volcan Cumbre Vieja, en sommeil depuis des décennies, est entré violemment en éruption. Dans un spectacle dévastateur, il a libéré des cendres et de la lave en fusion. Des rivières de lave brûlante ont dévalé les pentes du volcan, engloutissant des maisons, des fermes et des routes. Bien que l'éruption n'ait pas fait de victimes, les dégâts sont considérables. Ils ont été estimés à plus de 800 millions d'euros, y compris la destruction des infrastructures, des zones résidentielles et de l'agriculture. Plus de 2 800 bâtiments ont été détruits.

La Palma dépend fortement du tourisme, qui a souffert de l'éruption. Les recettes touristiques ont chuté d'environ 60 %, entraînant temporairement des pertes d'emplois et des fermetures d'entreprises. En outre, la destruction des terres agricoles et des infrastructures a perturbé les secteurs de l'agriculture et des transports de l'île.

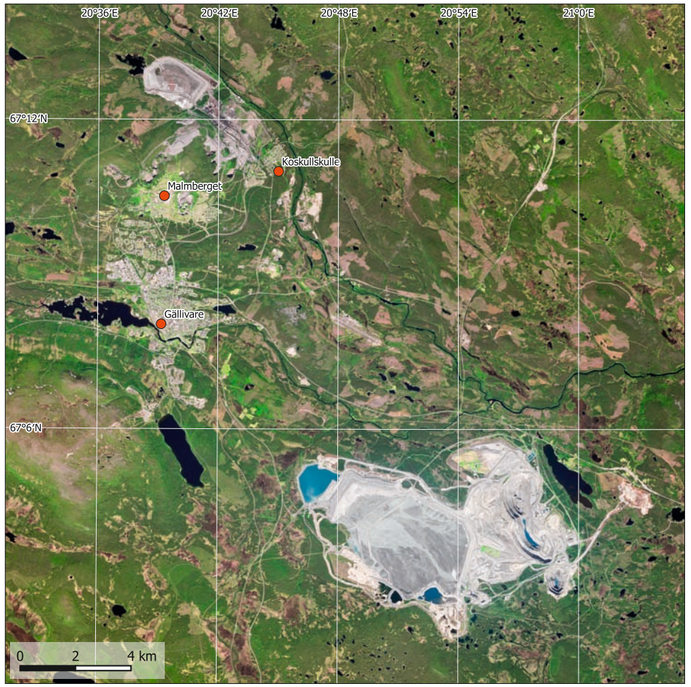


11. Mécanisme de formation des chaînes d'îles volcaniques par le volcanisme de point chaud.



12. Point chaud des îles Canaries. Au cours des 60 derniers millions d'années (Ma), le plancher océanique s'est déplacé de près de 1000 km à travers le point chaud, laissant derrière lui la chaîne des îles Canaries.

*13. La Palma est la plus jeune des grandes îles Canaries. Sa surface présente des structures volcaniques typiques telles que des cratères et des champs de lave.
Données : Sentinel-2, 2022-01-03*

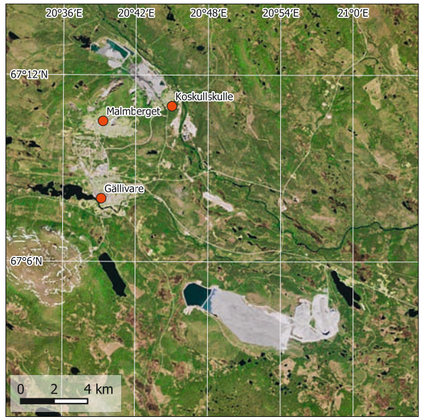


1. La mine Aitik (en bas à droite sur la image) en 2023. Image en vraies couleurs. Données : Sentinel-2, 2023-06-15.

Mine de cuivre à Aitik, Suède

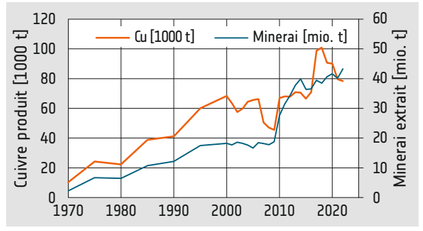
Située près de la ville de Gällivare, Aitik est une mine de cuivre à ciel ouvert. Mise en production en 1968, elle couvre aujourd'hui plus de 450 hectares et constitue l'une des plus grandes mines de cuivre d'Europe et l'une des plus efficaces au monde. L'imagerie satellitaire illustre l'évolution de l'ampleur des opérations entre 1992 et 2023. Au cours de cette période, l'extraction de minerai a été étendue à environ 39 millions de tonnes par an.

3. Vue de la structure en terrasses de la mine à ciel ouvert d'Aitik.

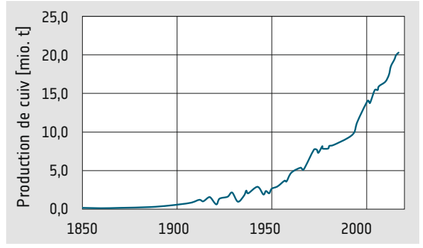


2. La mine Aitik en 1992. Image en vraies couleurs. Données : Landsat 5, 1992-06-05.

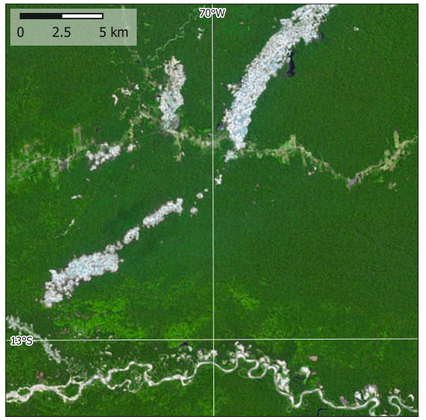
L'importance économique d'Aitik est élevée, car elle contribue de manière significative aux exportations de minéraux de la Suède, représentant près de 40 % de la production nationale de cuivre. En outre, des quantités moindres d'or, d'argent et de molybdène sont produites. Grâce à ses activités, le centre minier offre des possibilités d'emploi à des milliers de personnes au sein de la communauté locale.
En raison de leur impact sur l'environnement, les activités minières d'Aitik ont suscité des préoccupations en matière de développement durable, ce qui a entraîné la mise en place de pratiques respectueuses de l'environnement. La mine utilise des technologies de pointe pour minimiser son empreinte écologique, et des mesures ont été mises en place pour atténuer la pollution de l'eau et de l'air.



4. Évolution de la production de cuivre dans la mine d'Aitik. Au fil des années, la concentration en cuivre du minerai a diminué de moitié environ, de sorte qu'il faut extraire davantage de minerai pour obtenir la même quantité de cuivre.



5. L'évolution de la production mondiale de cuivre depuis 1850 montre une courbe quasiment exponentielle.

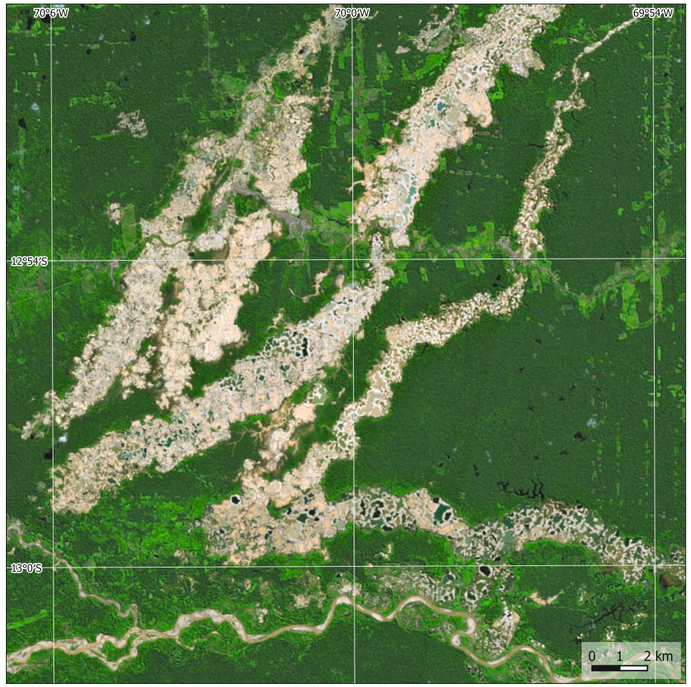


6. Extraction d'or à Madre de Dios, Pérou. Dans cette région, l'exploitation minière à petite échelle s'est intensifiée depuis 2002. Données : Landsat 5, 2011-09-03.

Extraction d'or à Madre de Dios, Pérou

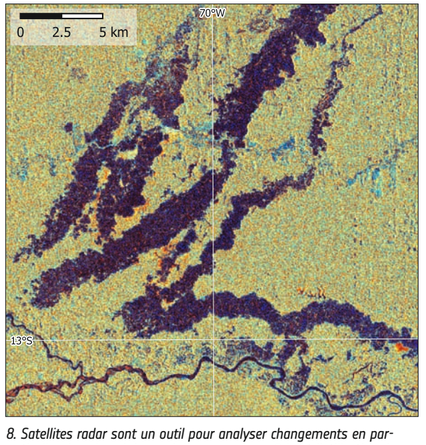
La région située le long du fleuve Madre de Dios, dans la partie du bassin amazonien située au Pérou, a connu une augmentation significative des activités minières informelles et illégales au cours des deux dernières décennies.

Ces activités minières ont eu des conséquences environnementales et sociales négatives, notamment la déforestation, la pollution par le mercure et la destruction de l'habitat, mettant en danger la faune et les communautés indigènes. L'extraction de l'or implique l'utilisation de mercure toxique. Libéré dans l'environnement, il contamine les rivières et les écosystèmes aquatiques. Entre 30 et 40 tonnes de mercure sont libérées dans la chaîne alimentaire chaque année. Cela présente de graves risques pour la santé des habitants et pour l'environnement. Environ 80 % de la population locale présente des concentrations accrues de mercure.

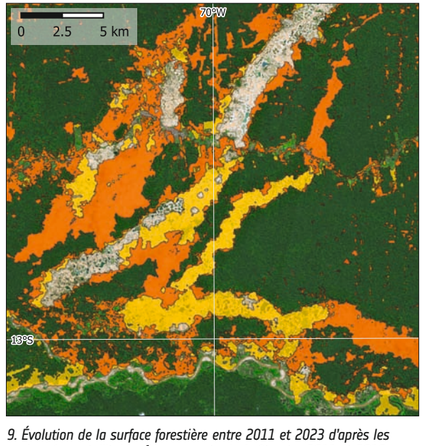


7. Extraction d'or à Madre de Dios in 2023. L'image satellite montre les zones directement affectées par l'exploitation minière. De plus, on peut voir de nouvelles zones d'habitation et des terres agricoles. Données : Sentinel-2, 2023-06-03.

Le gouvernement s'est efforcé de lutter contre ces problèmes en réglementant les activités minières. L'imagerie satellitaire joue un rôle important dans le suivi et l'évaluation de l'impact de ces initiatives, en aidant à trouver un équilibre entre le développement économique, la santé publique et la préservation de l'une des régions les plus riches en biodiversité du monde. L'avenir de l'extraction de l'or à Madre de Dios dépend de la recherche de pratiques durables qui protègent l'environnement et soutiennent les moyens de subsistance locaux.

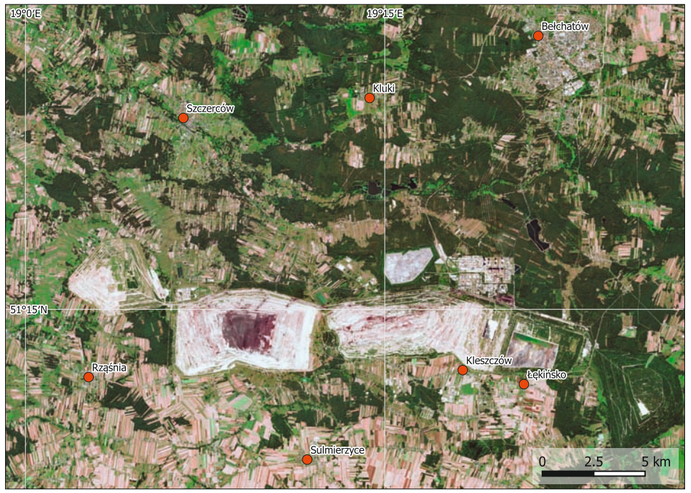


8. Satellites radar sont un outil pour analyser changements en particulier dans les régions, où les nuages empêchent l'utilisation de données optiques. Données : Sentinel-1, 2023-05-25.



9. Évolution de la surface forestière entre 2011 et 2023 d'après les données satellitaires (jaune : perte de forêt entre 2011 et 2016, orange : perte de forêt entre 2016 et 2023).

10. Vue des étangs qui subsistent après l'extraction de l'or dans la région du fleuve Madre de Dios. Les couleurs de l'eau reflètent les différentes concentrations de sédiments et d'algues.



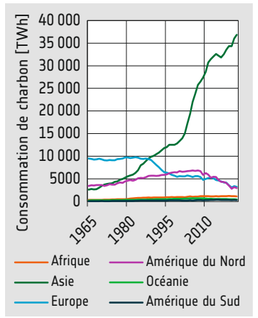
1. La mine de lignite de Bełchatów en 2023. Image en vraies couleurs. Données : Sentinel-2, 2023-08-15.

La mine de charbon de Bełchatów, Pologne

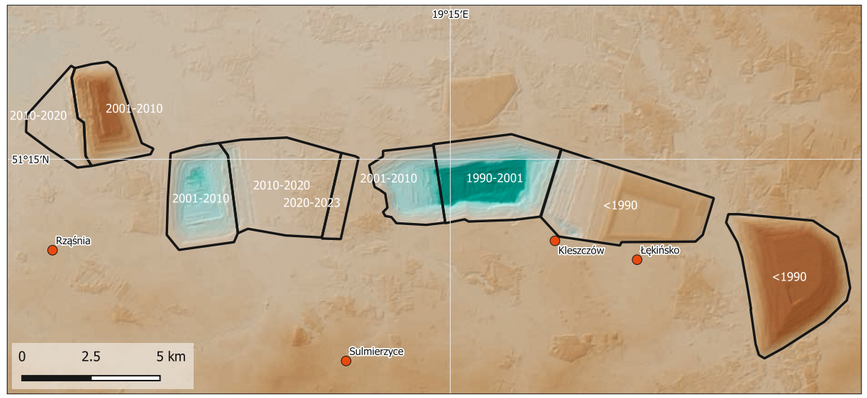
La mine de lignite de Bełchatów, située dans le centre de la Pologne, couvre une superficie de plus de 12 500 hectares. C'est l'une des plus grandes d'Europe et elle est opérationnelle depuis le milieu des années 1970.

La mine possède des réserves de plus de 2 milliards de tonnes de lignite, un charbon de faible qualité utilisé pour la production d'électricité. Le lignite produit est fourni à la centrale électrique adjacente de Bełchatów, qui consomme plus de 40 millions de tonnes de lignite par an. Avec une capacité de plus de 5,3 GW, cette centrale est l'une des plus grandes centrales thermiques d'Europe.

Comme le montrent les cartes satellites, la mine a été déplacée vers l'ouest, en suivant les gisements de charbon. Elle est confrontée à des défis environnementaux liés à l'extraction des combustibles fossiles et aux émissions de gaz à effet de serre. Avec des émissions de 30 millions de tonnes de CO2 en 2020, la centrale adjacente était le plus gros émetteur de ce gaz à effet de serre en Europe.

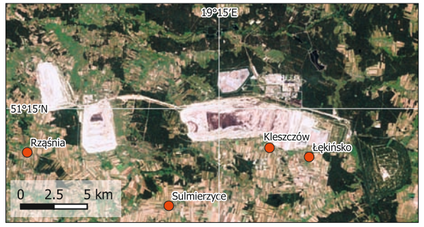


7. Développement de la consommation de charbon (houille et lignite) pour la production d'énergie.

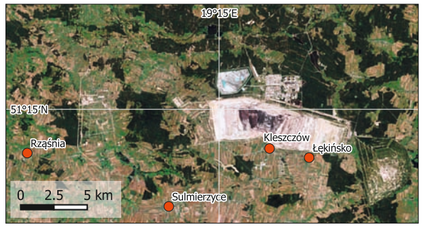


6. Les activités minières ont modifié le relief de la région de plusieurs centaines de mètres.

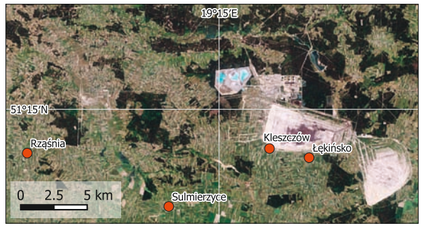
2. La mine de lignite de Bełchatów en 2020. Image en couleurs réelles. Données : Sentinel-2, 2020-07-01.



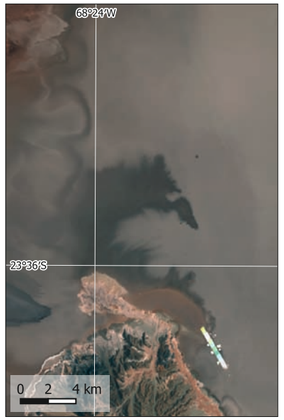
3. La mine de lignite de Bełchatów en 2010. Image en couleur réelles. Données : Landsat 5, 2010-08-22.



4. La mine de lignite de Bełchatów en 2001. Image en couleurs réelles. Données : Landsat 5, 2001-07-28.



5. La mine de lignite de Bełchatów en 1990. Image en couleur réelles. Données : Landsat 4, 1990-06-12.



8. Le salar en 1985. Les premières activités minières sont visibles. Données : Landsat 4, 1985-01-25.

9. Les zones des bassins d'évaporation en 2000. Données : Landsat 5, 2000-01-03.

10. En 2023, la superficie des bassins d'évaporation a encore augmenté. Données : Sentinel-2, 2023-01-18.

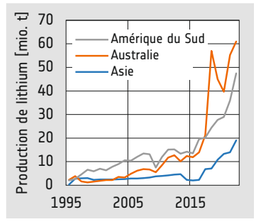
Salar d'Atacama, Chili

Avec une superficie d'environ 3050 km², le salar d'Atacama est le plus grand salar ou désert de sel du Chili. Situé dans les Andes à une altitude de 2300 m au-dessus du niveau de la mer, le salar est constitué de sels mélangés à du sable.

La région reçoit très peu de précipitations. Avec seulement 2 mm de pluie par an, elle fait partie des régions les plus sèches du monde. L'eau des montagnes environnantes, enrichie de minéraux et de sels, s'écoule vers le point le plus bas, le salar, où elle s'évapore. Ce processus a formé une masse de saumure qui descend jusqu'à 1,7 km sous la surface. Elle se compose principalement de chlorure de sodium et est riche en lithium, en potassium, en magnésium et en bore. La saumure est pompée vers la surface, où l'eau s'évapore et les sels s'enrichissent encore.

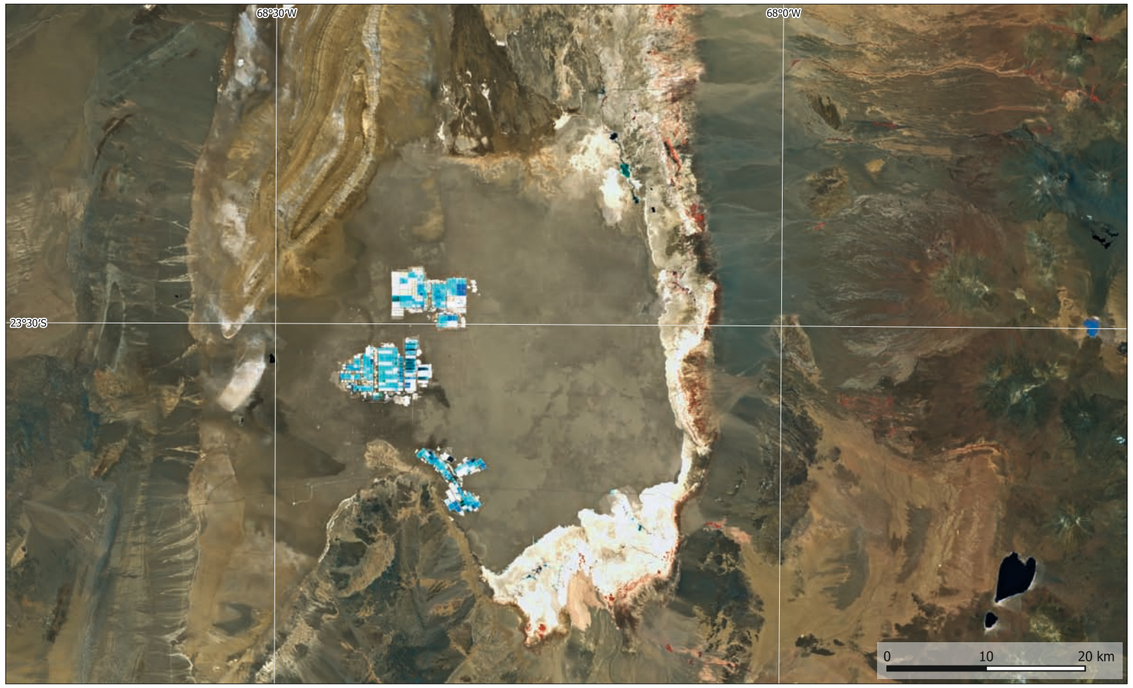
Le salar d'Atacama est l'un des sites de production de lithium les plus importants, avec environ 36 % de la production mondiale de lithium et environ 27 % des réserves de lithium connues dans le monde.

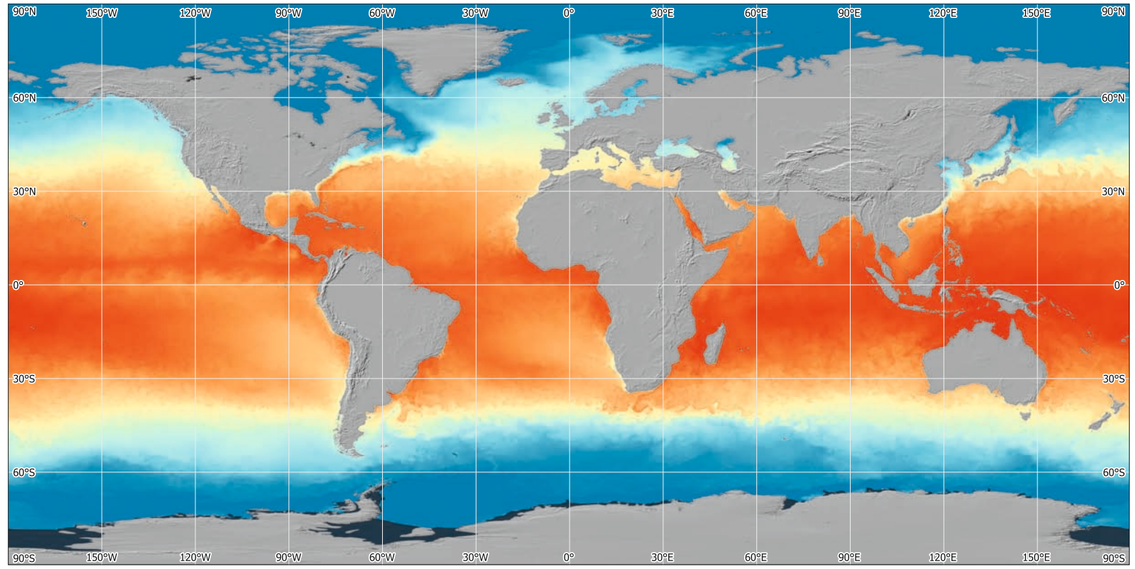
11. Vue de la croûte de sel formant la surface du salar d'Atacama.

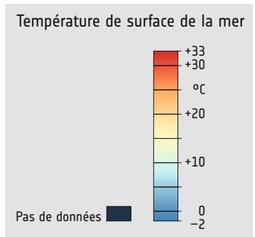


12. En quelques années, la demande croissante de véhicules électriques à batterie a entraîné une augmentation significative de la production de lithium.

13. L'image en fausses couleurs infrarouges montre la végétation en rouge. Dans cet environnement aride, seules de petites taches de végétation sont visibles le long de la bordure orientale de la plaine salée. Sentinel-2, 2023-01-18.





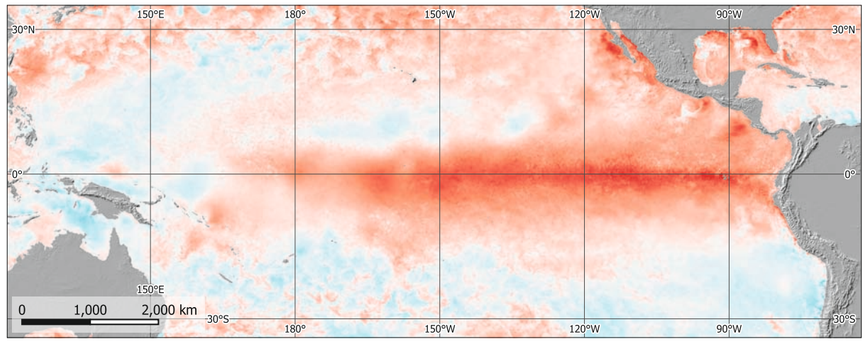


1. Températures de surface de la mer, 2023-01-01.

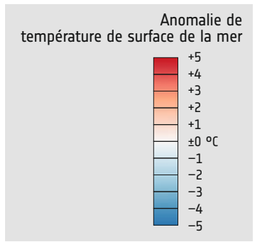
Température de surface de la mer (SST)

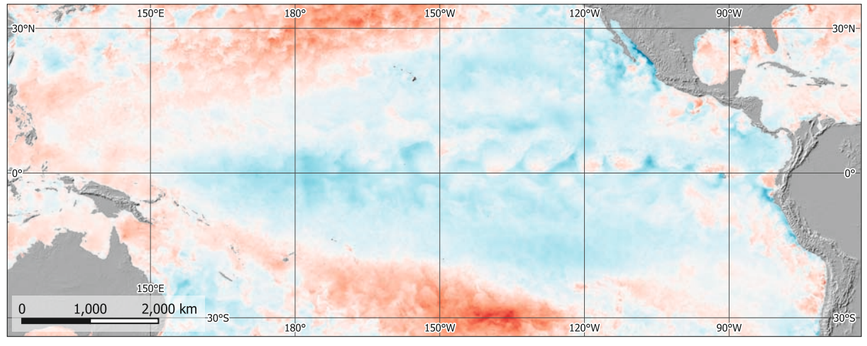
Les températures de surface de la mer (SST) sont un élément essentiel du système climatique, car elles influencent les conditions météorologiques, la circulation océanique et la dynamique des écosystèmes. La SST présente un schéma zonal, avec des températures plus chaudes près de l'équateur et des températures plus froides vers les pôles. Lors d'un changement saisonnier, ces zones sont déplacées vers le nord ou le sud. Les différences de température déterminent la circulation atmosphérique et océanique et façonnent les schémas climatiques.

Par rapport à l'atmosphère, les masses d'eau peuvent stocker de grandes quantités d'énergie et jouent un rôle important de tampon énergétique dans le contexte du changement climatique. Bien qu'à un rythme plus lent, la température des océans a augmenté d'environ 0,8 °C entre 1950 et 2020. Ce entraîne une dilatation thermique de l'eau, qui est un des principaux facteurs de l'élévation du niveau de la mer à l'échelle mondiale.



3. Anomalie de température de surface de la mer dans l'océan Pacifique équatorial lors d'un épisode El Niño, 2015-12-25.





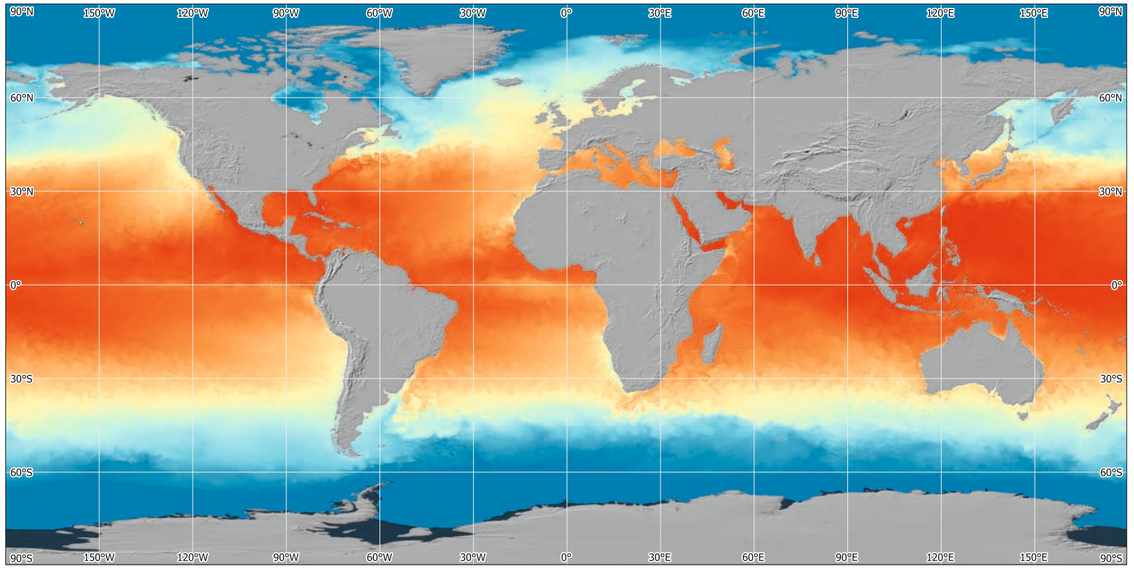
4. Anomalie de température de surface de l'océan Pacifique équatorial lors d'un épisode La Niña, 2011-12-25.

El Niño et La Niña

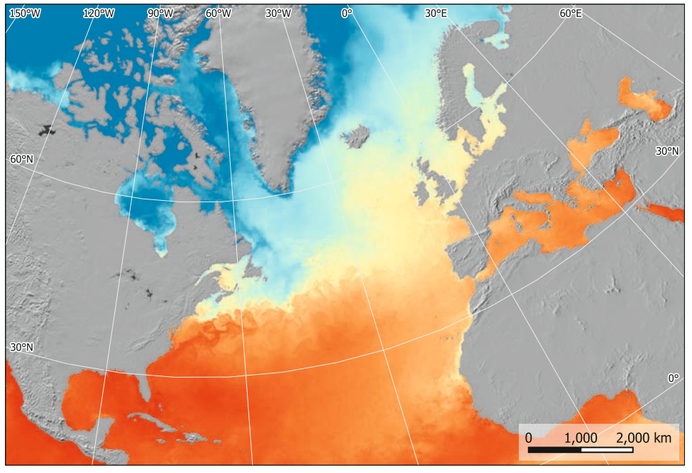
L'oscillation australe El Niño (ENSO) est un phénomène important lié à la SST. L'ENSO est un cycle climatique naturel caractérisé par le réchauffement (El Niño) et le refroidissement (La Niña) périodiques des températures de surface de la mer dans l'océan Pacifique équatorial. Lors des épisodes El Niño, des SST plus chaudes que la moyenne se développent dans le centre et l'est du Pacifique, ce qui modifie les schémas de circulation atmosphérique et influe sur les conditions météorologiques dans le monde entier. À l'inverse, les épisodes La Niña se caractérisent par des SST plus froides que la moyenne dans la même région, ce qui entraîne des effets climatiques contrastés, tels qu'une augmentation des précipitations dans certaines régions et une sécheresse dans d'autres.

Gulf Stream et courant de l'Atlantique Nord

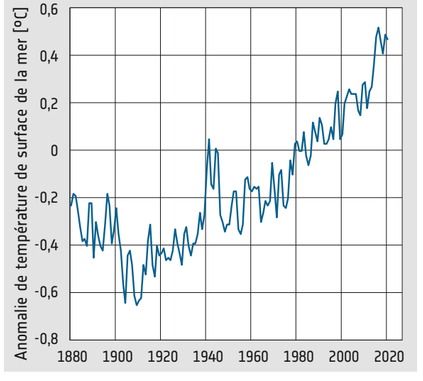
Le Gulf Stream est un puissant courant océanique dans l'océan Atlantique Nord, qui transporte les eaux chaudes du golfe du Mexique vers le nord-est des États-Unis et l'ouest de l'Europe. Ce courant chaud influence considérablement les SST le long de sa trajectoire, contribuant ainsi au climat relativement doux des régions côtières de ces régions. Le Gulf Stream joue également un rôle crucial dans la régulation du climat mondial en redistribuant la chaleur des tropiques vers les latitudes plus élevées, influençant ainsi les conditions météorologiques et la circulation océanique bien au-delà des régions passés.



2. Températures de surface de la mer, 2023-07-01.



5. Le Gulf Stream et l'Atlantique Nord qui s'étend de la Floride en Amérique du Nord à la Scandinavie en Europe du Nord sont visibles dans la température de surface de la mer (2014-01-01).



6. La température moyenne globale de la surface de la mer montre une nette augmentation. Au cours des 50 dernières années, l'augmentation a été d'environ 0,8 degré Celsius.

1. Vue satellite de la vallée du Nil.

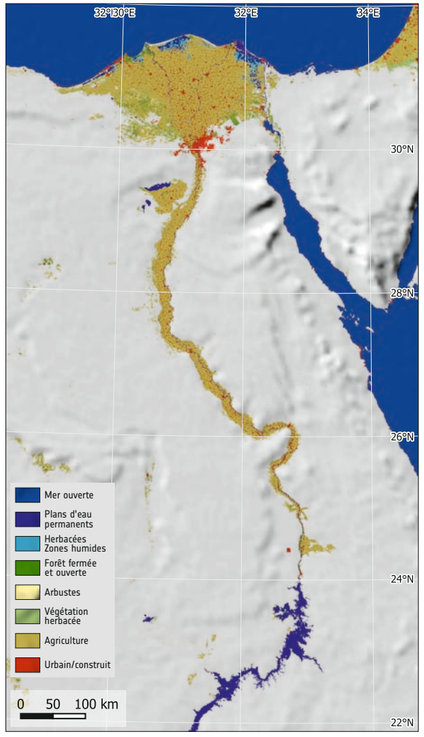
Le fleuve Nil

Le littoral à l'embouchure du Nil en Égypte près d'Alexandrie est principalement défini par l'équilibre entre le dépôt de sédiments par le Nil et leur évacuation par la mer Méditerranée.

La charge sédimentaire du Nil a été considérablement réduite par le haut barrage d'Assouan, situé à environ 1000 km en amont, qui a été achevé en 1970. Avant la construction du barrage, le delta du Nil recevait une charge sédimentaire annuelle d'environ 130 millions de tonnes. Aujourd'hui, ce chiffre n'est plus que de 16 à 20 millions de tonnes, ce qui entraîne une diminution de la reconstitution naturelle du littoral.

Au cours du siècle dernier, la mer Méditerranée a connu une élévation moyenne du niveau de la mer d'environ 3,4 millimètres par an en raison du réchauffement climatique. Il en résulte une augmentation supplémentaire et substantielle de l'érosion côtière et de la vulnérabilité aux ondes de tempête.

Sur la base de données satellitaires, l'érosion côtière autour d'Alexandrie a été estimée à environ 1 mètre par an dans certaines zones. Ce taux d'érosion rapide menace les infrastructures, les communautés côtières et les terres agricoles. Alexandrie est la deuxième ville d'Égypte et compte plus de 5 millions d'habitants. De nombreux habitants dépendent de l'agriculture, de la pêche et du tourisme, qui sont tous directement ou indirectement affectés par les changements du littoral. C'est pourquoi l'Égypte lutte contre l'érosion côtière autour d'Alexandrie et a, par exemple, dépensé 21 millions d'euros en 2018 pour cette tâche.



2. Carte de l'occupation des sols de la vallée du Nil.

3. Delta du Nil, Égypte, près de Rosette en 1985. Données : Landsat 5, 1985-06-10.

4. Delta du Nil près de Rosette. Superposition : changement du trait de côte entre 1985 et 2023. Données : Sentinel-2, 2023-06-25.

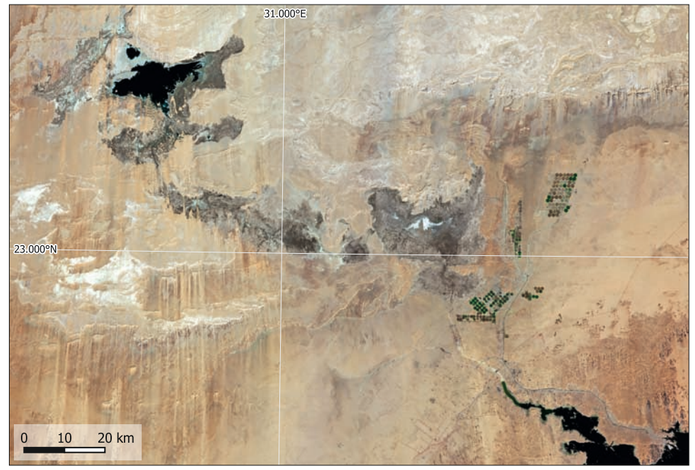
5. Vue de Damiette sur la rive du Nil.

Projets à grande échelle le long du Nil

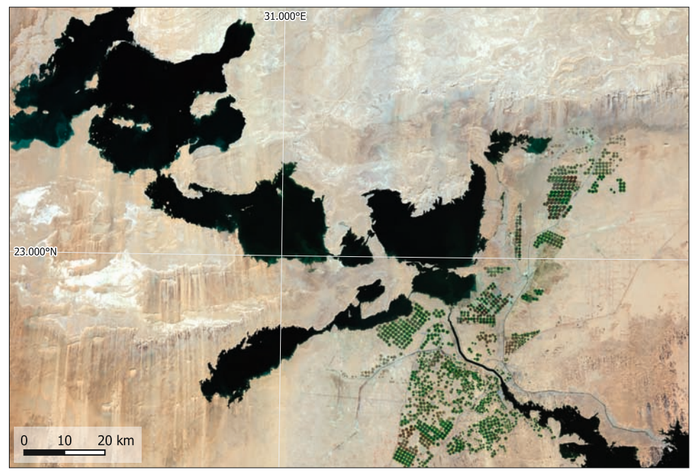
La Nouvelle Vallée, qui couvre une superficie d'environ 440 000 kilomètres carrés, a connu un développement agricole important. Englobant la dépression de Toshka et les terres adjacentes le long du fleuve du Nil, la vallée a fait l'objet du projet eau Toshka, lancé à la fin du XXe siècle.

Le projet Toshka visait à détourner de l'eau du lac Nasser pour irriguer plus que 540 000 hectares de terres désertiques dans la Nouvelle Vallée, dans le but de créer de nouvelles terres agricoles. Le projet prévoyait la construction de canaux et d'infrastructures pour faciliter l'irrigation et le trafic dans la region. Après des succès initiaux, le projet Toshka a été confronté à une série de difficultés et, en 2011, on estimait que seule une fraction de la zone prévue était cultivée. Entre-temps, les efforts ont été redoublés et ont conduit à une augmentation significative de la surface cultivée.

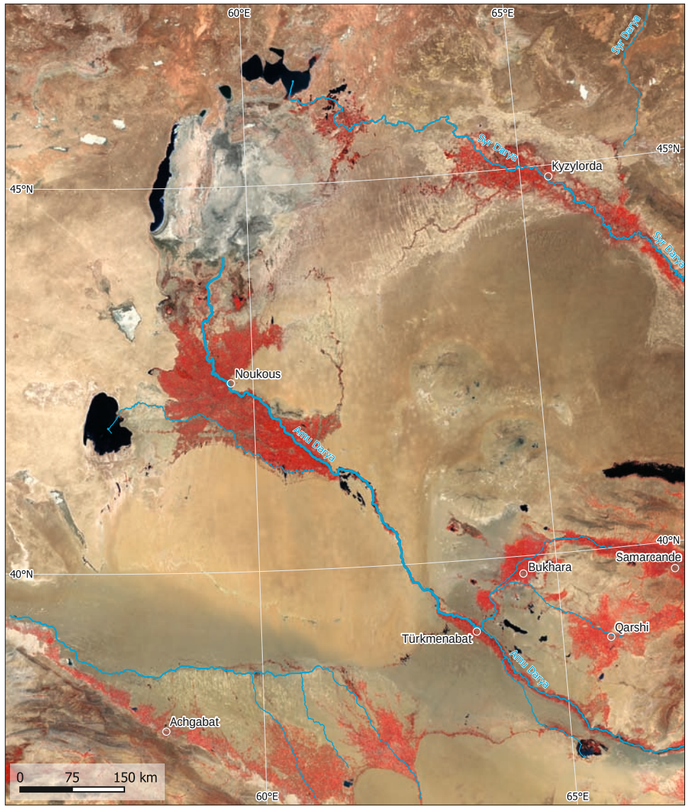
Pour comprendre l'ampleur et l'impact de ce projet, les images satellites sont un outil précieux. Au fil des ans, la technologie satellitaire a permis de suivre l'évolution de l'utilisation des sols et de la végétation. Les images satellite sont utilisées pour analyser la transformation du paysage et fournir une représentation visuelle des succès et des échecs des initiatives agricoles dans la Nouvelle Vallée.



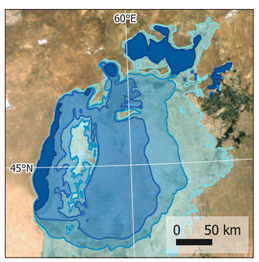
6. Nouvelle Vallée, Égypte, en 2017. Données : Sentinel-2, 2017-11-05.



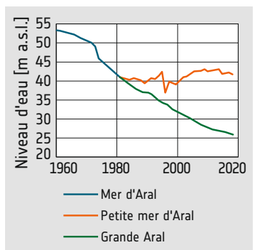
7. Nouvelle Vallée, Egypte, en 2022. Données : Sentinel-2, 2022-11-14.



1. L'image en fausses couleurs infrarouges de la région autour de la mer d'Aral montre où l'eau de ses affluents est utilisée pour l'irrigation (mosaïque Sentinel-2, données acquises au cours du premier trimestre 2023).



2. Superficie de la mer d'Aral en 1964, 1987, 2000 et 2023, d'après les données satellitaires.

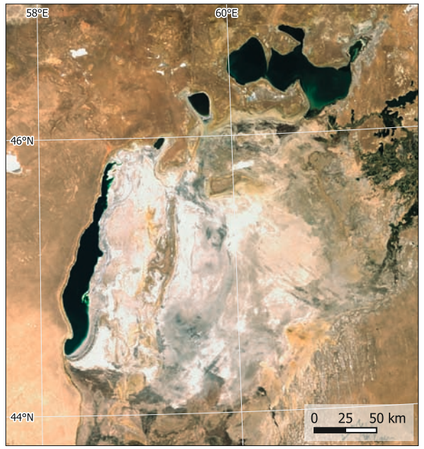


3. Le niveau d'eau de la mer d'Aral. La partie nord a été stabilisée par un barrage.

Mer d'Aral

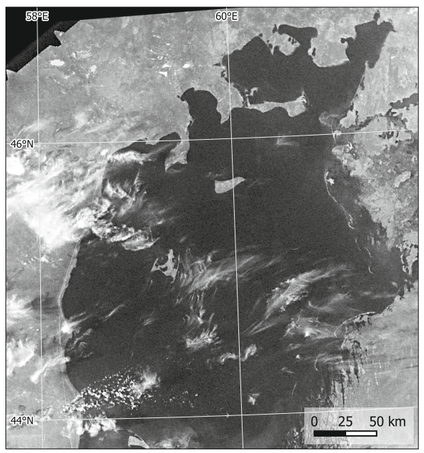
Depuis les années 1960, la mer d'Aral s'est considérablement rétrécie. Ce phénomène est principalement dû au détournement de l'eau des deux principaux fleuves qui l'alimentent, l'Amu Darya et le Syr Darya, à des fins d'irrigation agricole. L'Union soviétique a lancé des projets d'irrigation à grande échelle pour cultiver le coton et d'autres produits dans cette région aride, détournant ainsi l'eau de la mer d'Aral.

Le rétrécissement de la mer d'Aral a eu des conséquences environnementales et sociales. La baisse du niveau de l'eau a entraîné une augmentation de la salinité du lac. Les populations de poissons ont considérablement diminué, entraînant l'effondrement de l'industrie de la pêche dans la région. La poussière salée provenant du lit asséché du lac s'est répandue dans l'air, entraînant une augmentation des problèmes de santé respiratoire et de l'incidence d'autres maladies. L'effondrement de l'industrie de la pêche et la dégradation des terres agricoles ont des conséquences économiques pour les populations vivant autour de la mer d'Aral. Des villages de pêcheurs autrefois prospères ont été abandonnés, entraînant chômage et pauvreté dans la région.

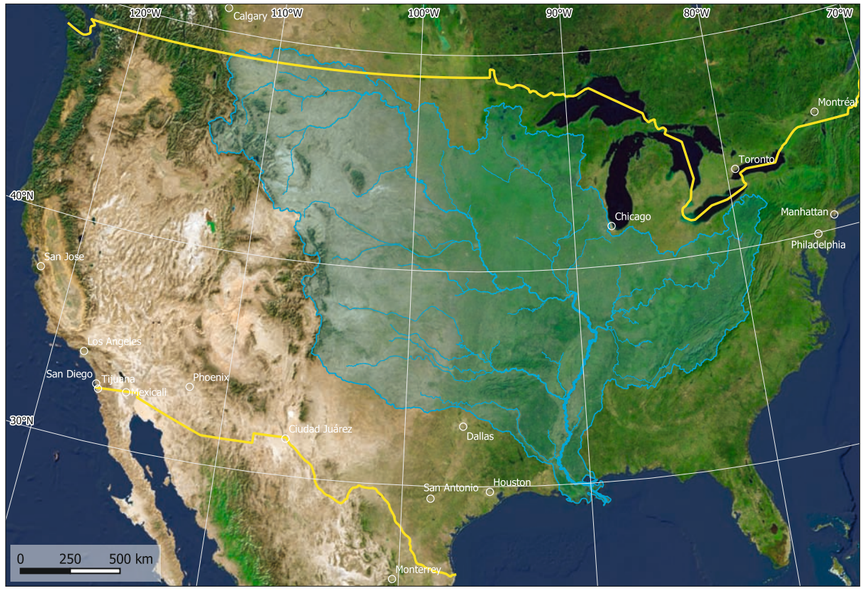


4. Mer d'Aral en 2023. Seules la partie profonde à l'ouest et la mer d'Aral du Nord subsistent. Données : Sentinel-2.

5. Mer d'Aral en 1987. Données : Landsat-4.



6. Prise en 1964 par le satellite de reconnaissance Argon, cette image est une source importante pour documenter les changements de la mer d'Aral.



7. Le bassin versant du fleuve Mississippi couvre une grande partie de la superficie des États-Unis.

8. Un réseau dense de plateformes de forage offshore et d'oléoducs a été installé pour exploiter les riches réserves de pétrole du golfe du Mexique. Données : Sentinel-2, 2023-04-22.

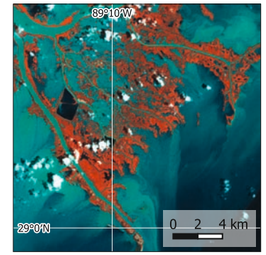
Delta du Mississippi

Les changements d'utilisation des terres dans le bassin versant du Mississippi et son delta ont modifié le paysage et l'hydrologie, avec des implications pour l'environnement et la population humaine. Environ 80 % des zones humides originelles du delta du Mississippi ont disparu en raison de la conversion des terres à l'agriculture, de l'urbanisation et du développement des infrastructures.

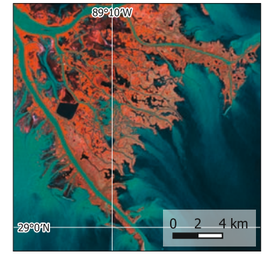
Environ 60 % de la charge sédimentaire du fleuve Mississippi est piégée derrière des barrages, ce qui réduit l'apport de sédiments dans le delta et aggrave l'affaissement des sols. L'urbanisation le long du fleuve a fragmenté les habitats naturels et augmenté les surfaces imperméables, entraînant une augmentation des volumes de ruissellement et des risques d'inondation dans la region. La ville de la Nouvelle-Orléans, située dans le delta du Mississippi, est particulièrement vulnérable aux inondations. Plus de 40 % de ses terres sont situées sous le niveau de la mer. L'industrie pétrolière est un moteur économique dans la région, avec des plateformes de forage offshore, des raffineries et des usines pétrochimiques. Cette industrie présente des risques pour l'environnement, notamment la destruction des habitats, la pollution et les risques de marée noire. La marée noire de Deepwater Horizon en 2010, par exemple, a libéré environ 4,9 millions de barils de pétrole dans le golfe du Mexique.

Les ouragans constituent une menace récurrente pour cette region. L'ouragan Katrina en 2005 et l'ouragan Harvey en 2017 ont causé des milliards de dollars de dégâts et de pertes humaines. La perte de zones humides et l'érosion côtière ont réduit les barrières naturelles protégeant la côte, laissant les communautés plus vulnérables aux ondes de tempête et aux inondations.

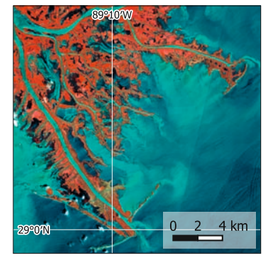
9. Des images satellites acquises depuis 1985 illustrent la dynamique du delta du fleuve Mississippi.



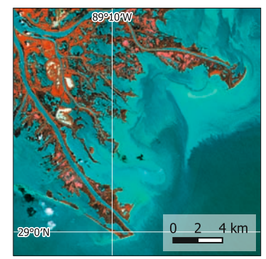
9a. Données : Landsat 4, 1985-05-04.



9b. Données : Landsat 5, 1995-07-19.

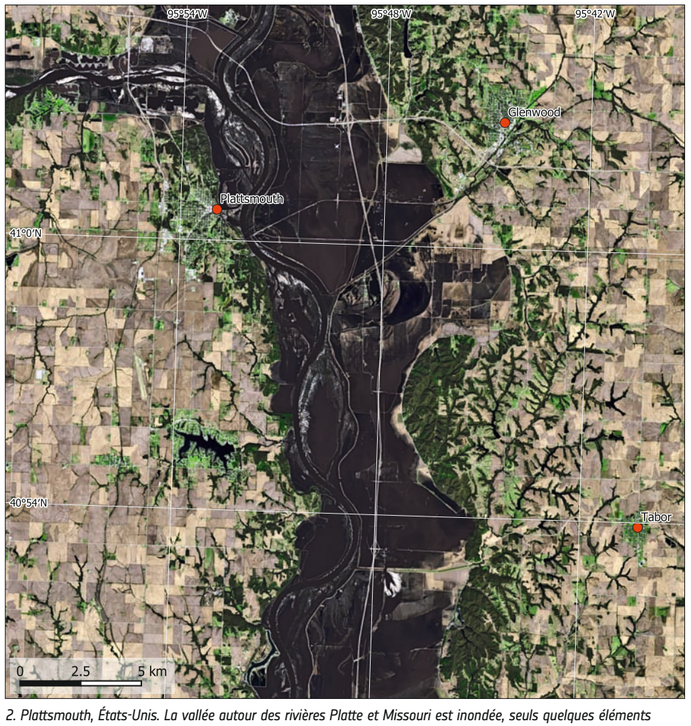


9c. Données : Sentinel-2, 2017-05-08.



9d. Données : Sentinel-2, 2023-05-12.

1. Plattsmouth, États-Unis. Données : Sentinel-2, 2023-03-21.



2. Plattsmouth, États-Unis. La vallée autour des rivières Platte et Missouri est inondée, seuls quelques éléments d'infrastructure comme les autoroutes et les barrages restent secs. Données : Sentinel-2, 2019-03-31.

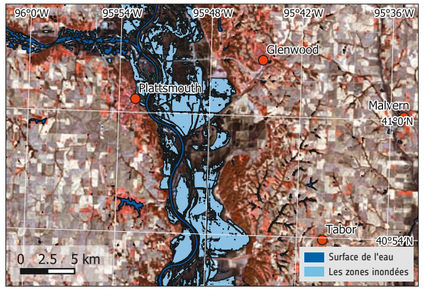
Plattsmouth, États-Unis

Les inondations de 2019 autour de Plattsmouth, dans le Nebraska, ont été un événement catastrophique qui a causé d'immenses dégâts dans la région. Déclenchées par une combinaison de facteurs, notamment de fortes pluies et la fonte des neiges, les inondations ont submergé des maisons, des fermes et des infrastructures le long de la rivière Missouri.

Le changement climatique a joué un rôle dans cet événement, car la hausse des températures mondiales entraîne des phénomènes météorologiques plus extrêmes, avec des précipitations plus abondantes et un risque accru d'inondations. Dans le cas de Plattsmouth, la région a connu des précipitations record, certaines zones ayant reçu plus de 50 cm de pluie en un seul mois. Ces précipitations excessives, combinées à la saturation du sol due aux précipitations antérieures, ont dépassé la capacité de la rivière à contenir l'eau.

Les inondations ont touché plus de 2 000 foyers et forcé l'évacuation de près de 1 000 personnes dans la région de Plattsmouth. Elles ont causé des millions de dollars de dégâts aux habitations, aux infrastructures et à l'agriculture, perturbant la vie d'innombrables habitants.

Les images satellite ont montré l'expansion spectaculaire des eaux de crue, qui ont englouti des communautés entières et de vastes étendues de terres agricoles. En outre, les données permettent d'estimer avec précision les zones touchées et les dommages causés par l'inondation.



3. Plattsmouth. Superposition : surfaces d'eau dérivées de données satellitaires. Image en fausses couleurs infrarouges. Données : Sentinel-2, 2019-03-31.

4. Vue de Plattsmouth pendant l'inondation.

Venise, Italie

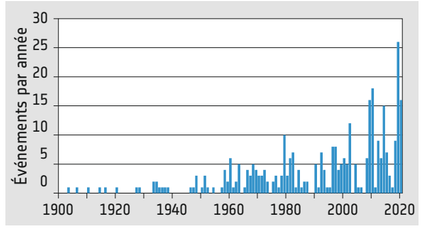
Venise, la célèbre « ville flottante » d'Italie, a été construite sur des centaines d'îles dans une lagune près de la mer Adriatique. En raison de cette situation exposée, la ville est depuis longtemps confrontée à des inondations provenant à la fois de la mer et du continent.

Pour réduire le risque croissant d'inondation par la mer, le gouvernement italien a décidé d'installer le MOSE (Modulo Sperimentale Elettromeccanico, module électromécanique expérimental), un système innovant de protection contre les inondations.

Le MOSE consiste en trois barrières hydrauliques installées aux entrées de la lagune vénitienne. Deux de ces entrées sont visibles sur l'image satellite d'aperçu. Lorsque le niveau de l'eau monte, des capteurs activent le système, qui remplit les barrières d'air comprimé et forment une barrière solide contre les marées hautes et les ondes de tempête.

Le système MOSE intègre des technologies de pointe pour la surveillance et le contrôle tout en tenant compte de l'équilibre écologique de la lagune. En tant qu'exemple pionnier de l'adaptation au changement climatique, le MOSE montre comment les villes côtières peuvent s'adapter aux risques liés à l'élévation du niveau de la mer, mais aussi à l'ampleur de l'effort d'adaptation.

Jusqu'à présent, le MOSE a été activé avec succès à plusieurs reprises. La carte satellite de 2022 montre un exemple du système dans son état d'activation.

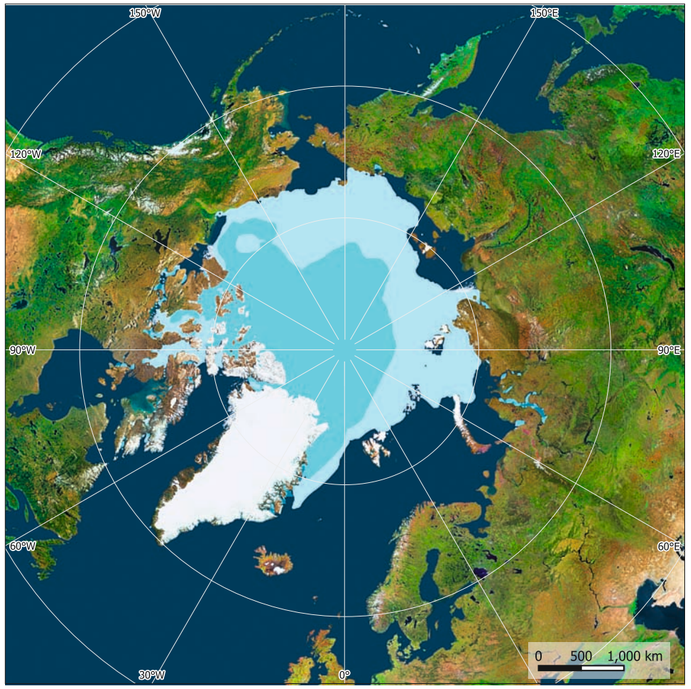


5. Venise. Évolution du nombre d'événements d'acqua alta (niveaux d'eau élevés) par an.

6. Venise. Vue de la barrière fermée du MOSE près de Malamocco au sud du Lido.

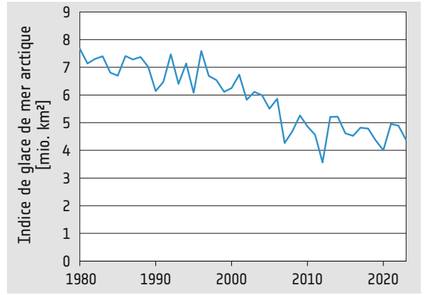
7. Venise, Italie. Image acquise alors que les barrières d'inondation du MOSE étaient fermées. Données : Sentinel-2, 2022-11-24.

8. Venise, Italie, lorsque les barrières de MOSE sont ouvertes. Les différences de couleur de la mer dues aux différentes concentrations de sédiments indiquent la présence de courants marins. Données : Sentinel-2, 2021-11-04.



Étendue minimale de la glace de mer
1980 (septembre)
2020 (septembre)

1. La dynamique de la glace de mer dans la région arctique.



2. Évolution de la superficie de l'Arctique couverte par la glace de mer au cours du mois de septembre (c'est-à-dire au cours du mois où l'étendue de la glace de mer est la plus faible).

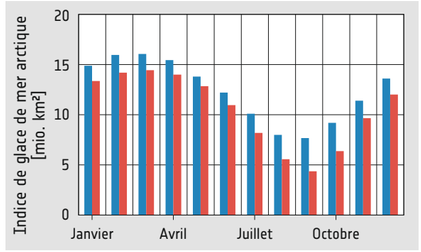
Glace de mer arctique

La glace de mer arctique est un élément essentiel du système climatique de la Terre et contribue à réguler les températures mondiales. Couvrant environ 14 millions de kilomètres carrés à son maximum en hiver, elle forme un bouclier réfléchissant qui renvoie le rayonnement solaire et refroidit ainsi la planète. Pendant les mois d'été, la glace de mer arctique diminue pour atteindre son niveau le plus bas vers le mois de septembre.

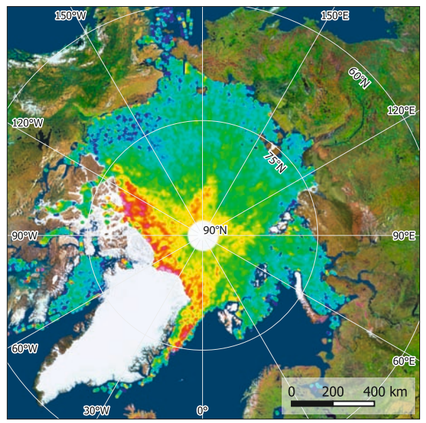
La glace de mer arctique a diminué ces dernières années en raison du changement climatique. Son étendue minimale pendant les mois d'été a reculé pour atteindre environ 3 à 4 millions de kilomètres carrés. En outre, l'épaisseur de la glace de mer arctique a diminué de plus de 40 % depuis les années 1980, principalement en raison des effets du réchauffement climatique.

La diminution de la glace de mer arctique contribue à perturber les schémas météorologiques, influence la circulation océanique et menace les habitats de diverses espèces arctiques, notamment les ours polaires et les morses. D'autre part, la disparition de la glace de mer ouvre des perspectives pour les routes maritimes et l'extraction des ressources.

Les données satellitaires jouent un rôle important dans la surveillance de la glace de mer et fournissent des mesures de l'étendue, de l'épaisseur et du mouvement de la glace.

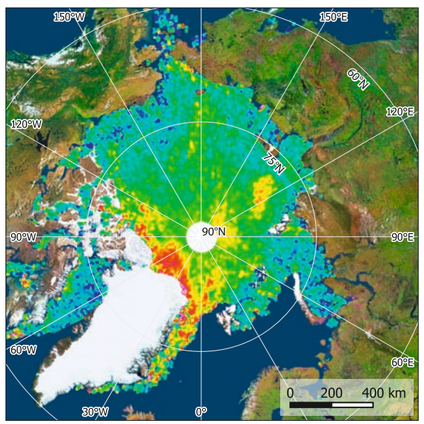


3. Variation saisonnière de l'étendue de la glace de mer dans l'Arctique (couverture de glace de mer : bleu : 1980, rouge : 2023).



Épaisseur de la glace de mer
3,50
3,00
2,00
1,00
0,00

4. Épaisseur de la glace de mer arctique en janvier 2011. Moyenne mensuelle dérivée des données acquises par CryoSat.



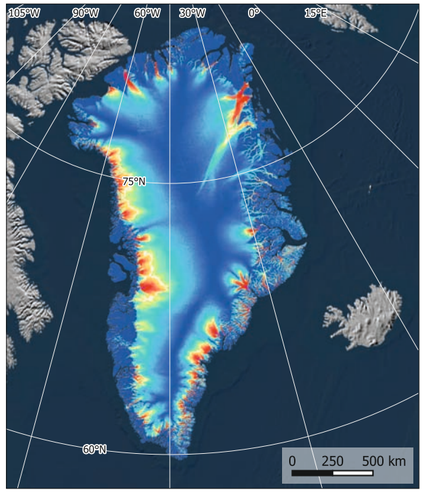
5. Epaisseur de la glace de mer arctique en janvier 2024. Moyenne mensuelle dérivée des données acquises par CryoSat.

Calotte glaciaire du Groenland

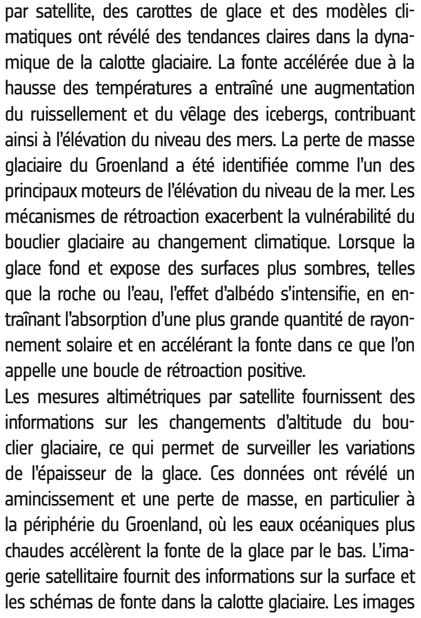
Faisant partie de la région arctique, la calotte glaciaire du Groenland est la deuxième plus grande au monde. Couvrant 1,7 millions de kilomètres carrés, soit 80 % de la superficie de l'île, il s'agit de l'un des plus grands réservoirs de glace d'eau douce et joue un rôle important pour le climat mondial et le niveau de la mer. La calotte glaciaire du Groenland atteint une épaisseur de plus de 3 kilomètres, abritant un volume de glace équivalent à environ 7,2 mètres d'élévation du niveau de la mer. Sa masse exerce une influence considérable sur les conditions météorologiques régionales et les courants océaniques.

Des recherches scientifiques utilisant des observations par satellite, des carottes de glace et des modèles climatiques ont révélé des tendances claires dans la dynamique de la calotte glaciaire. La fonte accélérée due à la hausse des températures a entraîné une augmentation du ruissellement et du vêlage des icebergs, contribuant ainsi à l'élévation du niveau des mers. La perte de masse glaciaire du Groenland a été identifiée comme l'un des principaux moteurs de l'élévation du niveau de la mer. Les mécanismes de rétroaction exacerbent la vulnérabilité du bouclier glaciaire au changement climatique. Lorsque la glace fond et expose des surfaces plus sombres, telles que la roche ou l'eau, l'effet d'albédo s'intensifie, en entraînant l'absorption d'une plus grande quantité de rayonnement solaire et en accélérant la fonte dans ce que l'on appelle une boucle de rétroaction positive.

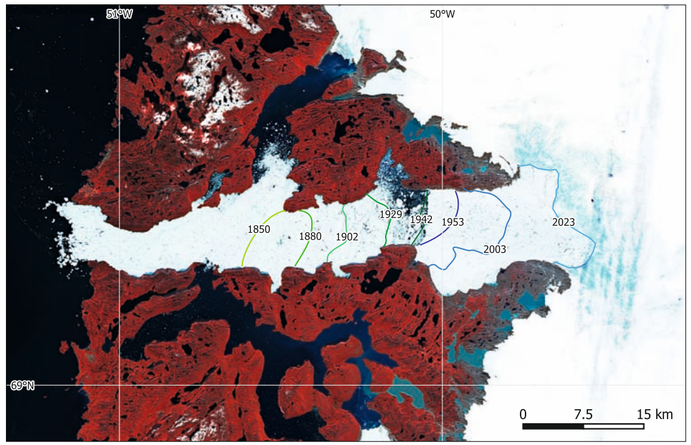
Les mesures altimétriques par satellite fournissent des informations sur les changements d'altitude du bouclier glaciaire, ce qui permet de surveiller les variations de l'épaisseur de la glace. Ces données ont révélé un amincissement et une perte de masse, en particulier à la périphérie du Groenland, où les eaux océaniques plus chaudes accélèrent la fonte de la glace par le bas. L'imagerie satellitaire fournit des informations sur la surface et les schémas de fonte dans la calotte glaciaire. Les images optiques et radar à haute résolution capturent des détails tels que les crevasses, les bassins de fonte et les lacs supraglaciaires, qui influencent le développement de la calotte glaciaire. La télédétection par satellite radar permet de surveiller les mouvements de la calotte glaciaire grâce à des techniques telles que le radar interférométrique à synthèse d'ouverture (InSAR). En mesurant avec précision les changements d'élévation de la surface, l'InSAR fournit des informations sur les vitesses d'écoulement de la glace.



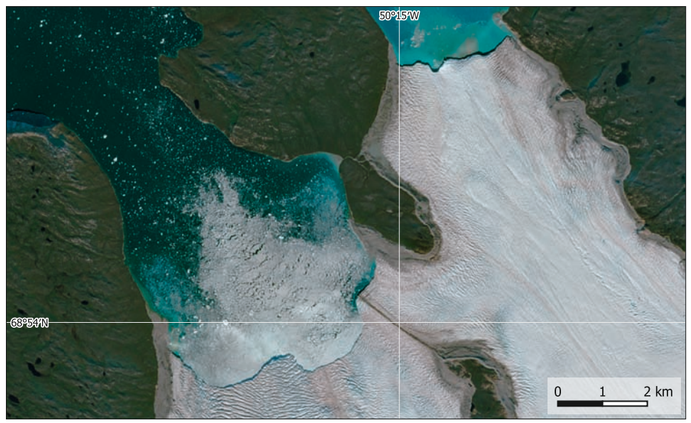
7. Groenland, Vitesse de la calotte glaciaire en 2020. Données : Sentinel-1.



6. Groenland, Perte de glace cumulée et sa contribution à l'élévation du niveau de la mer (Source des données : IMBIE).

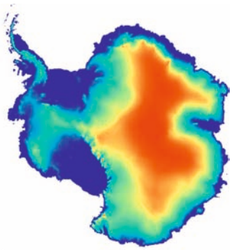


8. Jakobshavn Isbrae, Groenland. Image en fausses couleurs infrarouges. La superposition montre le recul du bord du glacier depuis 1850. Données : Sentinel-2, 2023-09-01.

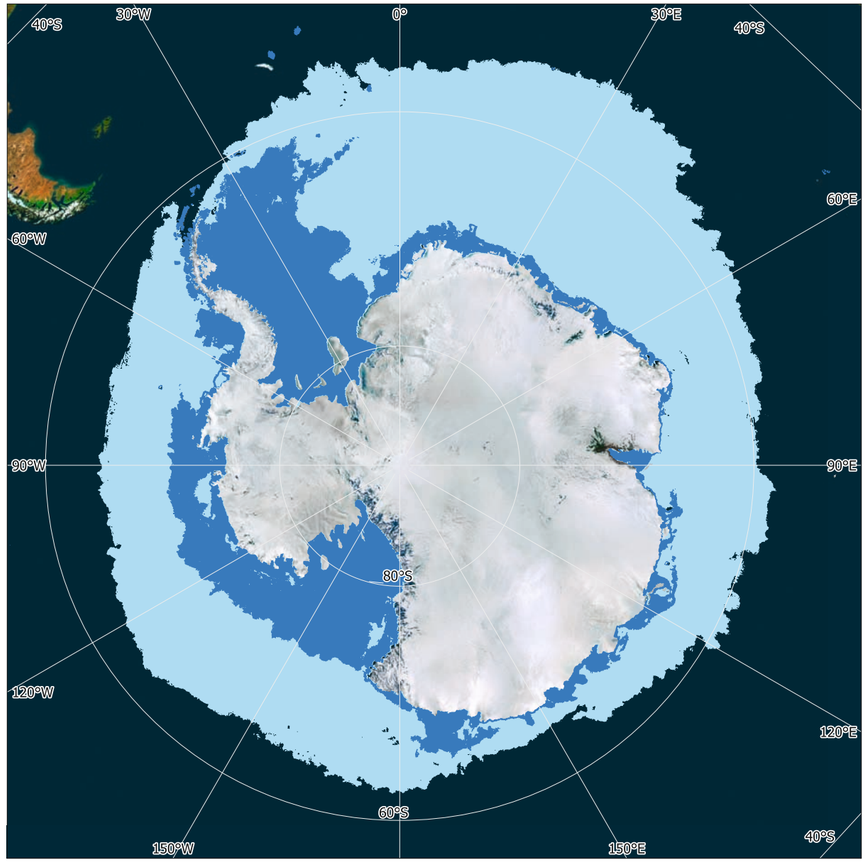


9. Groenland, bord d'un glacier au sud de Jakobshavn Isbrae. Données : Sentinel-2, 2023-09-01.

1. Étendue de la glace de mer autour de l'Antarctique en janvier et en juillet.



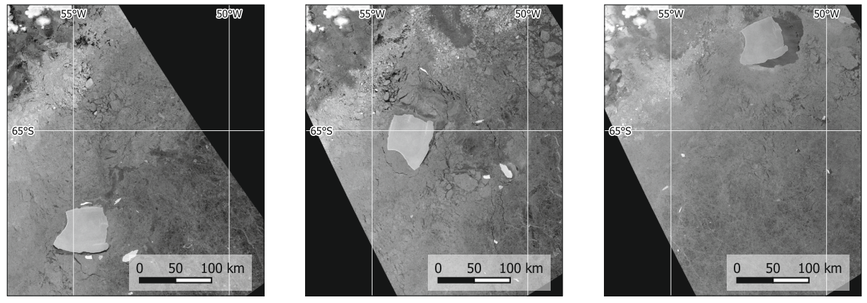
2. Élévation de la calotte glaciaire de l'Antarctique mesurée par CryoSat.



Antarctique

Au cours des dernières décennies, l'Antarctique, le plus grand désert de la planète, a fait l'objet d'une attention croissante de la part des communautés scientifiques et politiques. Cela s'explique par son importance pour le climat et les conséquences du changement climatique.
La calotte glaciaire de l'Antarctique est le plus grand réservoir d'eau douce de la planète, contenant plus de 26 millions de kilomètres cubes, soit 70 % de toute l'eau douce. Le réchauffement climatique entraîne la fonte du bouclier de glace, qui affecte jusqu'à présent principalement la calotte de l'Antarctique occidental, plus petit. Entre 2012 et 2017, 220 milliards de tonnes de glace ont fondu chaque année, contribuant ainsi à l'élévation du niveau de la mer.

Les platesformes glaciaires se situent à l'endroit où les glaciers de l'Antarctique rencontrent l'océan Antarctique. Les platesformes glaciaires sont de grandes masses de glace stables flottant sur l'eau, généralement de 100 à plusieurs centaines de mètres d'épaisseur. Le réchauffement des océans réduit la stabilité des plateformes de glace et entraîne le vêlage de grands icebergs.



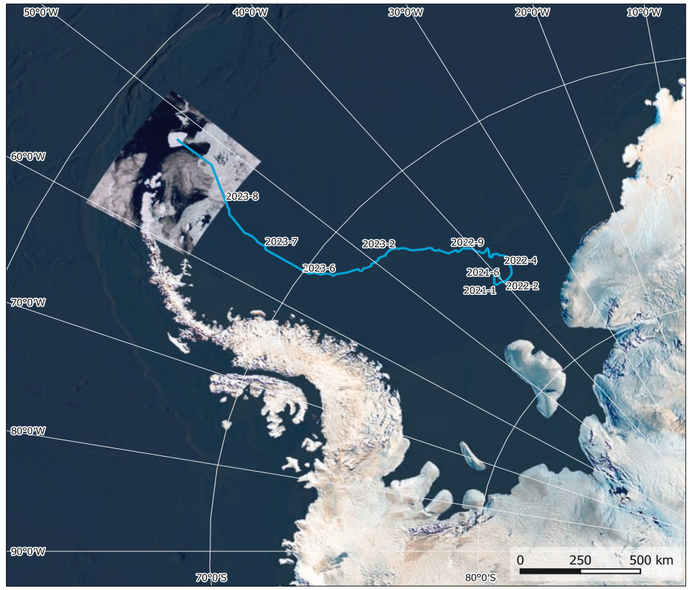
3. Mouvement de l'iceberg A23a entre août et octobre 2023, images prises par Sentinel-1.
A gauche: 2023-08-06
Au centre: 2023-09-13
A droite: 2023-10-19

Icebergs en mouvement

Le grand iceberg tabulaire A23a a vêlé de la plate-forme glaciaire Filchner-Ronne en 1986. Après son vêlage, la base de recherche Druzhnaya I, qui était placée sur cet iceberg, a dû être enlevée et a été rebaptisée Druzhnaya III. Pendant de nombreuses années, l'iceberg est resté bloqué sur le fond marin avant de commencer à bouger en 2020. Avec une superficie de près de 4 000 kilomètres carrés, il était en 2024 l'un des plus grands icebergs jamais observés.

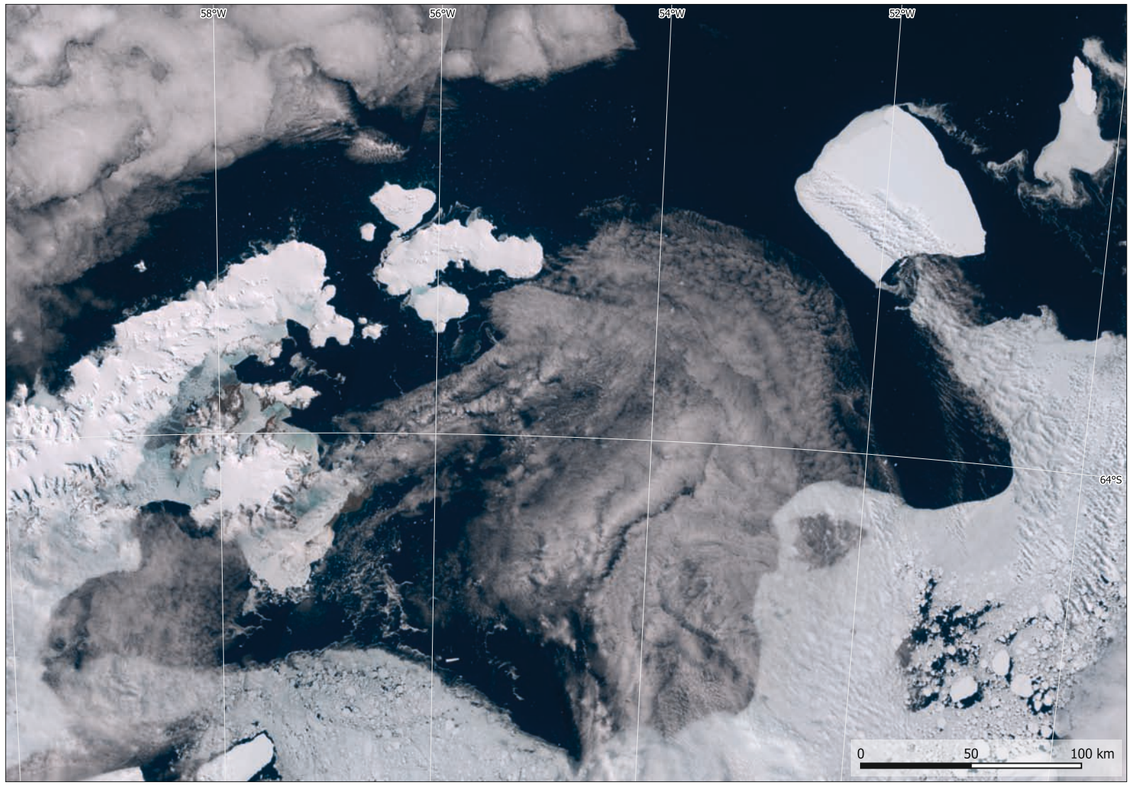
Fin 2020, A23a a commencé à se diriger vers le nord, en suivant approximativement le littoral de la péninsule antarctique. En novembre 2023, l'iceberg A23a a dépassé la pointe nord de la péninsule Antarctique et s'est dirigé vers le nord. Au cours de son périple loin de l'Antarctique, l'iceberg atteindra des eaux plus chaudes et fondra par la suite.

Bien que la dissolution des plateformes de glace ne contribue pas directement au niveau de l'eau de mer (l'eau fondue ne remplace que le volume de la partie submergée de la glace), elle joue un rôle indirect important car les plateformes servent de barrière stabilisatrice pour les glaciers qui s'écoulent vers la mer. La perte de cette barrière peut entraîner une augmentation de l'écoulement de la glace.



4. Trajectoire de l'iceberg A23a en 2022 et 2023 (données de l'insert image : Sentinel-3, 2023-11-15; image de fond : SPOT Vegetation).

5. L'iceberg A23a passe la péninsule Antarctique en direction de l'Atlantique Sud. Données : Sentinel-3, 2023-11-15.



Glacier Columbia, Alaska

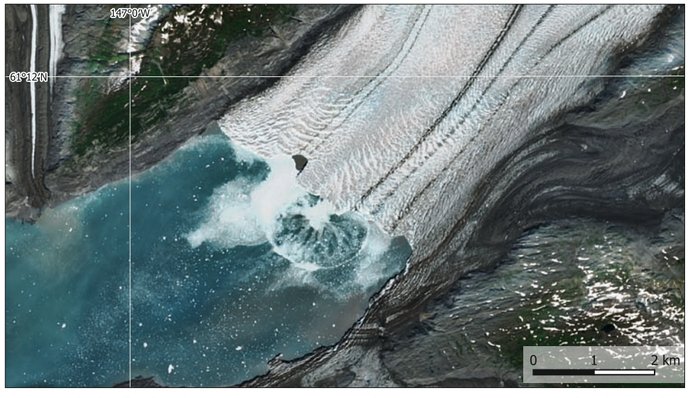
Depuis des décennies, les glaciers du monde entier reculent, un phénomène directement lié à laugmentation de la température due au changement climatique. En moyenne, les glaciers du monde entier ont perdu environ 30 mètres d'épaisseur depuis 1940. Actuellement, ils perdent en moyenne un mètre par an.

Le recul de plusieurs glaciers de marée, qui sont des glaciers se terminant dans la mer, est particulièrement spectaculaire. Les glaciers de marée existent en Alaska, en Patagonie et le long des côtes du Groenland. Ces glaciers se terminent directement au niveau de la mer, leur environnement est donc relativement chaud en été. Par conséquent, les zones terminales de ces glaciers comptent parmi les flux de glace les plus rapides de la planète. Leur partie inférieure flotte sur l'eau de mer et suit le mouvement des marées. Ce mouvement favorise la formation de fissures et le vêlage des icebergs qui flottent et fondent dans la mer.

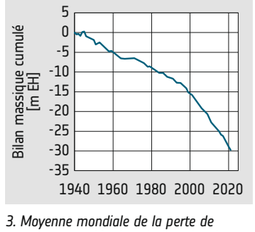
Le glacier Columbia est un glacier marée situé en Alaska. Descendant de plus de 3000 mètres au-dessus du niveau de la mer, il se jette dans le baie du Prince William, sur la côte de l'océan Pacifique. Pendant longtemps, le museau (ou terminus) du glacier est resté stable près de l'embouchure de la baie Columbia. Cependant, depuis les années 1980, il est devenu l'un des glaciers à l'écoulement le plus rapide et a reculé de plus de 20 kilomètres.

Le glacier Columbia montre que la combinaison de différents effets peut conduire à une évolution très dynamique. Au début, le museau du glacier était soutenu par le gravier de la moraine frontale. Après la phase initiale du retrait, il a flotté sur l'eau, rendant les forces de marée plus efficaces et augmentant ainsi la vitesse du retrait, d'autant plus que cela a permis à l'eau plus chaude de l'océan de s'écouler sous la glace.

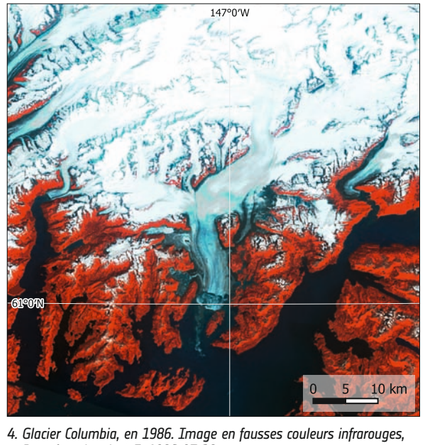
1. Image satellite de l'Alaska, données acquises par SPOT Vegetation. Les glaciers sont concentrés dans les chaînes de montagnes le long de la côte sud de l'Alaska.



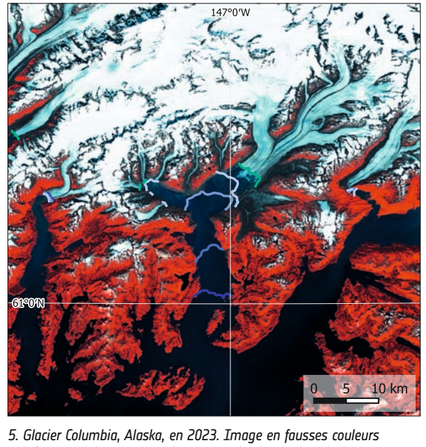
2. Image satellite détaillée du terminus du glacier Columbia. Notez l'onde circulaire qui se propage à partir du centre du terminus, où un iceberg a vêlé. Données : Sentinel-2, 2023-07-30.



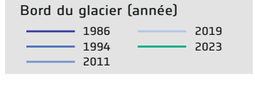
3. Moyenne mondiale de la perte de masse cumulée des glaciers depuis 1940. L'unité « mètre équivalent eau » correspond approximativement à la perte d'épaisseur des glaciers.



4. Glacier Columbia, en 1986. Image en fausses couleurs infrarouges, Données : Landsat 5, 1986-07-28.



5. Glacier Columbia, Alaska, en 2023. Image en fausses couleurs infrarouges. La superposition montre les bords des glaciers pour différentes années. Données : Sentinel-2 2023-07-30.

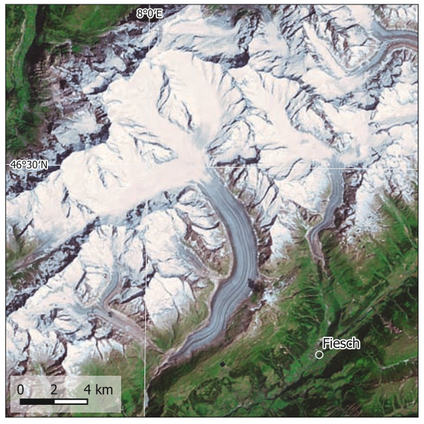


Glacier d'Aletsch, Suisse

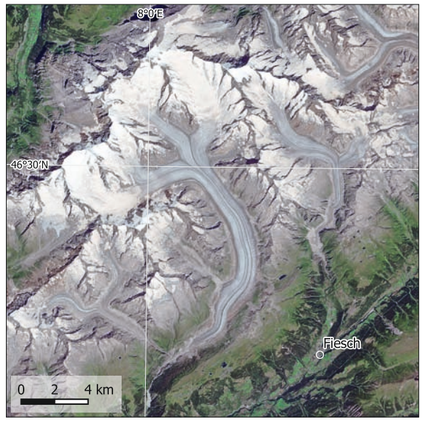
Avec une longueur totale de près de 23 kilomètres et une superficie d'environ 80 kilomètres carrés, le glacier d'Aletsch est le plus grand glacier des Alpes. Sa glace atteint une épaisseur de 900 mètres, en formant une rivière gelée qui serpente à travers le paysage montagneux accidenté.

Comme la plupart des glaciers alpins, le glacier d'Aletsch est soumis aux conséquences de la hausse des températures liée au changement climatique. Au cours du siècle dernier, il a reculé à un rythme croissant d'environ 100 mètres par an. Des données satellitaires ont montré que le glacier d'Aletsch a perdu près de 2 kilomètres de longueur depuis les années 1980. L'augmentation des températures mondiales fait que le glacier perd plus de glace par la fonte qu'il n'en gagne par les chutes de neige. Ce déséquilibre menace non seulement la taille du glacier, mais aussi les écosystèmes qui en dépendent.

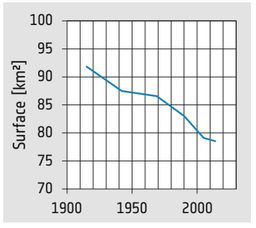
6. Vue du glacier d'Aletsch, montrant les crevasses et les débris des moraines.



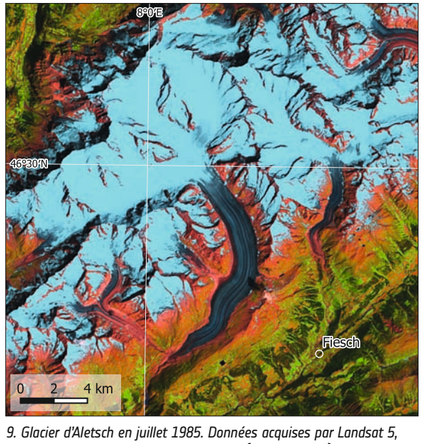
7. Glacier d'Aletsch en 1985, image en vraies couleurs. Données : Landsat 5, 1985-07-26.



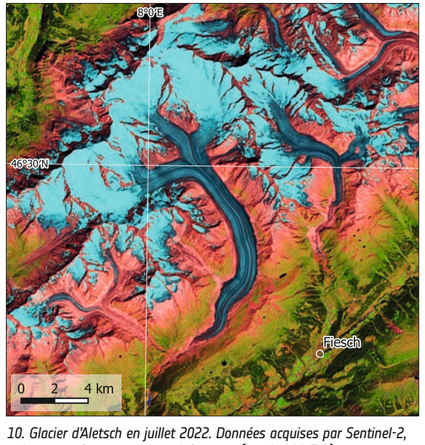
8. Glacier d'Aletsch en 2022, image en vraies couleurs. Données : Sentinel-2, 2022-07-13.



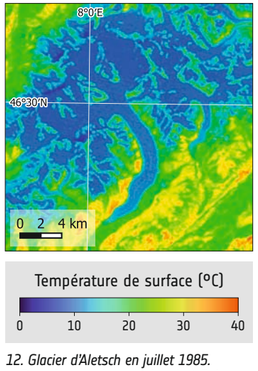
11. Glacier d'Aletsch, évolution de la superficie depuis 1915.



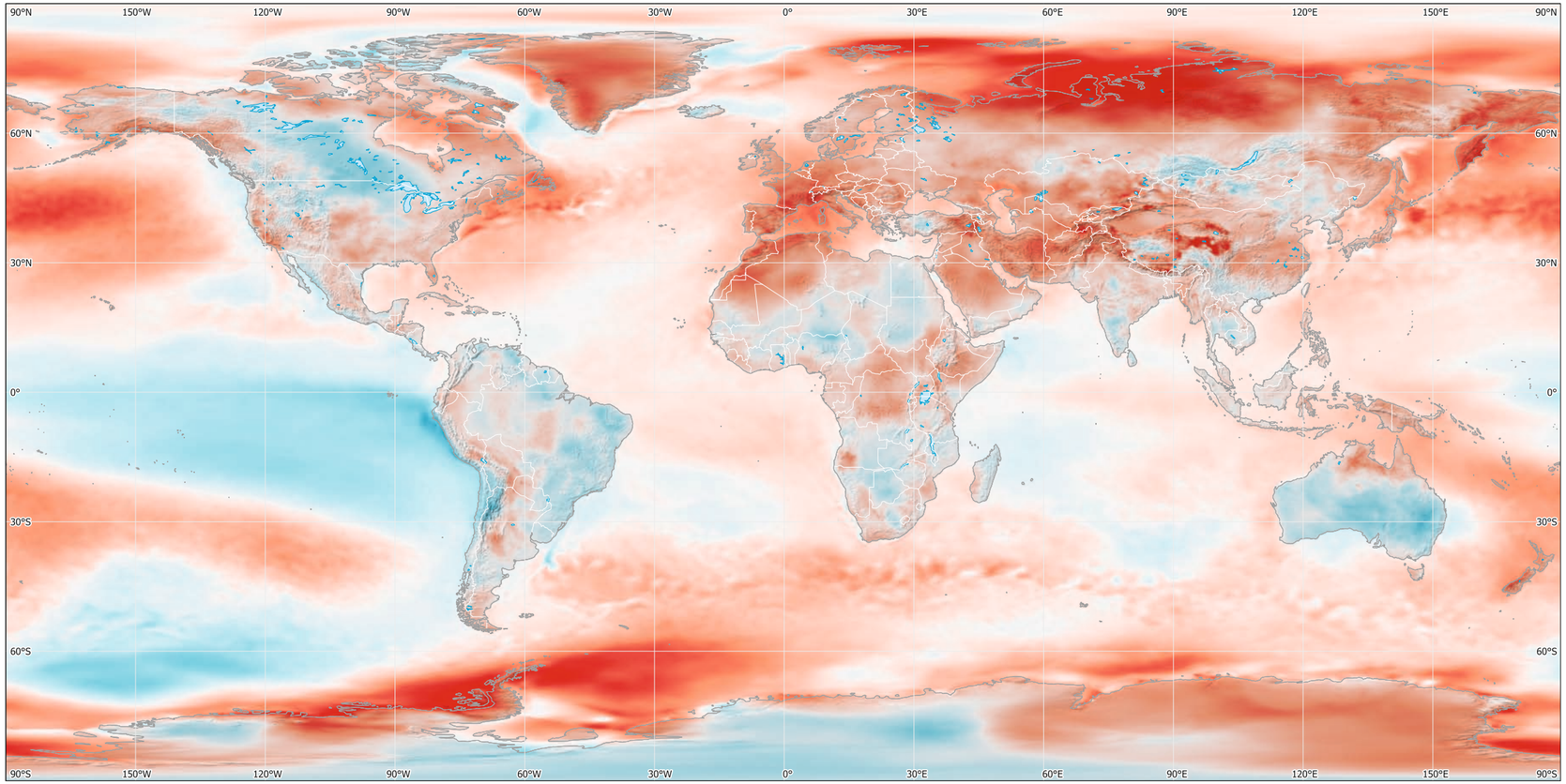
9. Glacier d'Aletsch en juillet 1985. Données acquises par Landsat 5, image en fausses couleurs infrarouges (bandes 5-4-3) mettant en évidence la glace en bleu foncé et la neige en bleu clair.



10. Glacier d'Aletsch en juillet 2022. Données acquises par Sentinel-2, image en fausses couleurs infrarouge (bandes 11-7-4) mettant en évidence la glace en bleu foncé et la neige en bleu clair.

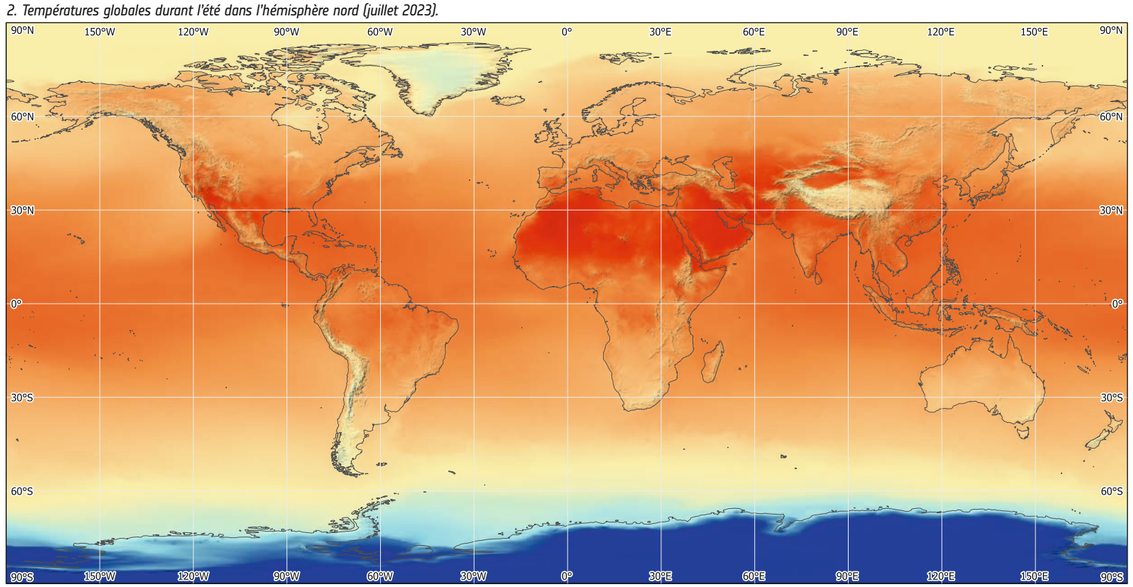


12. Glacier d'Aletsch en juillet 1985. Données acquises par Landsat 5, image infrarouge thermique (bleu foncé : température ~0 °C).



1. Carte mondiale des anomalies de température mesurées en 2022 par rapport à la période 1960-1990.

2. Températures globales durant l'été dans l'hémisphère nord (juillet 2023).



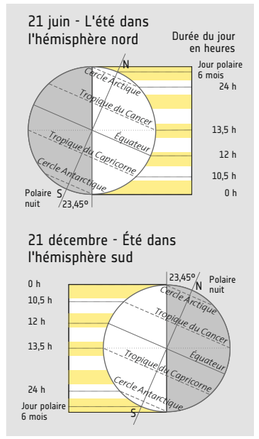
Températures et anomalies

Les températures globales sont parmi les paramètres les plus importants du système climatique de la Terre, qui façonnent les modèles météorologiques et les écosystèmes. L'irradiation solaire, c'est-à-dire l'énergie émise par le Soleil, influe sur les températures mondiales en fournissant l'énergie nécessaire au maintien de la vie et aux processus atmosphériques.

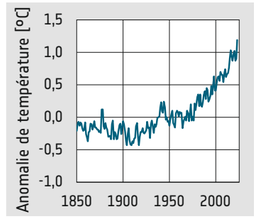
Les variations de la production solaire, provoquées par des phénomènes cycliques tels que les taches et les éruptions solaires, modulent la quantité d'énergie qui atteint l'atmosphère terrestre. Ces fluctuations influencent les schémas de circulation atmosphérique, les courants océaniques et la distribution de la chaleur à la surface de la planète.

L'augmentation des concentrations de gaz à effet de serre résultant des activités humaines est le principal facteur à l'origine des changements récents des températures mondiales. La combustion de combustibles fossiles, la déforestation et les processus industriels ont entraîné une augmentation rapide des concentrations atmosphériques de dioxyde de carbone (CO_2), de méthane (CH_4) et d'autres gaz à effet de serre.

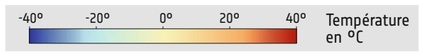
Cette augmentation des gaz à effet de serre amplifie l'effet de serre naturel, qui emprisonne la chaleur dans l'atmosphère terrestre et provoque une hausse des températures mondiales. Depuis les années 1950, la température moyenne à la surface de la Terre a augmenté d'environ 1,1 degré Celsius, avec des variations importantes d'une région à l'autre et d'une saison à l'autre. La dernière décennie (2010-2019) a été la plus chaude jamais enregistrée.



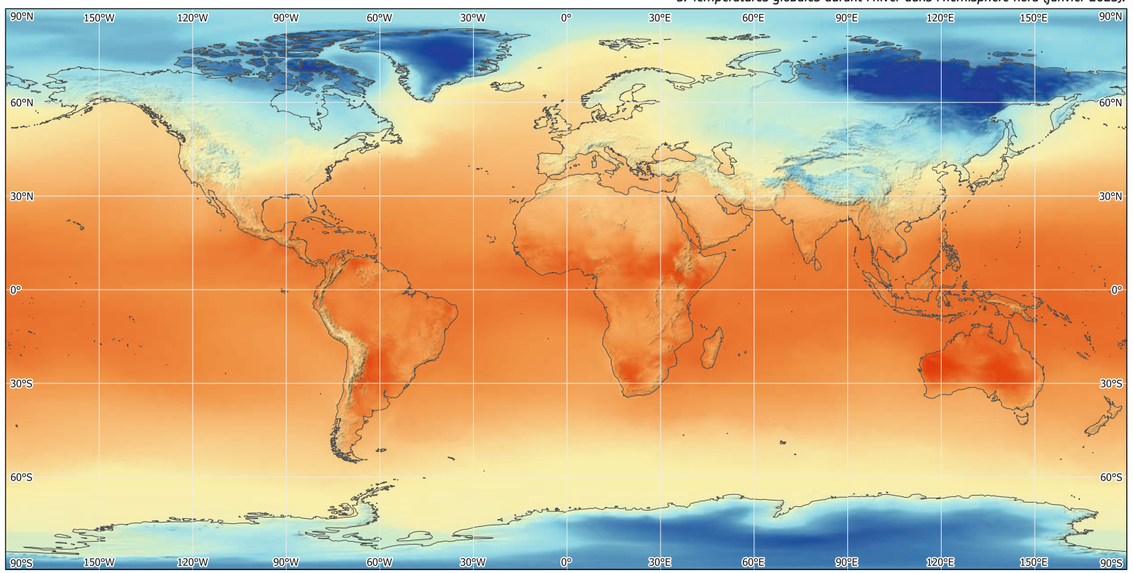
4. L'angle de l'axe de la Terre par rapport à la direction du soleil varie avec les saisons, et avec lui l'angle d'irradiation solaire et la longueur des jours. Cela influence l'énergie solaire reçue en un point et, par conséquent, la température.



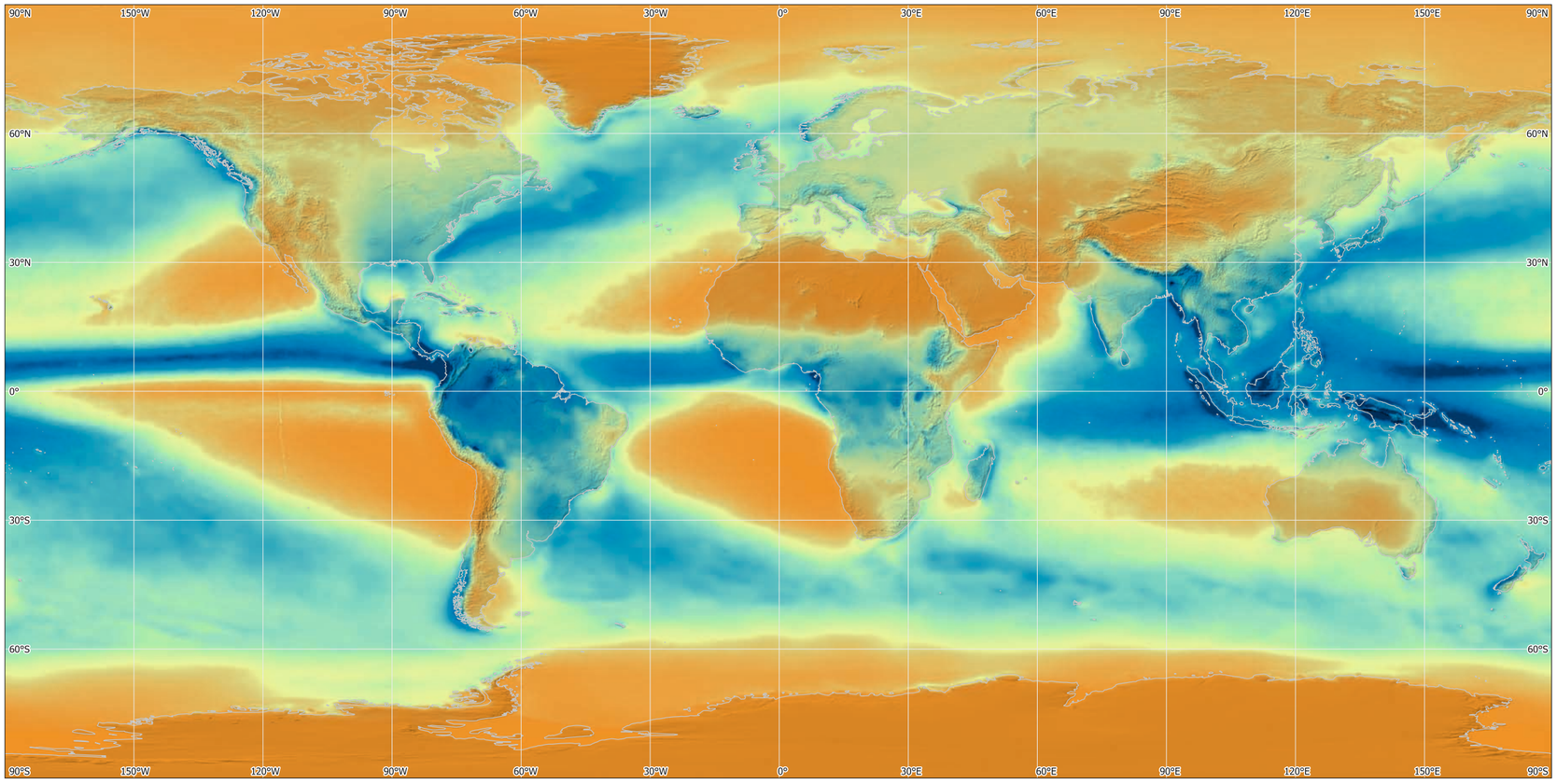
5. Anomalie de la température moyenne annuelle par rapport à la période 1950-1980.



3. Températures globales durant l'hiver dans l'hèmisphère nord (janvier 2023).



ATMOSPHÉRE



Précipitations [mm/an]

0 500 1000 2000 3000 4000

1. Précipitations annuelles moyennes pour les années 2000 à 2023, mesurées par satellites.

Répartition des précipitations

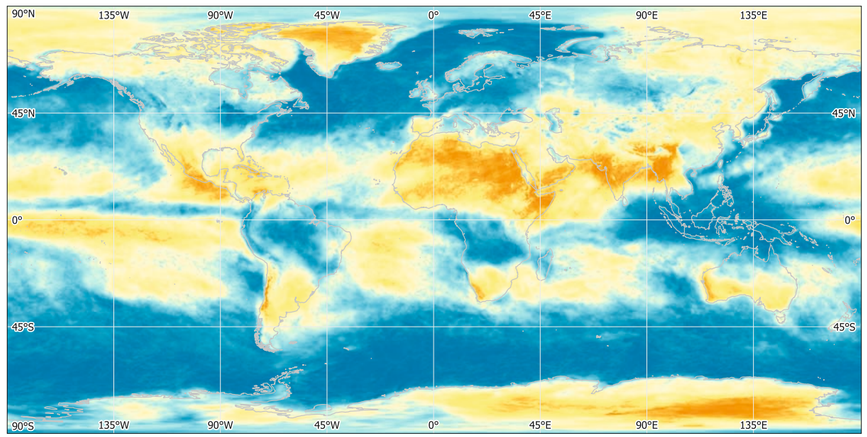
La répartition des précipitations sur la Terre est influencée par plusieurs facteurs, notamment la latitude, la proximité de grandes étendues d'eau, l'altitude et les vents dominants. Les régions équatoriales connaissent généralement des niveaux élevés de précipitations en raison de la convergence de masses d'air chaudes et humides, ce qui se traduit par des pluies abondantes tout au long de l'année. À l'inverse, les régions proches des pôles ont tendance à connaître des taux de précipitations plus faibles en raison de températures plus froides et d'une disponibilité limitée de l'humidité.

Les zones côtières reçoivent souvent des précipitations, car l'air humide des océans est forcé de s'élever au-dessus des masses continentales, ce qui favorise la formation de nuages et les précipitations. En revanche, les régions continentales intérieures peuvent connaître des régimes de précipitations plus variables, certaines zones recevant des précipitations abondantes tandis que d'autres sont relativement sèches en raison des ombres pluviométriques causées par montagnes ou régimes de vents dominants.

Couverture nuageuse (%)

0 25 50 75 100

3. Couverture nuageuse, janvier 2016.



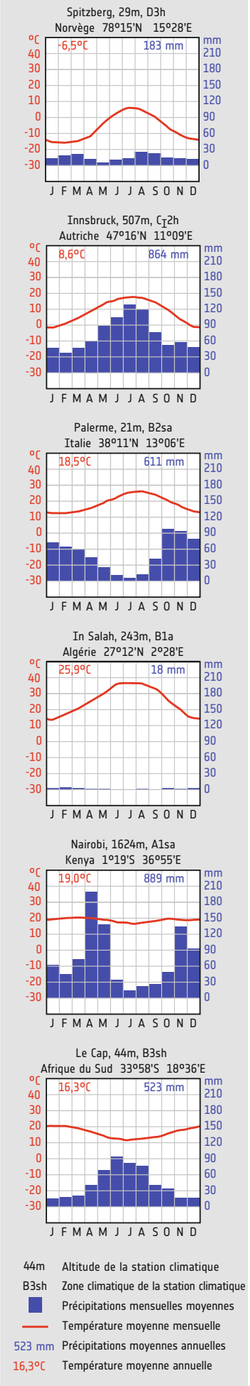
Formation des nuages et précipitations

La relation entre le climat, la couverture nuageuse et les précipitations est une interaction complexe qui influence les écosystèmes et les conditions météorologiques de la Terre. Le climat est étroitement lié à des phénomènes atmosphériques tels que la formation des nuages et les précipitations. La couverture nuageuse, c'est-à-dire la mesure dans laquelle les nuages recouvrent la surface de la Terre, joue un rôle important dans l'équilibre énergétique de la planète en réfléchissant la lumière du soleil vers l'espace et en piégeant la chaleur sortante. Les précipitations, y compris les pluies, les chutes de neige et d'autres formes d'humidité, sont une composante fondamentale du cycle de l'eau de la Terre ainsi que des climats et des écosystèmes régionaux.

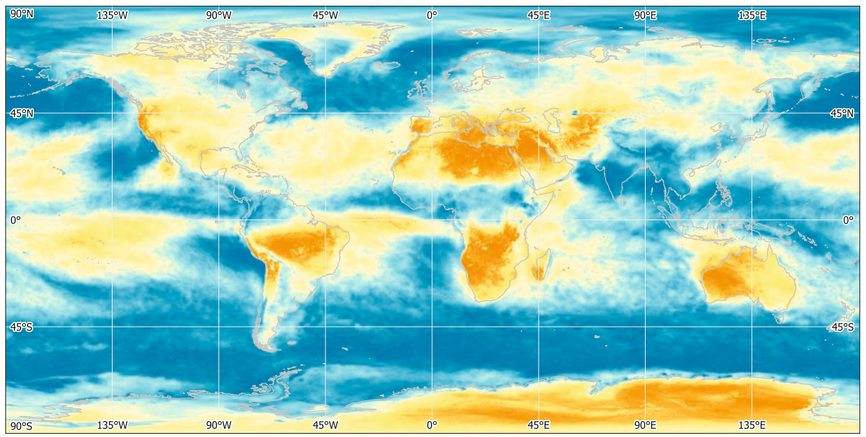
Ces processus interconnectés sont essentiels pour le changement climatique, les régimes météorologiques et leurs impacts sur les sociétés humaines et les environnements naturels. Les satellites d'observation de la Terre surveillent ces phénomènes à l'échelle mondiale. Équipés de capteurs avancés, ces satellites fournissent des données sur la couverture nuageuse, les taux de précipitations et les conditions atmosphériques à différentes échelles spatiales et temporelles.

Les observations par satellite donnent un aperçu de la répartition spatiale et de la variabilité temporelle de la couverture nuageuse, ce qui permet d'étudier les processus de formation des nuages, leurs interactions avec les schémas de circulation atmosphérique et leur rôle dans le climat de la Terre. Les mesures des précipitations par satellite fournissent des informations cruciales pour la gestion des ressources en eau, la prévision des inondations et la planification agricole.

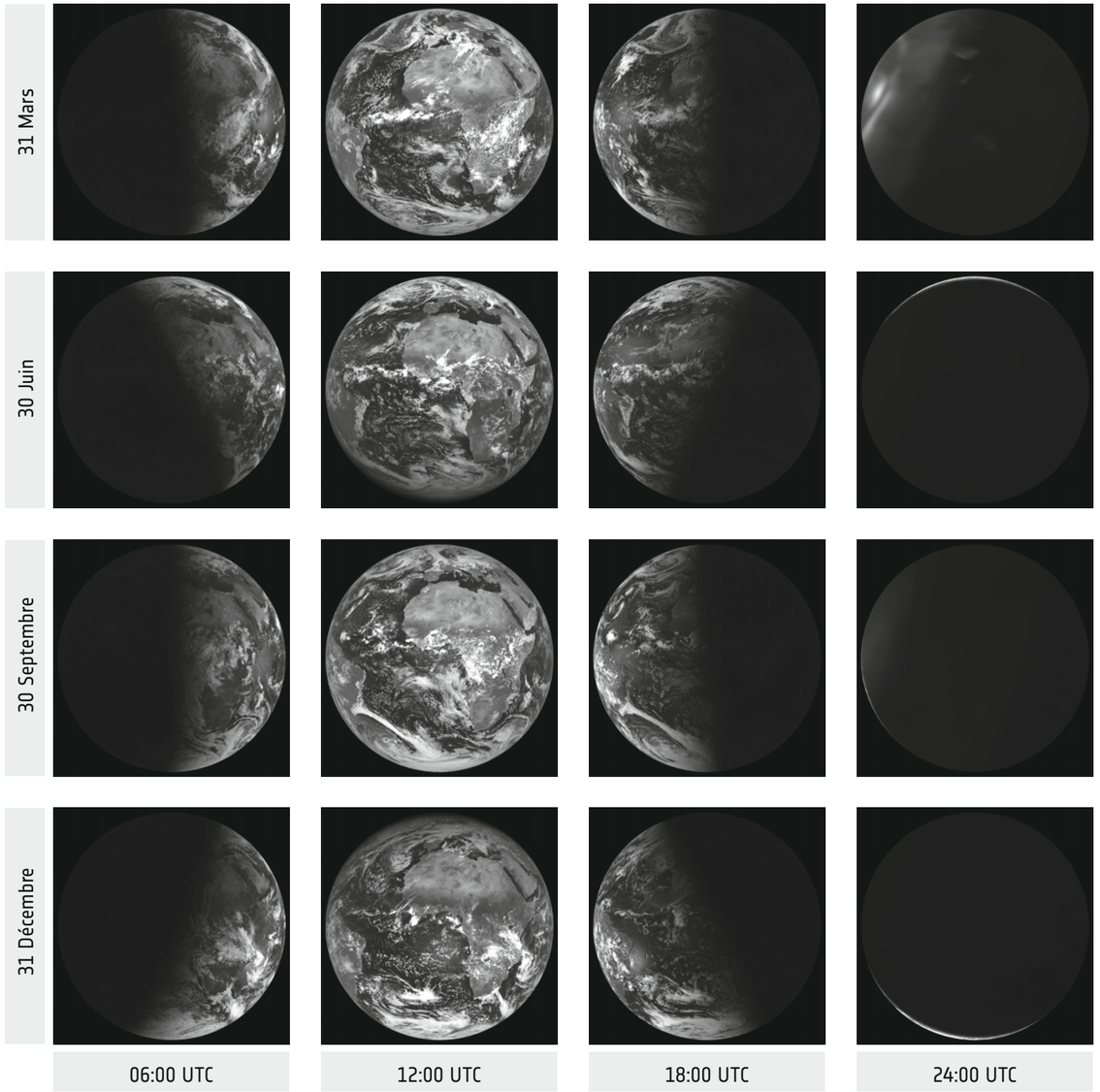
En combinant les observations satellitaires avec des modèles climatiques avancés, les scientifiques peuvent améliorer notre compréhension des mécanismes complexes de rétroaction entre le climat, la couverture nuageuse et les précipitations. Dans ce contexte, les satellites d'observation de la Terre constituent des outils importants pour la surveillance et l'étude du système climatique.



2. Diagrammes climatiques pour les zones d'intérêt à différentes latitudes.



4. Couverture nuageuse, juillet 2016.



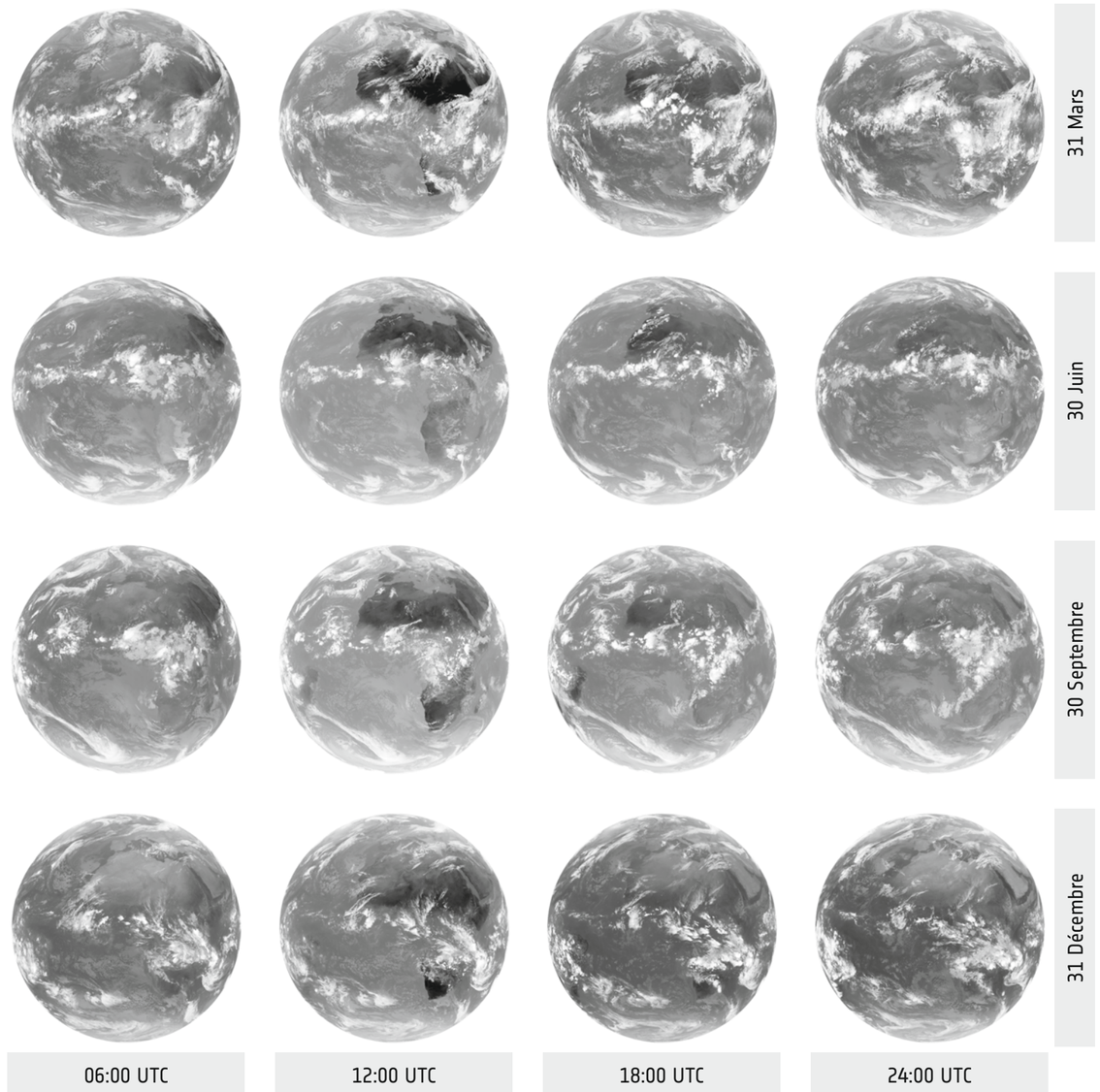
1. Changements saisonniers et diurnes de l'éclairement de la terre. Meteosat (méridien 0°, lumière visible).

La Terre en lumière visible

Les satellites Meteosat fournissent des informations sur la dynamique de la Terre par le biais d'images dans le spectre visible, en capturant les caractéristiques de la surface de la planète et les conditions atmosphériques avec un niveau de détail remarquable. Dans le spectre visible, ces images révèlent une vue des phénomènes naturels, en montrant le paysage en constante évolution influencé par les variations saisonnières et les cycles diurnes.

Au cours d'une année, les images Meteosat montrent l'interaction dynamique des saisons de la Terre. Le changement de l'angle d'irradiation de la lumière solaire est très visible. Lors des équinoxes de printemps et d'automne, tout l'hémisphère est éclairé à 12 h 00 UTC. En outre, les changements saisonniers de la végétation et de la couverture neigeuse sont visibles.

Le cycle diurne, avec sa séquence de jour et de nuit, peut également être suivi sur les images Meteosat. Les saisons et les heures de la journée se croisent sur les images Meteosat. Aux latitudes élevées, la transition de la nuit polaire au jour polaire pendant l'été se traduit par une lumière du jour continue, tandis que les mois d'hiver restent sombres. Dans les régions équatoriales, le cycle diurne reste relativement constant tout au long de l'année.



2. Changements dans la distribution des températures et migration des ZCIT au cours de l'année. Les températures plus élevées apparaissent plus foncées. Meteosat (méridien 0°, bande infrarouge thermique).

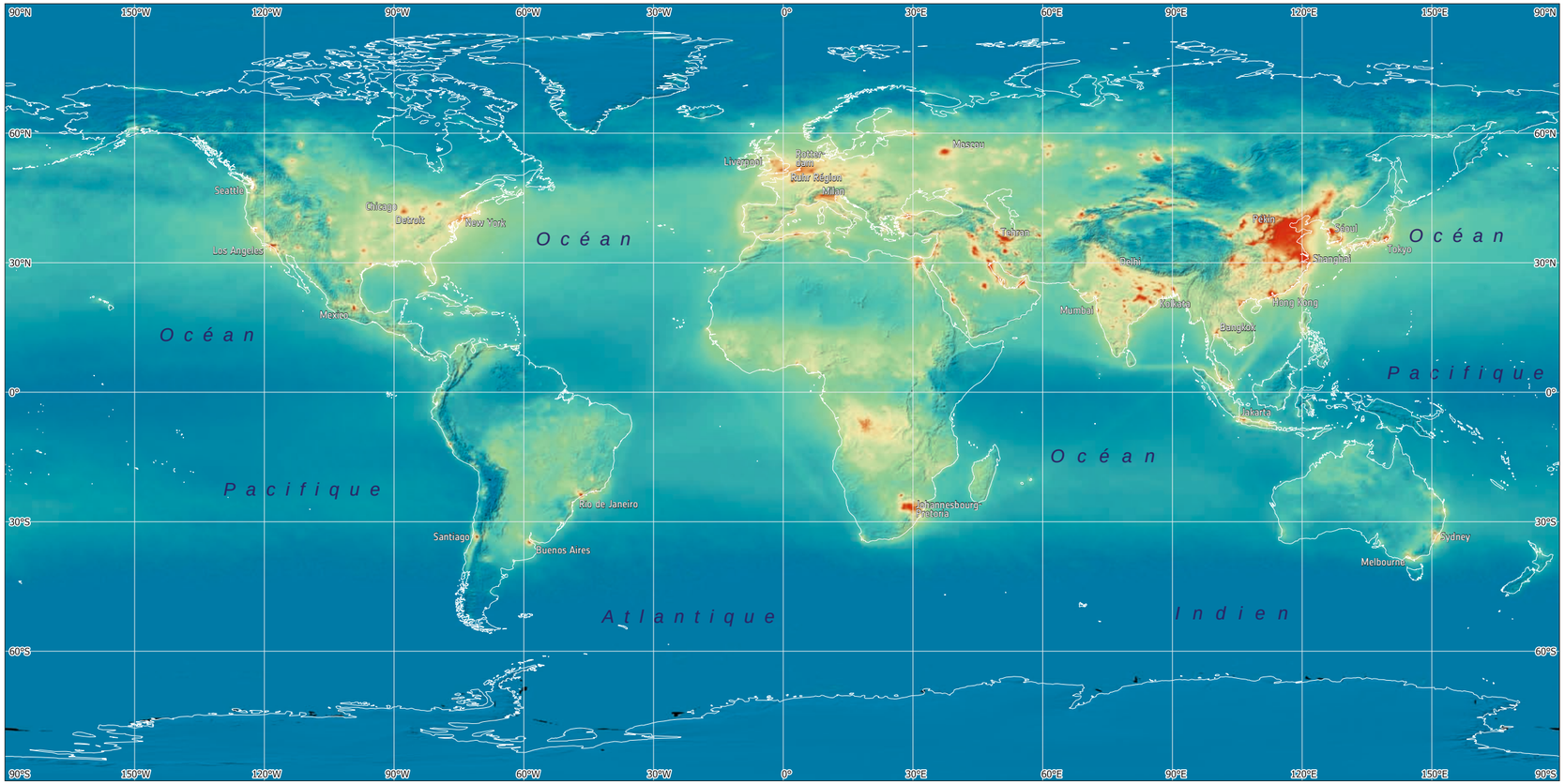
La Terre en lumière infrarouge

Les images infrarouges de Meteosat montrent les nuages et la dynamique de l'atmosphère, ce qui permet de mieux comprendre les schémas météorologiques, les phénomènes climatiques et le comportement de la zone de convergence intertropicale (ZCIT). Ces images détectent le rayonnement thermique émis par la surface et l'atmosphère, offrant ainsi une perspective sur la couverture nuageuse et les températures atmosphériques.

La couverture nuageuse domine l'imagerie Meteosat infrarouge, apparaissant en nuances de gris ou de blanc sur un fond plus sombre. Les différents types de nuages, tels que les cumulus, les stratus et les cirrus, présentent des signatures thermiques distinctes, ce qui permet de discerner leur hauteur, leur épaisseur et leur composition. Les nuages épais et de haute altitude apparaissent plus froids sur les images infrarouges, tandis que les nuages de basse altitude et le brouillard sont plus chauds.

La ZCIT, une région proche de l'équateur où convergent les alizés, apparaît sur les images comme une bande d'orages et de cumulonimbus. La position de la ZCIT se déplace au cours de l'année en fonction de l'inclinaison de l'axe de la Terre, ce qui influe sur les conditions météorologiques mondiales et la répartition des précipitations.

ATMOSPHÈRE



Dioxyde d'azote (NO_2) en µmol / m²

200 100 50 20 10 0

1. Carte mondiale de la distribution du dioxyde d'azote (NO_2). Le NO_2 est produit par des processus de combustion à haute température dans l'industrie et la circulation et reflète l'activité industrielle d'une région.

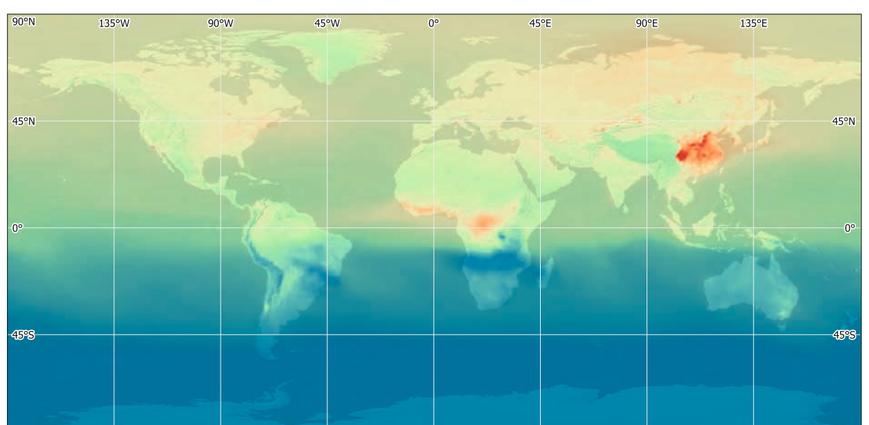
Concentration de dioxyde de carbone (CO_2) [ppm]

<408 410 412 414 416 418 420<

Composants de l'atmosphère

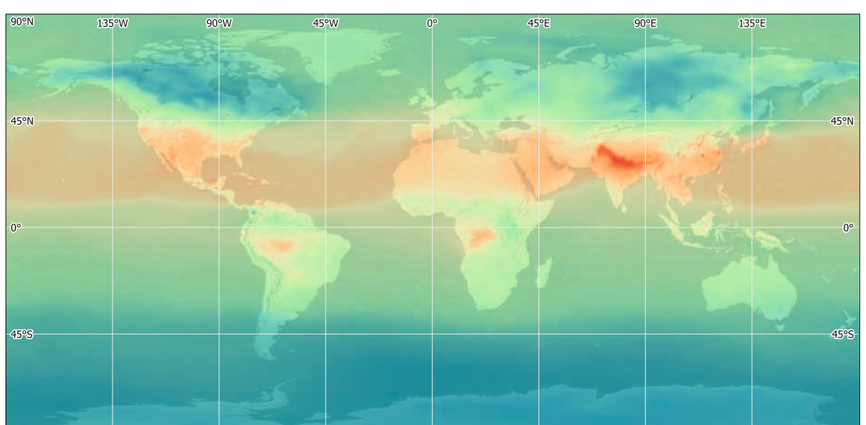
L'atmosphère terrestre se compose principalement d'azote (N_2, 78,08 %), d'oxygène (O_2, 20,95 %) et d'argon (Ar, 0,93 %). Les 0,04 % restants sont constitués de ce que l'on appelle les gaz à l'état de traces, qui, malgré leur faible concentration, jouent un rôle important dans l'atmosphère.

Le dioxyde de carbone (CO_2), le méthane (CH_4) et l'oxyde nitreux (N_2O) sont des gaz à effet de serre importants qui contribuent au réchauffement de la planète. Au cours des dernières décennies, c'est surtout le CO_2 qui a attiré l'attention, car sa concentration est passée de 320 ppm (parties par million) dans les années 1960 à 420 ppm en 2023.



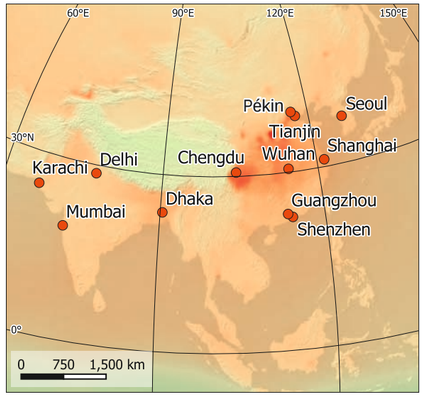
2. Carte mondiale de la répartition du dioxyde de carbone (CO_2) en janvier 2020.

L'ozone (O_3) joue un rôle important dans la stratosphère. Il agit comme un filtre pour le rayonnement solaire ultraviolet (UV), qui peut détruire les biomolécules. Le trou d'ozone, un déficit en O_3 qui se produit chaque année vers le mois d'octobre, a été intensifié par le gaz traceur CFC (chlorofluorocarbone) produit par l'homme.



3. Carte mondiale de la répartition du dioxyde de carbone (CO_2) en juillet 2020.

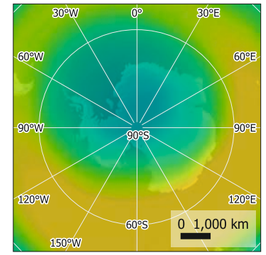
4. Variation saisonnière de la concentration de méthane (CH_4) en Asie du Sud-Est, janvier 2020 (en haut) et juillet 2020 (en bas). La culture du riz est l'une des sources les plus importantes de CH_4.



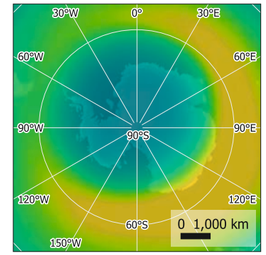
Concentration de méthane (CH_4) [ppb]

<1700 1750 1800 1850 1900 1950 2000<

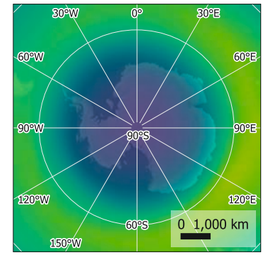
5. Évolution du trou d'ozone au-dessus de l'Antarctique depuis 1970.



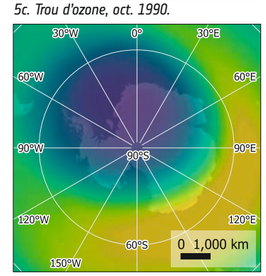
5a. Trou d'ozone, oct. 1970.



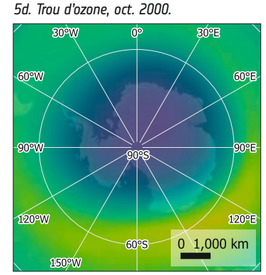
5b. Trou d'ozone, oct. 1980.



5c. Trou d'ozone, oct. 1990.



5d. Trou d'ozone, oct. 2000.

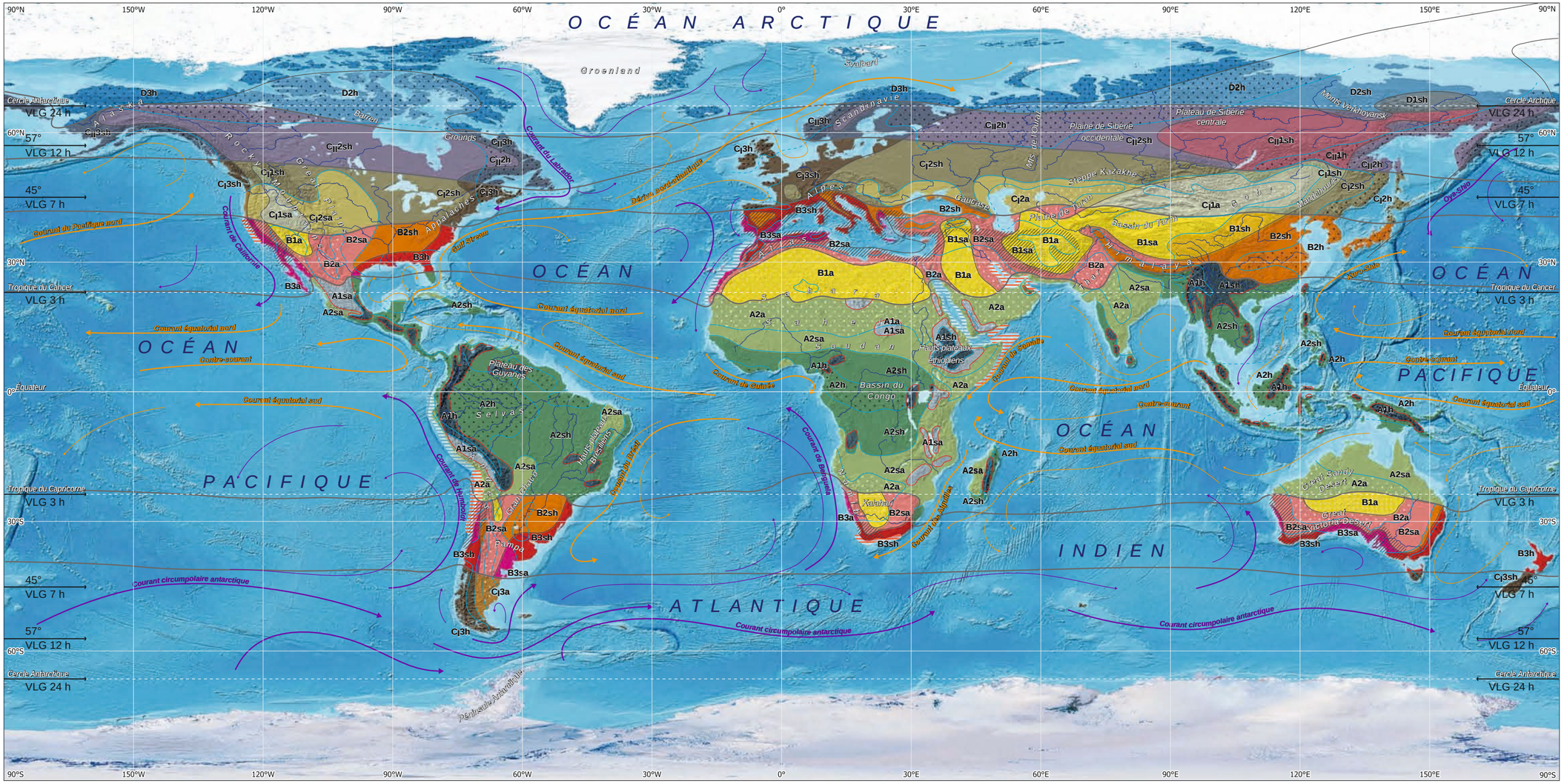


5e. Trou d'ozone, oct. 2010.

Concentration d'ozone Colonne totale [unités Dobson]

<100 200 300 400<

ATMOSPHÉRE



1. Carte mondiale des zones climatiques selon Lauer et Frankenberg.

Zones climatiques

C_1**3sh** Exemple : $C_1$3sh est un climat maritime, semi-humide, tempéré chaud des latitudes moyennes.

57° / VLJ 12 h Variation annuelle de la durée du jour (VLJ) en heures (limite climatique solaire)

Limite climatique thermiquement ajustée tenant compte de l'influence des montagnes et des courants océaniques

C: degré de continentalité (en %) en tant que mesure des variations annuelles de température.

Mois humides : précipitations > évaporation dans le paysage réel

Région subtropicale pluvieuse en hiver

Brouillard côtier (hiver/été)

Courants océaniques

Courant principal froid

Courant froid

Courant principal chaud

Courant chaud

Zones climatiques

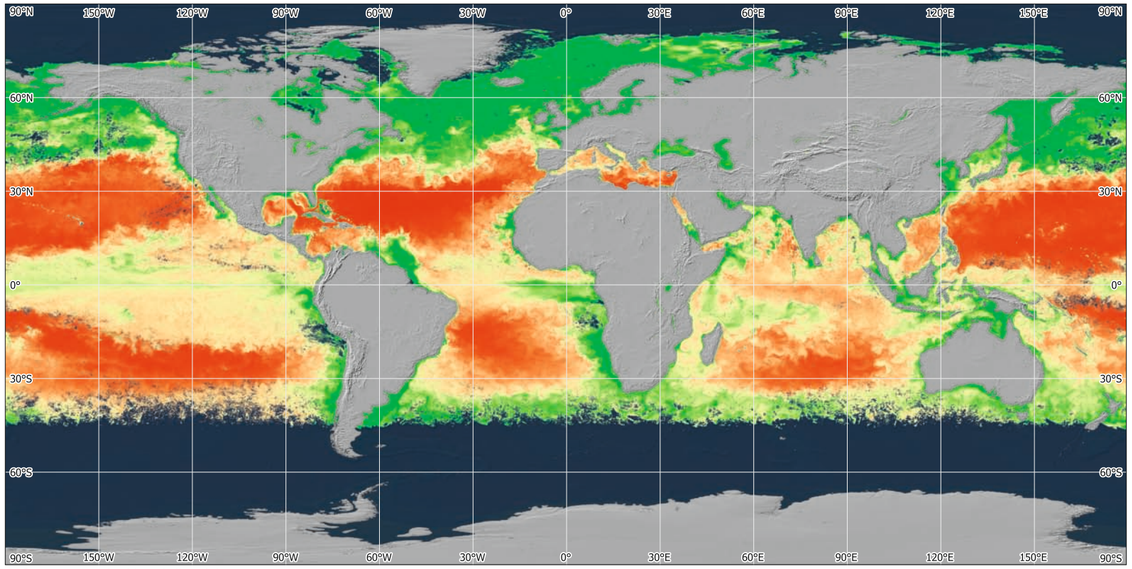
Le terme de climat englobe toutes les caractéristiques météorologiques responsables de l'état moyen à long terme de l'atmosphère en un lieu donné. Le climat est influencé par une multitude de facteurs. Le plus important est la position géographique, qui influence la température : plus la distance par rapport à l'équateur est grande et plus l'altitude est élevée, plus la température est basse. La distance par rapport à l'océan, la continentalité, a une importance similaire : les masses terrestres se réchauffent et se refroidissent plus rapidement que l'eau de l'océan, ce qui fait que les variations de température sur le continent sont plus importantes que sur les côtes. Par conséquent, dans les régions côtières, les étés sont généralement plus frais et les hivers plus doux.

Les régions présentant des conditions climatiques similaires sont classées dans la même zone climatique. La classification des climats de Lauer et Frankenberg (1987) définit dans une première approche les zones climatiques tropicales, subtropicales, tempérées et polaires.

Les critères de classification se réfèrent à la végétation réelle. Le principe de base de la classification climatique est l'inclusion des conditions solaires-climatiques de rayonnement et d'illumination. Les climats sont définis selon la fluctuation de la température. cette délimitation se situe là où la variation entre l'été et l'hiver (amplitude annuelle) est plus importante que la variation entre le jour et la nuit (amplitude diurne). Les climats tropicaux sont donc des climats diurnes, tandis que les climats non tropicaux sont des climats annuels. Selon cette classification climatique, la Terre peut être divisée *grosso modo* en quatre zones climatiques, définies par le rayonnement solaire : les climats tropicaux, subtropicaux, tempérés et polaires. Ces zones sont sous-classées en fonction de leurs propriétés thermiques.

Le système climatique de la Terre est très complexe. Les satellites météorologiques sont très utiles pour mesurer les conditions atmosphériques et extrapoler l'évolution du métó et du climat sur la base de ces mesures. Il s'agit de mesurer la couverture nuageuse, les températures et l'humidité, ainsi que la concentration d'ozone et de gaz à effet de serre, avec leur impact à long terme sur l'évolution du climat.

Zone Climatique (irradiation solaire globale)	**Région climatique** (bilan thermique)	**Bilan hydrique** (nombre de mois humides) **a** (aride) 0-2	**sa** (semi-aride) 3-5	**sh** (semi-humide) 6-9	**h** (humide) 10-12	**Limite climatique**
A Tropicale	1 Tropiques froids					Limite absolue de gel
	2 Tropiques chauds					**VLJ 3 h.**
B Subtropicale	1 haut-continental					C=200%
	2 continental					C=100%
	3 maritime					**VLJ 7 h.**
C Latitudes moyennes I tempéré chaud	1 haut-continental					C=200%
	2 continental					C=100%
	3 maritime					**VLJ 12 h.**
C Latitudes moyennes II tempéré froid	1 haut-continental					C=200%
	2 continental					C=100%
	3 maritime					**VLJ 24 h.**
D Régions polaires	1 haut-continental					C=200%
	2 continental					C=100%
	3 maritime					Ligne de neige
	Glaciers					



1. Concentration de chlorophylle-a à la surface de l'océan, juin 2023. Données acquises par Sentinel-3.

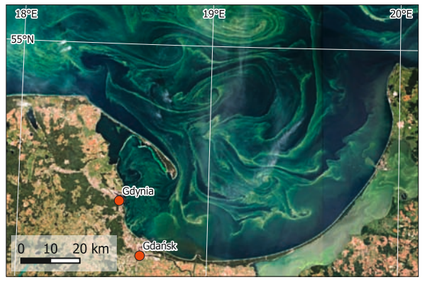
Concentration en chlorophylle-α [mg/m³]

- 0,000 - 0,049
- 0,050 - 0,074
- 0,075 - 0,099
- 0,100 - 0,134
- 0,135 - 0,179
- 0,180 - 0,249
- 0,250 - 0,374
- 0,375 - 0,599
- 0,600 - 64,99
- 65,0 <

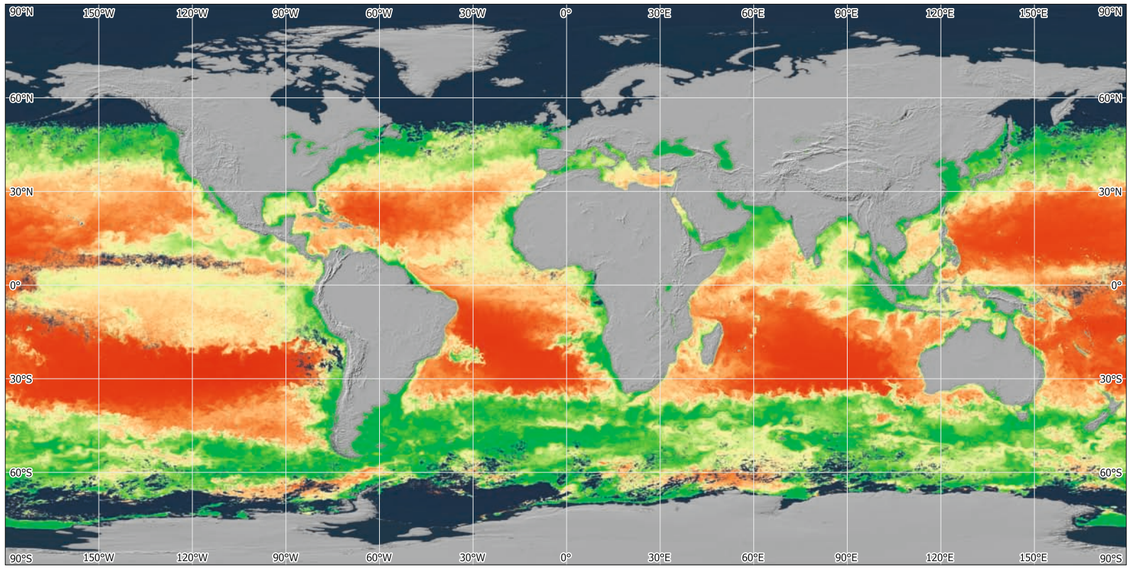
2. Concentration en chlorophylle-a à la surface des océans, décembre 2023. Données acquises par Sentinel-3.

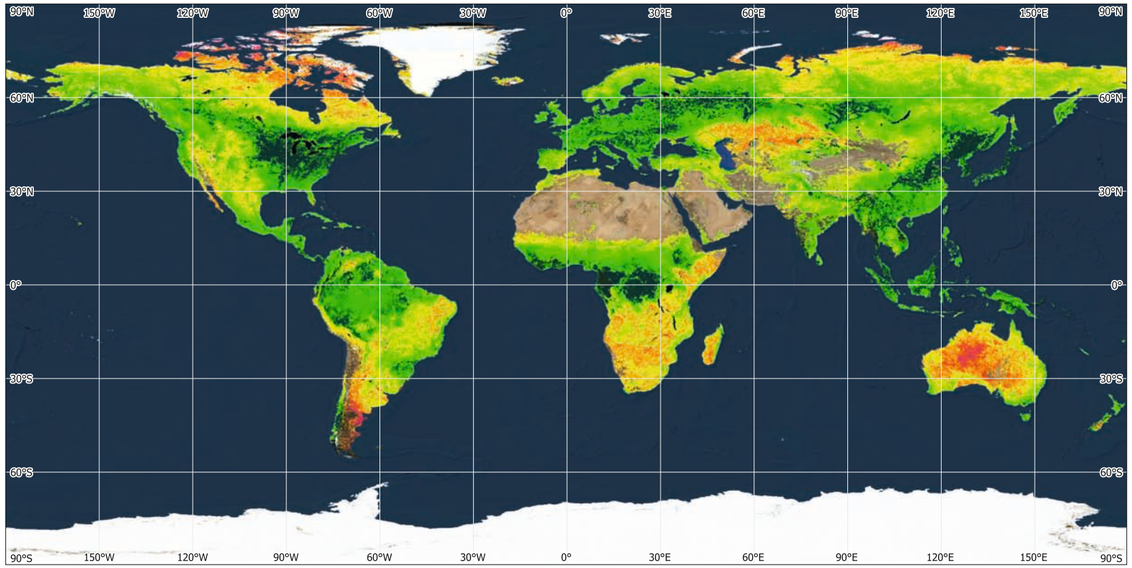
La vie dans l'eau

Le phytoplancton est composé de plantes microscopiques et joue un rôle essentiel dans les écosystèmes aquatiques en tant que producteur primaire et source d'oxygène. Son abondance varie et dépend de la disponibilité des nutriments. Dans des conditions spécifiques telles que l'afflux de nutriments et les températures chaudes, le phytoplancton peut proliférer rapidement, provoquant ainsi une prolifération d'algues. Consommant de l'oxygène, ce entraîne des conditions hypoxiques préjudiciables à la vie aquatique.



3. Tourbillons d'une prolifération d'algues dans la mer Baltique près de Gdansk, en Pologne. Données : Sentinel-2, 2019-07-20.

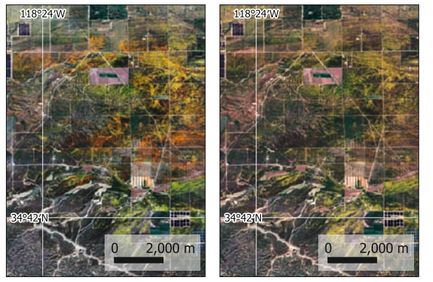




4. Intensité de la végétation représentée par l'indice de chlorophylle terrestre, juillet 2018. Données : Sentinel-3.

Végétation terrestre

Les plantes couvrent la plus grande partie de la surface solide de la Terre, bien adaptées aux conditions respectives du climat et des sols de la région. L'importance de l'énergie solaire pour le cycle de vie des plantes se reflète dans les grandes différences saisonnières de la teneur en chlorophylle de la végétation. Les différences sont les plus faibles dans les régions tropicales, où l'irradiation solaire reste relativement constante. Des forêts à feuilles caduques aux super floraisons, la dynamique de la végétation présente un large éventail de phénomènes différents.

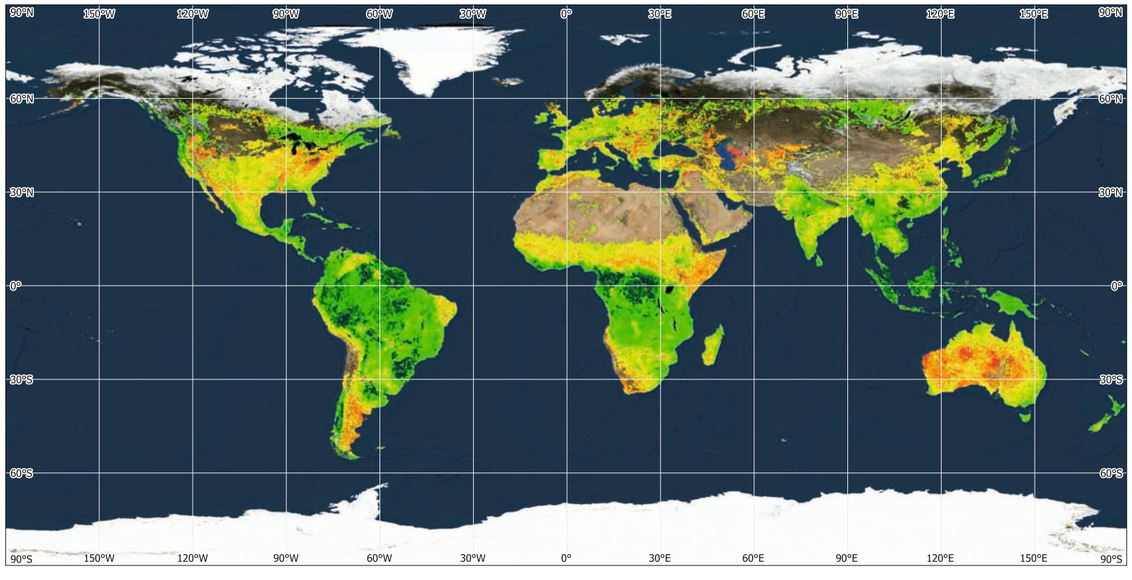


6. Couleurs pendant (2023-04-08, à gauche) et après une super floraison (2023-04-13, à droite) en Californie. Données : Sentinel-2.

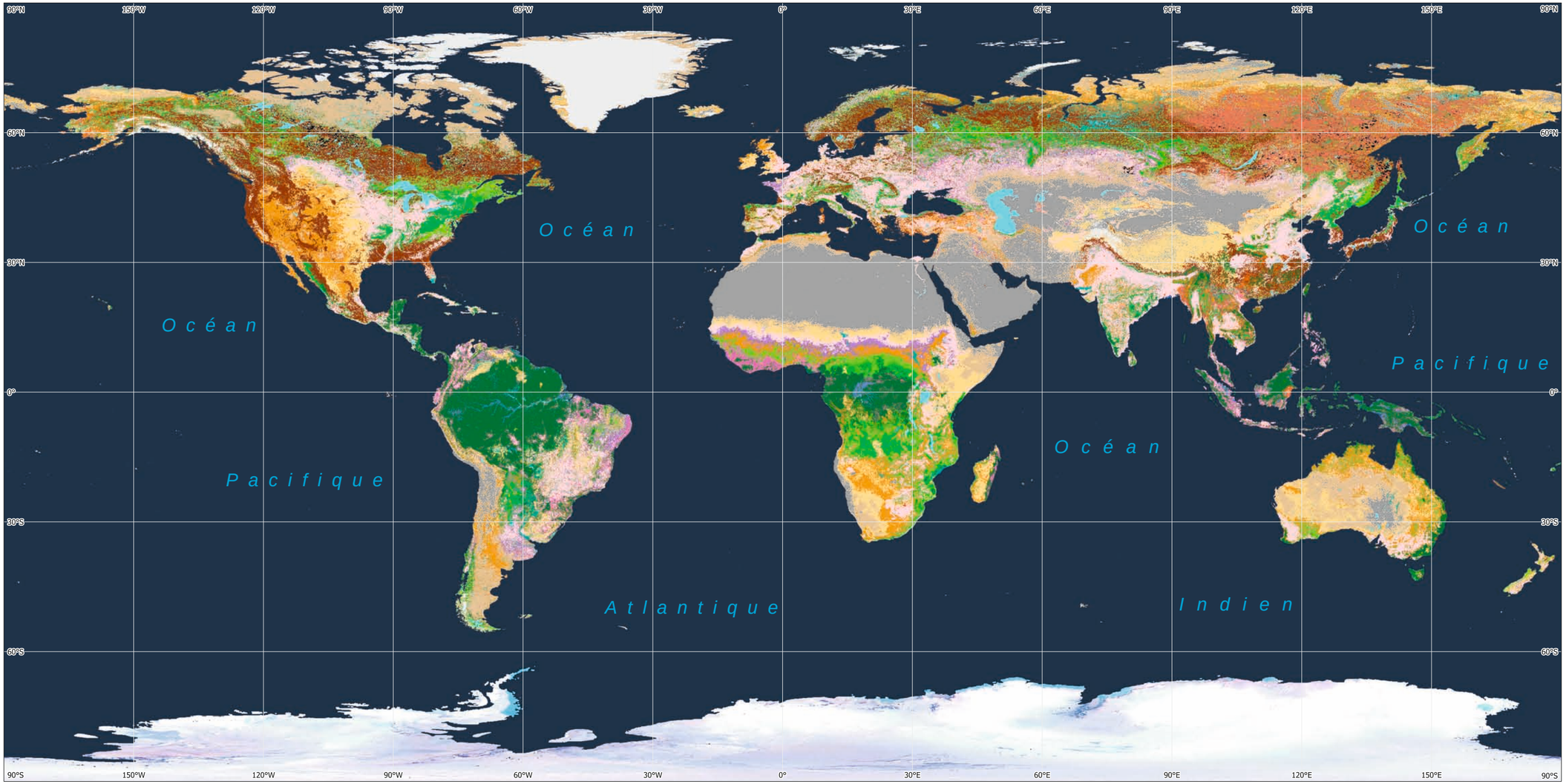
Concentration de chlorophylle terrestre (unités arbitraires)

- 3,3
- 2,8
- 2,0
- 1,4
- 1,2
- 1,0
- 0,9

5. Intensité de la végétation montrée par l'indice de chlorophylle terrestre, janvier 2018. Données : Sentinel-3.



BIOSPHÉRE



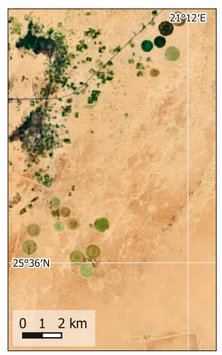
1. Carte mondiale de la couverture et de l'utilisation des sols dérivée de données satellitaires.

- Neige et glace
- Surface de l'eau
- Couverture herbacée ou arbustive clairsemée
- Couvert arboré, conifères, à feuilles caduques
- Couvert arboré, type feuillu mixte
- Couvert arboré, feuillus, à feuilles caduques, fermé
- Couvert arboré, conifère, à feuilles persistantes
- Couvert arboré, brûlé
- Mosaïque: couvert arboré / autre végétation naturelle
- Sol nu
- Surface artificielle et zone associée
- Zone cultivée et aménagée
- Couvert herbacé, fermé-ouvert
- Couverture arbustive et/ou herbacée régulièrement inondée
- Couvert arboré, feuillu, à feuilles caduques, ouvert
- Couvert arboré, feuillu, à feuilles persistantes
- Mosaïque: terres cultivées / couvert arboré / autre végétation naturelle
- Mosaïque: terres cultivées / couvert arbustif et/ou herbacé
- Couvert arbustif, fermé-ouvert, à feuilles persistantes
- Couvert arbustif, fermé-ouvert, à feuilles caduques
- Couvert arboré, régulièrement inondé, eau salée
- Couvert arboré, régulièrement inondé, eau douce
- Pas de données

2. Kiruna, Suède. Couverture d'arbres, exploitation minière (Sentinel-2, 2023-09-08).

3. Pärnu, Estonie. Pin, bouleau et épicéa, sylviculture intensive (Sentinel-2, 2023-09-26).

4. Thessalonique, Grèce. Cultures intensives de fruits et de légumes (Sentinel-2, 2023-09-20).



5. Tazirbu, Libye. Agriculture dans l'oasis basée sur l'irrigation (Sentinel-2, 2023-09-27).

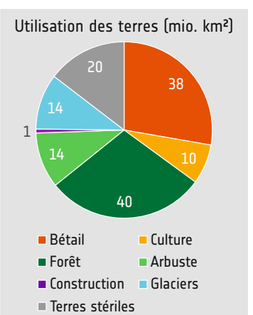
6. Abéché, Tchad. Élevage de bovins dans la savane autour de la ville (Sentinel-2, 2023-09-24).

7. Boende, R.D. Congo. Culture itinérante dans la forêt tropicale (Sentinel-2, 2023-09-08).

8.. Marchand, Afrique du Sud. Agriculture irriguée le long de la rivière (Sentinel-2, 2023-03-31).

Couverture et utilisation des sols

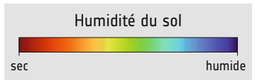
L'*occupation du sol* fait référence aux caractéristiques physiques de la surface de la Terre, y compris la végétation, les plans d'eau et les sols nus. Elle dépend des sols, du climat et de la faune qui habite une région. L'*utilisation des terres* décrit la manière dont les humains utilisent les terres, que ce soit pour l'agriculture, le développement urbain ou la conservation. Dans de nombreux cas, l'utilisation des sols est étroitement liée aux modifications de la couverture terrestre, telles que la déforestation, l'augmentation des terres agricoles et l'accroissement des surfaces imperméabilisées dû au développement de l'habitat. Les modifications de la couverture et de l'utilisation des sols peuvent avoir un impact sur les écosystèmes, la biodiversité et le climat.

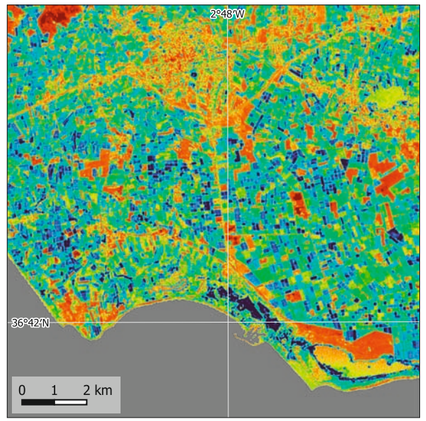


9. Surfaces terrestres couvertes par d'importantes classes d'occupation et d'utilisation des sols (surfaces en millions de km²).

1. *La Mar de Plástico autour de El Ejido, Espagne, en 2022. Données : Sentinel-2, 2022-09-10.*

2. *Indice d'humidité du sol (NDMI) de la région d'El Ejido. Données : Sentinel-2, 2022-09-10 (à gauche).*





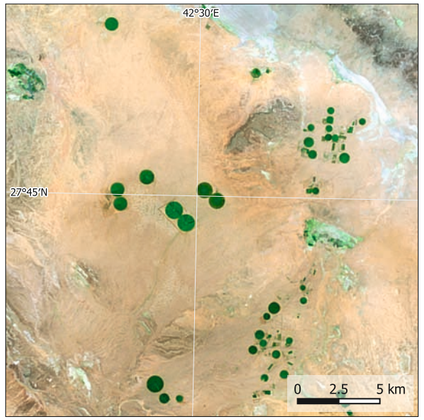
3. *La Mar de Plástico autour de El Ejido, Espagne, en 1985. Données : Landsat 5, 1985-10-17 (à droite).*

4. *Vue des serres en plastique près de El Ejido.*

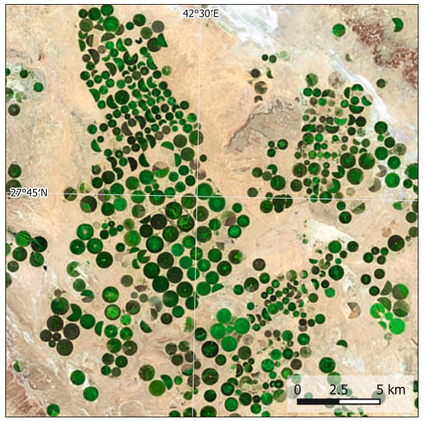
El Ejido, Espagne

La mer de plastique est une étendue célèbre pour être recouverte de serres connue sous le nom « Mar de Plástico ». La région bénéficie d'un climat méditerranéen sec et doux et est abritée au nord par les montagnes de la Sierra de Gador. Avec un peu plus de 200 mm de précipitations annuelles, l'agriculture dépend de la nappe phréatique alimentée par l'eau de la Sierra adjacente.

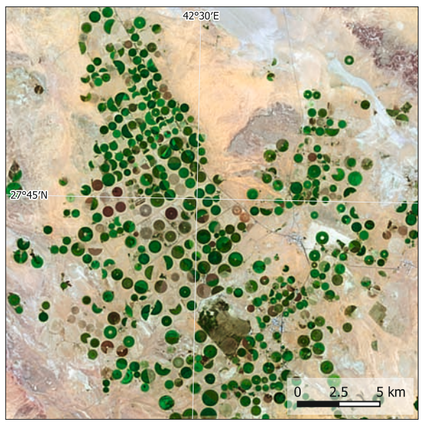
Couvrant une superficie de 30 000 hectares, la région a subi d'importants changements, bien visibles sur les images satellite. Acteur important de l'économie espagnole, la mer de plastique soutient plus de 40 000 emplois. La plupart des producteurs sont des entreprises familiales dont les superficies sont comprises entre 1 et 1,5 hectare. Ils cultivent des légumes (e.g. des tomates) dans un sol sablonneux artificiel. Le développement de la mer de plastique a différents impacts. Le paysage social est en mutation, avec des dynamiques d'emploi et des structures communautaires changeantes, en partie liées à l'immigration clandestine. Simultanément, des considérations écologiques apparaissent, notamment les modes d'utilisation de l'eau et les préoccupations concernant le ruissellement des produits chimiques, ce qui incite à explorer l'équilibre entre le progrès et la durabilité environnementale.



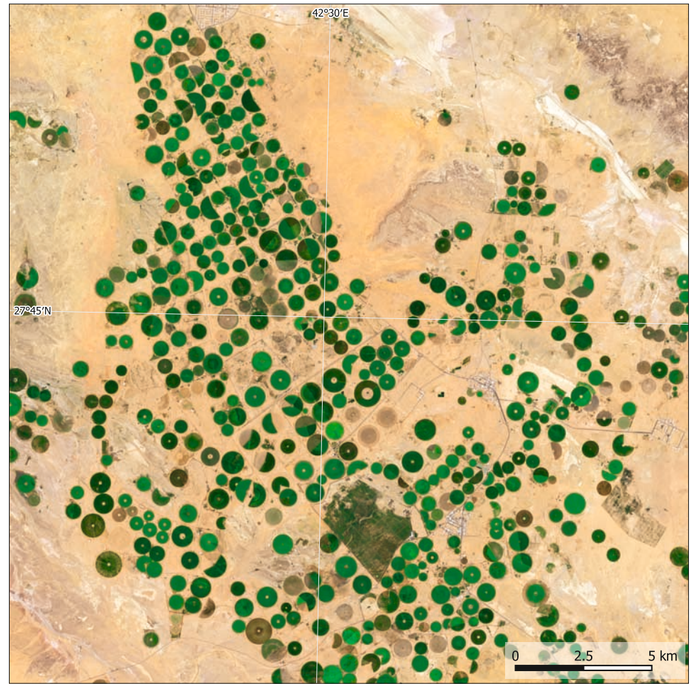
5. *Premiers champs irrigués par pivot central près de Ha'il, Arabie saoudite, en 1985. Données : Landsat 5, 1985-04-15.*



6. *Jusqu'en 1995, le nombre de champs irrigués a augmenté de manière significative. Durant cette période, l'exportation de blé a atteint son maximum. Données : Landsat 5, 1995-04-27.*



7. *Après 1995, l'intensité des cultures a diminué en raison de la situation économique et des problèmes de salinisation. Données : Landsat 5, 2015-04-18.*



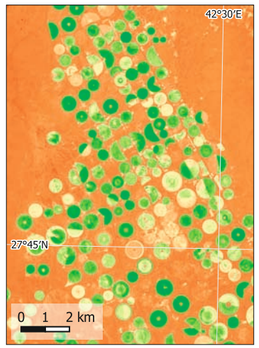
Agriculture dans le désert — Ha'il, Arabie saoudite

L'Arabie saoudite est l'un des pays les plus arides du monde et est principalement recouverte de déserts. L'environnement désertique va de pair avec une densité de population relativement faible. L'économie du pays dépend en grande partie de l'exportation de combustibles fossiles (pétrole et gaz), mais l'Arabie saoudite exporte également du blé. À l'exception des oasis, l'agriculture en Arabie saoudite est principalement basée sur l'élevage extensif. L'exploitation des nappes phréatiques fossiles pour l'irrigation a permis d'intensifier la production de blé et d'autres cultures.

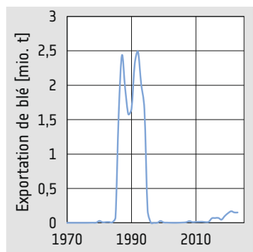
La région autour de la ville de Ha'il est située au-dessus d'une importante couche d'eau souterraine qui a été exploitée de manière de plus en plus intensive depuis les années 1970. Alors que les techniques utilisées à l'origine entraînaient l'évaporation d'une grande partie de l'eau ainsi qu'une salinisation importante du sol, les méthodes utilisées aujourd'hui sont mieux adaptées à l'environnement. Néanmoins, l'utilisation des eaux souterraines fossiles prendra fin lorsque les nappes phréatiques seront épuisées.

Les images satellites montrent un bon contraste entre la végétation et le désert environnant, comme en témoignent les nombreux champs d'irrigation à pivot central. Elles sont très bien adaptées pour surveiller le développement des champs irrigués et l'état des cultures. Il est donc possible d'utiliser les données pour l'agriculture de précision, car elles permettent de savoir où l'approvisionnement en eau et en engrais doit être optimisé.

8. *Situation des champs irrigués près de Ha'il, Arabie saoudite, in 2023. Données : Sentinel-2, 2023-04-26.*



9. *Le NDVI (normalised difference vegetation index) permet de suivre l'état des cultures.*



10. *Développement des exportations de blé d'Arabie saoudite.*

1. Campo Novo de Rondônia, Brésil, en 1991. L'image montre les structures en « arêtes de poisson » pendant la phase initiale de la déforestation. Données : Landsat 5, 1991-06-28

2. Campo Novo de Rondônia, Brésil. Vue aérienne des incendies lors de la déforestation.

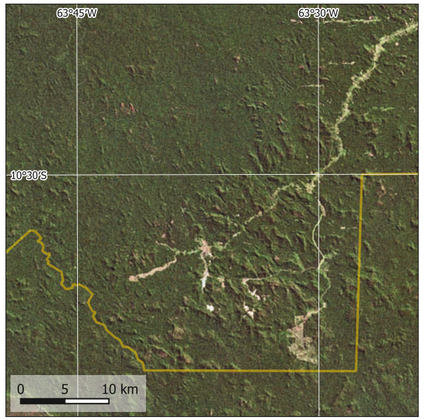
Rondônia, Brésil

Rondônia est l'un des États du Brésil, situé dans la partie sud-ouest du bassin amazonien. La population de l'État est passée d'environ 40 000 habitants en 1950 à plus de 1,8 millions en 2021. Ce développement s'est accompagné d'un changement significatif de la couverture végétale. À l'origine, près de 90 % de la surface était couverte par la forêt tropicale. Aujourd'hui, c'est devenu l'un des exemples les plus connus de déforestation dans le bassin amazonien. Maintenant, environ un tiers de la zone est encore couvert de forêts.

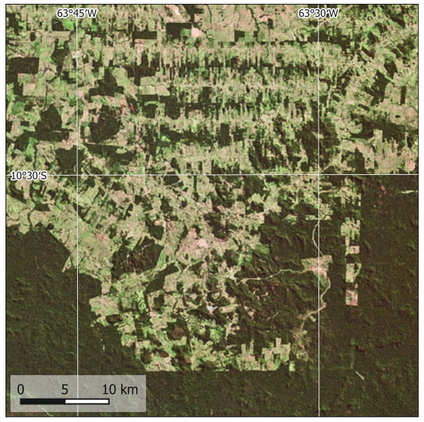
Les cartes satellites montrent le développement autour de Campo Novo de Rondônia, qui comptait 14 200 habitants en 2020. La série d'images montre que la déforestation commence par la construction de routes, le long desquelles les colons commencent à défricher les forêts pour gagner des terres agricoles.

Seule la partie sud de la zone figurant sur les cartes satellites est encore boisée — il s'agit d'une partie du territoire indigène Uru-Eu-Uaw-Uaw, créé par le gouvernement brésilien pour protéger la population indigène. Le premier contact avec l'une des tribus vivant ici, le peuple Uru-Eu-Uaw-Uaw, a eu lieu en 1981.

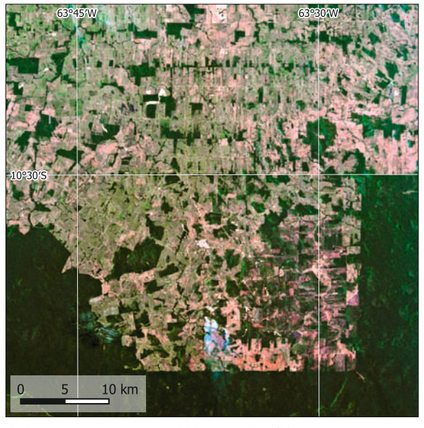
3. Superficie déboisée au Brésil par an.



4. Campo Novo de Rondônia in 1984. Ligne jaune : frontière du territoire indigène Uru-Eu-Uaw-Uaw. Données : Landsat 5, 1984-06-24.



5. Campo Novo de Rondônia, 2010. Les défrichements ont entraîné un net recul des surfaces boisées. Données : Landsat 5, 2010-05-15.



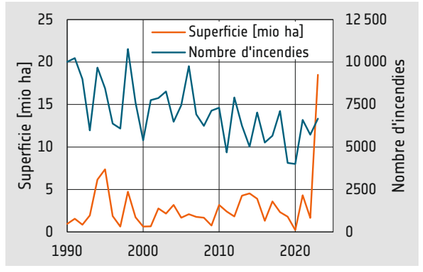
6. Campo Novo de Rondônia, 2023. La forêt a été en grande partie remplacée par des terres agricoles et ne subsiste que dans le territoire Uru-Eu-Uaw-Uaw au sud. Données : Sentinel-2, 2023-10-07.

Colombie-Britannique, Canada

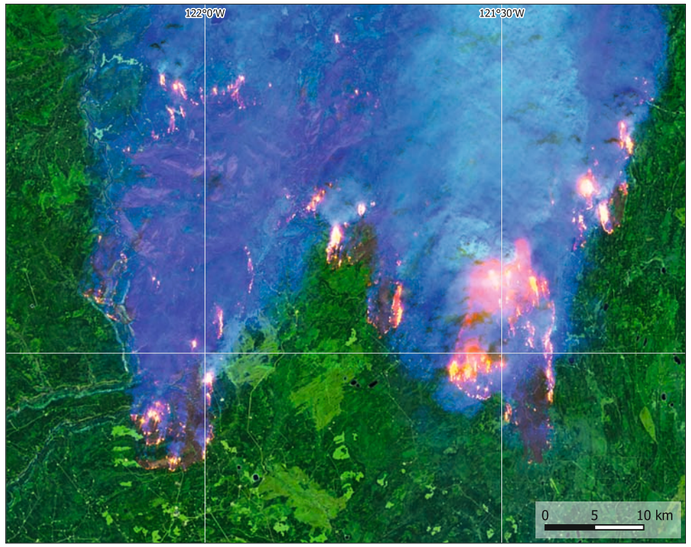
Les incendies de forêt sont une préoccupation récurrente dans la province canadienne de la Colombie-Britannique. Les incendies de forêt se produisent lorsque la végétation, les conditions de sécheresse et d'autres facteurs se combinent, entraînant des flammes incontrôlées qui se propagent sur de vastes zones.

En 2023, les incendies de forêt au Canada au cours du premier semestre ont touché une superficie de 48 000 km², par rapport à la superficie de 21 000 km² brûlée au cours d'une année moyenne. On suppose que le changement climatique a joué un rôle, en créant des conditions plus chaudes et plus sèches qui augmentent le risque et la propagation des incendies. La foudre et les activités humaines, telles que les feux de camp et la négligence, ont également été des facteurs contributifs.

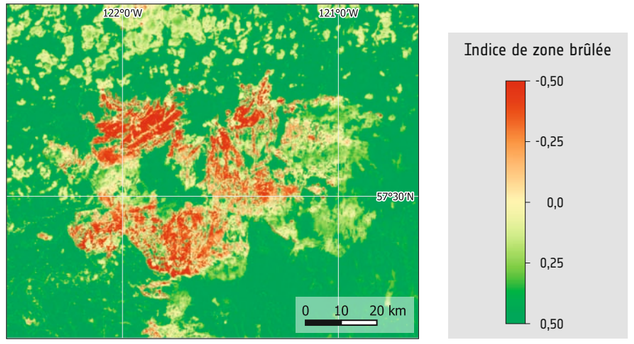
Les conséquences des incendies de forêt sont considérables. Ils menacent les habitats de la faune et de la flore, dégradent la qualité de l'air et endommagent les bassins hydrographiques. Les particules libérées dans l'air peuvent parcourir des milliers de kilomètres. Les incendies de forêt affectent les communautés locales, perturbent les transports et ont un impact sur l'économie, en particulier sur l'industrie du bois.



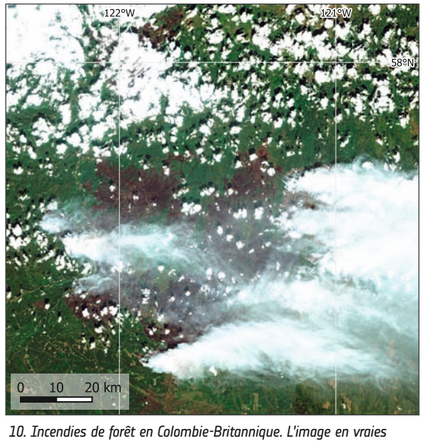
7. Nombre d'incendies de forêt et superficie brûlée par an au Canada. En 2023, la superficie brûlée a augmenté de façon spectaculaire.



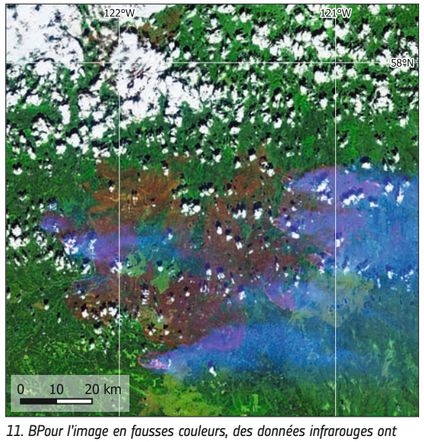
8. Colombie-Britannique, image en fausses couleurs. Données : Sentinel-2, 2023-05-18.



9. Colombie-Britannique, indice de surface brûlée. Dérivé des données de Sentinel-2, 2023-06-07.



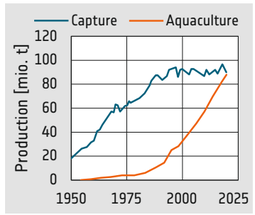
10. Incendies de forêt en Colombie-Britannique. L'image en vraies couleurs montre principalement de la fumée et des nuages. Données : Sentinel-2, 2023-06-07.



11. BPour l'image en fausses couleurs, des données infrarouges ont été utilisées, montrant des incendies à travers la fumée. Données : Sentinel-2, 2023-06-07.

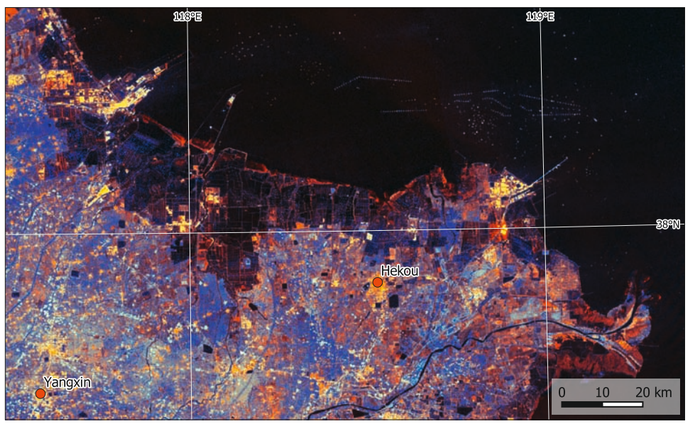
12. Les grands incendies de forêt peuvent être très difficiles à combattre.

1. Image satellite de la côte sud de la baie de Bohai montrant les zones d'aquaculture le long de la côte. Les couleurs de la mer montrent une forte charge sédimentaire dans les eaux peu profondes. Données : Sentinel-2, 2023-04-29.



2. La demande croissante et la diminution des ressources naturelles ont entraîné un transfert de la production des pêches de capture vers l'aquaculture.

3.. L'image satellite radar de la côte sud de la baie de Bohai montre l'utilisation intensive des terres par un mélange d'habitations, d'agriculture et d'aquaculture. Les activités en mer, telles que les bateaux de pêche et les parcs éoliens, apparaissent comme des points lumineux dans la mer. Données : Sentinel-1, 2023-04-26.



Aquaculture — Baie de Bohai

L'aquaculture mondiale, qui produit des poissons, des crevettes, des moules et des plantes aquatiques, n'a cessé d'augmenter au fil des ans. La production mondiale a atteint près de 90 millions de tonnes en 2020 (FAO), soit la moitié de la production totale de fruits de mer destinée à la consommation humaine. Les principaux pays producteurs d'aquaculture sont la Chine, l'Inde, l'Indonésie, le Vietnam, le Bangladesh et la Norvège. Ce secteur fait vivre des millions de personnes et constitue une source vitale de nourriture et de revenus.

L'aquaculture joue un rôle important dans l'économie de la région, la Chine étant le plus grand producteur mondial de fruits de mer d'élevage. En incluant les algues, la Chine a produit plus de 64 millions de tonnes de produits de la mer d'élevage en 2020. La baie de Bohai est entourée de vastes zones côtières plates propices à l'aquaculture, avec des fermes allant des petites exploitations traditionnelles aux grandes entreprises commerciales.

4. Section de la côte sud de la baie de Bohai, l'utilisation des terres a considérablement changé. Données : Landsat 5, 2007-05-05.

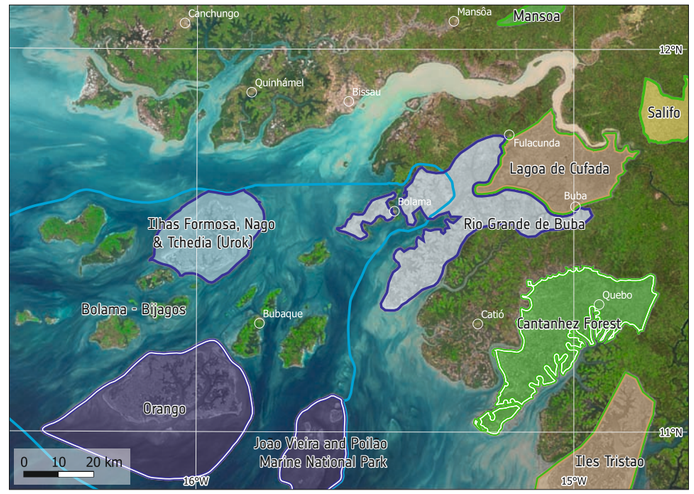
5. Section de la côte sud de la baie de Bohai pendant la phase initiale des activités d'aquaculture, montrant les plaines de boue étendues de la zone intertidale d'origine. Données : Landsat 5, 198905-17.

6. Ilha de Orango, archipel de Bissago, à marée haute. Données : Sentinel-2, 2023-04-24.

7. Ilha de Orango à marée basse. Données : Sentinel-2, 2023-04-14.

Protection de la nature

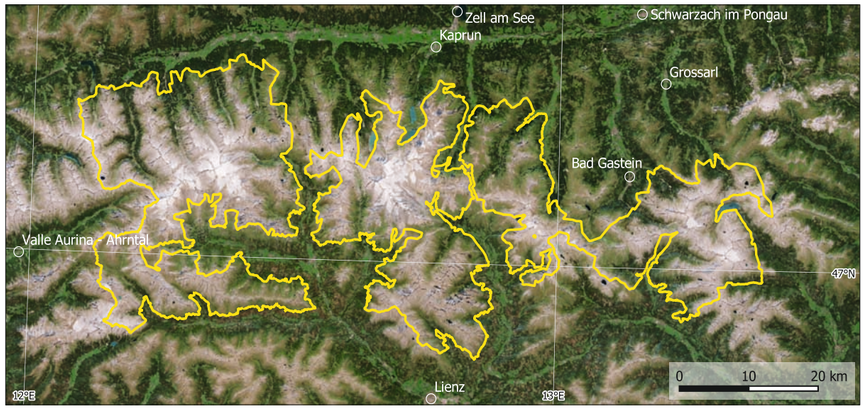
La protection de la nature est importante pour préserver la biodiversité et maintenir la santé des écosystèmes. Une protection efficace de la nature nécessite des efforts de collaboration aux niveaux local, national et international. Il s'agit de mettre en œuvre des politiques qui concilient la conservation et les besoins socio-économiques, d'impliquer les parties prenantes et de sensibiliser à l'importance de la conservation de la biodiversité. Dans le cadre de ces tâches, les satellites sont devenus un outil important. Cela apparaît clairement lorsque l'on considère des habitats uniques tels que les mangroves et les régions alpines.
Les mangroves sont des écosystèmes côtiers vitaux qui servent de pépinières pour la vie marine, protègent contre l'érosion côtière et stockent le carbone. Elles sont menacées par des activités humaines telles que l'urbanisation, l'aquaculture et la pollution. Les efforts de conservation se concentrent sur la création de zones protégées, la restauration des habitats dégradés et l'implication des communautés locales dans des pratiques de gestion durable.
De même, les habitats alpins, avec leur biodiversité et leurs fonctions de régulation de l'eau, sont soumis à la pression du changement climatique, du tourisme et de l'utilisation des sols. Initiatives de conservation visent à préserver ces écosystèmes en créant des zones protégées et en promouvant des procédures économiques durables.



8. Zones de protection de la nature sur la côte de Bissago. Données : Sentinel-2, 2023-04-24.

9. L'image en fausses couleurs infrarouges montre les mangroves en rouge plus foncé. Données : Sentinel-2, 2023-04-24.

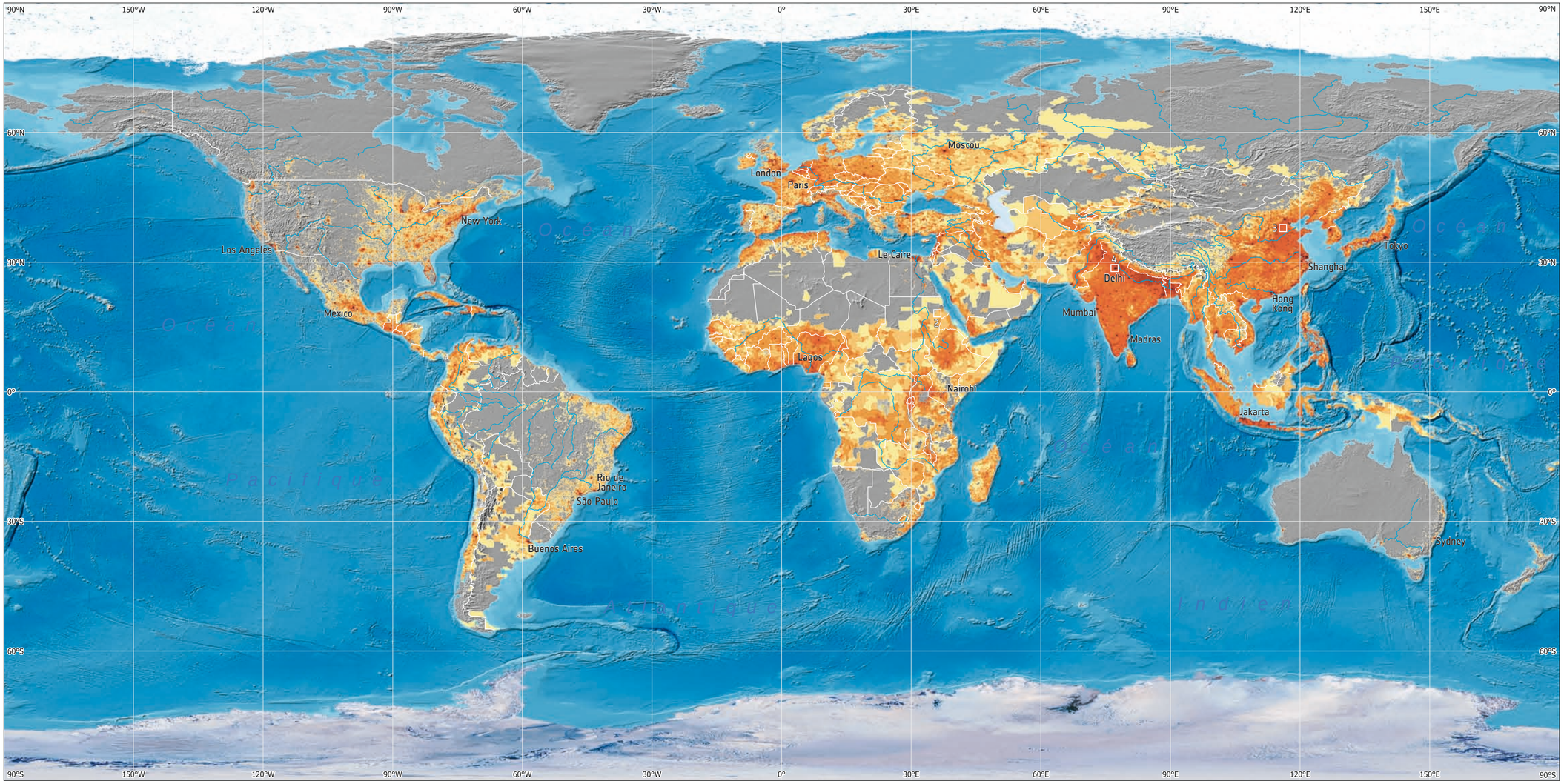
10. Vue de la plaine intertidale le long de la côte de Bissago.



11. Vue du Grossglockner, le plus haut sommet du parc national Hohe Tauern.

12. Le parc national Hohe Tauern, en Autriche, s'étend sur les régions alpines du pays. Données : Sentinel-2.

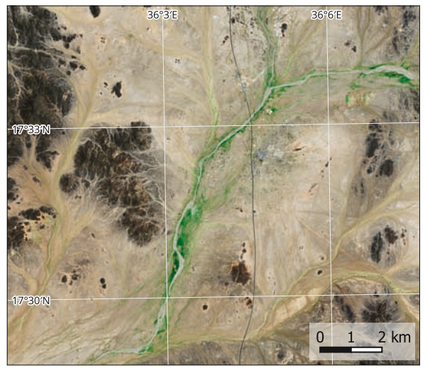
ANTHROPOSPHÉRE



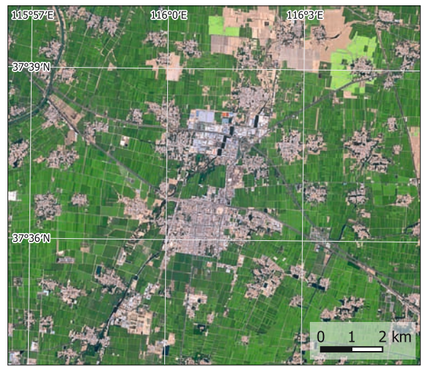
1. Densité de la population (données : Gridded Population of the World, 2020).

Habitants par km²

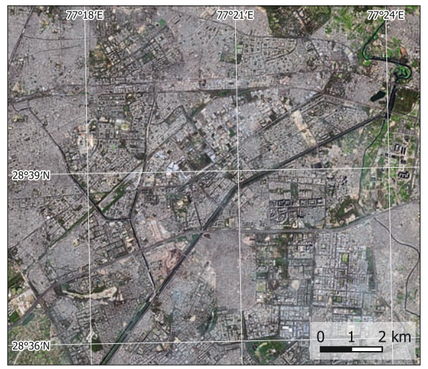
- <3
- 3 - 10
- 10 - 30
- 30 - 100
- 100 - 300
- 300 - 1000
- 1000 - 3000
- > 3000



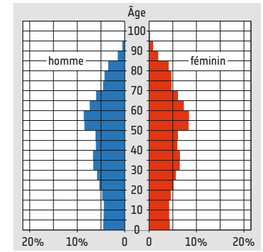
2. Derudeb, Soudan. Données : Sentinel-2, 2024-04-13. Densité de population de 3 à 10 habitants par km².



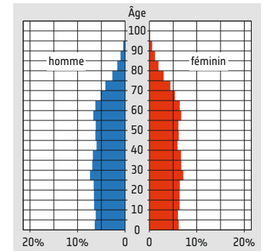
3. Longhuazhen, Chine. Données : Sentinel-2, 2024-04-18. Densité de population de 100 à 300 habitants par km².



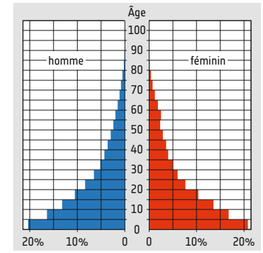
4. Delhi, Inde. Données : Sentinel-2, 2024-03-19. Densité de population supérieure à 3 000 habitants par km².



5a. Pyramide des âges, Allemagne 2022.



5b. Pyramide des âges, États-Unis d'Amérique 2021.

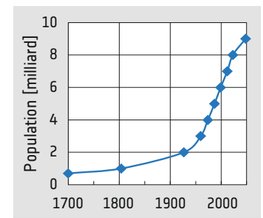


5c. Pyramide des âges, Niger 2021.

Répartition et croissance de la population

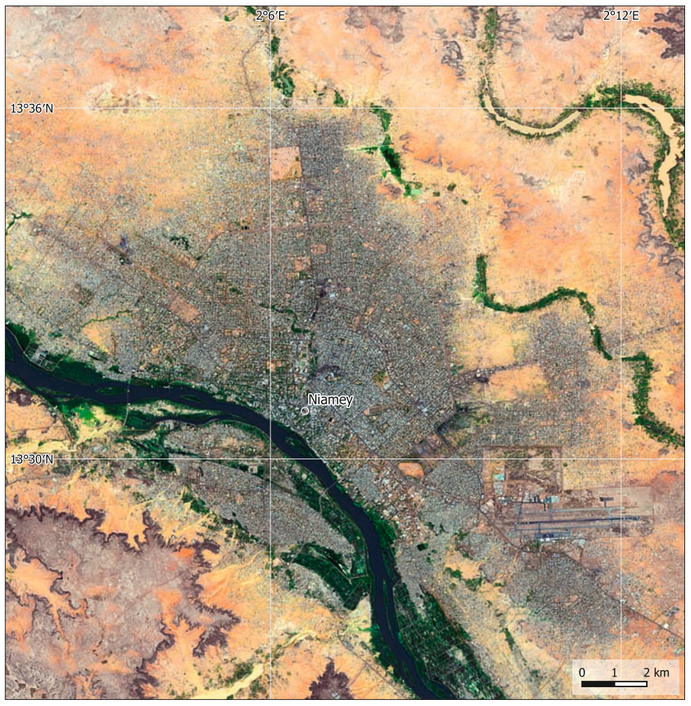
La population humaine de la Terre est répartie très inégalement. De vastes régions ne comptent pratiquement aucun habitant, principalement les déserts, les régions polaires et les forêts denses. Le contraste est saisissant avec les régions densément peuplées, comme la Chine orientale, la vallée du Gange en Inde et l'Europe occidentale.

La population mondiale a connu une augmentation considérable, en particulier au cours des 100 dernières années. Alors que de nombreuses sociétés stagnent et vieillissent, il existe des sociétés jeunes qui se développent rapidement. La plupart des scénarios démographiques montrent qu'un nombre maximum de 10 à 11 milliards d'êtres humains sera atteint au cours des prochaines décennies.



6. Évolution de la population mondiale (en milliards) depuis 1700. Les points marquent les années au cours desquelles les milliards ont été atteints.

1. Niamey, Niger, en 1984. Données : Landsat 4, 1984-10-13.

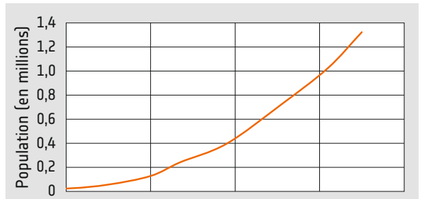


2. Niamey, Niger, en 2023. La superficie de la ville a augmenté de manière significative, accompagnée par le développement de grands projets d'infrastructure. Données : Sentinel-2, 2023-02-27.

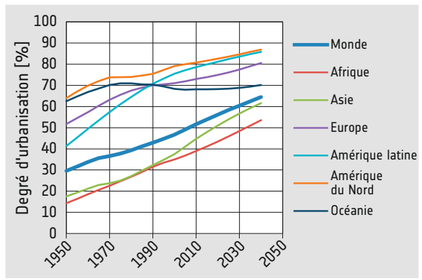
Niamey, Niger

Niamey, la capitale du Niger, a connu un développement démographique remarquable au fil des ans. Située sur les rives du fleuve Niger, la ville s'est considérablement développée depuis l'indépendance du Niger en 1960. Au tournant du siècle, elle est devenue l'une des villes d'Afrique dont la croissance est la plus rapide.

Plusieurs facteurs ont contribué au boom démographique de Niamey, notamment l'amélioration des services de santé et des possibilités d'éducation. Le facteur le plus important est l'exode rural. Ces facteurs ont augmenté la population globale de la ville et ont également influencé la structure des âges, avec une moyenne d'âge de 21 ans. Cette population jeune est une ressource pour le développement de la ville, car elle offre de la main-d'œuvre et un potentiel d'innovation. Cependant, elle présente également d'énormes défis en termes d'éducation, d'emploi et de soins de santé.



3. Niamey. Évolution du nombre d'habitants depuis 1900. Notez la forte augmentation à partir du milieu du 20e siècle.



4. Évolution constatée et prévue du degré d'urbanisation dans différentes parties du monde.

5. Pont de Niamey traversant le fleuve Niger, l'un des projets d'infrastructure de la ville.

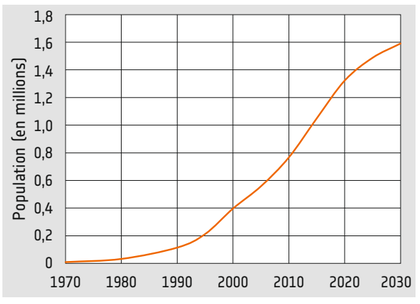
Développement urbain en Chine

La ville de Suqian, située dans la province de Jiangsu, dans l'est de la Chine, est un exemple typique du développement et de la croissance urbaine rapides dans cette region. Les origines de Suqian remontent à l'Antiquité, lorsqu'elle servait de centre de transport le long du Grand Canal, reliant les centres économiques du nord et du sud de la Chine. Au fil des siècles, elle est devenue un centre régional d'échanges et de commerce.

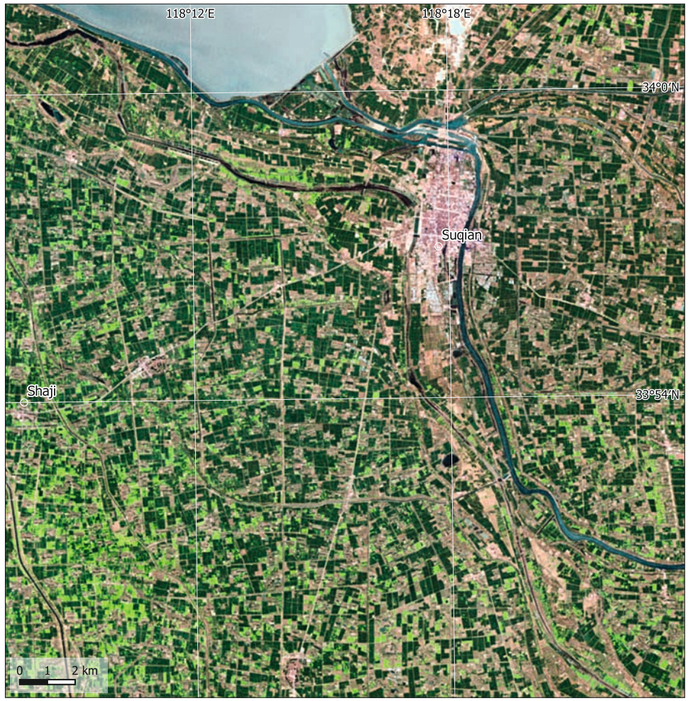
Au cours des dernières décennies, Suqian a connu un essor économique qui se reflète dans les changements d'occupation des sols visibles sur les images satellite. Le produit intérieur brut (PIB) est passé de 1 milliard d'euros en 2000 à plus de 30 milliards d'euros en 2020. Cette croissance est due aux investissements dans l'industrie, l'agriculture et la technologie, avec des valeurs d'exportation annuelles dépassant les 20 milliards d'euros. La situation stratégique de la ville, ses excellentes infrastructures et ses politiques favorables aux entreprises ont attiré plus de 10 000 entreprises nationales et internationales.

Dans le contexte d'une croissance rapide, Suqian s'est engagée en faveur du développement durable et d'initiatives écologiques. La ville compris l'établissement d'une couverture forestière de plus de 800 kilomètres carrés et l'adoption de sources d'énergie renouvelables, qui répondent à 30 % de ses besoins énergétiques. Les efforts de planification urbaine ont déjà permis de réduire les niveaux de pollution et d'augmenter les espaces verts.

6. Vue de Suqian.

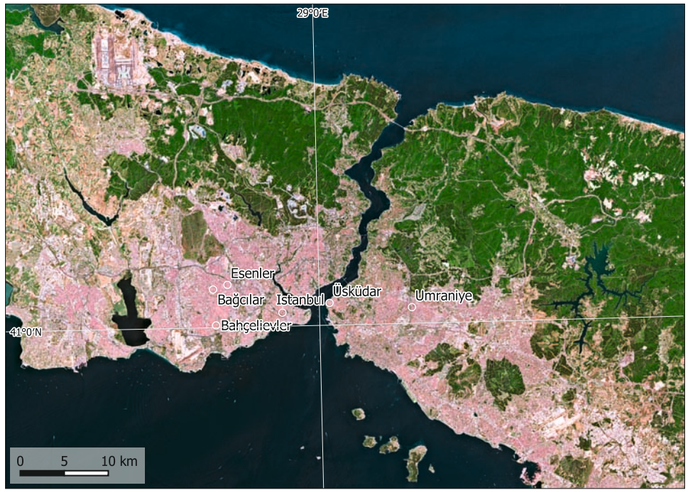


7. Suqian. Évolution des chiffres de la population depuis 1970. La croissance rapide a commencé avec l'ouverture de la Chine après 1990.



8. Suqian, Chine, en 1987. Données : Landsat 4, 1984-04-21.

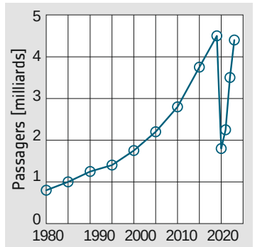
9. Suqian, Chine, en 2023. Les zones résidentielles, commerciales et industrielles ont remplacé une grande partie des terres agricoles. Données : Sentinel-2, 2023-04-16.



1. Istanbul, Turquie, en 2023. Vue d'ensemble de la carte satellite. Données : Sentinel-2, 2023-07-23.

Nouvel aéroport d'Istanbul, Turquie

Ouvert en 2019, le nouvel aéroport d'Istanbul est rapidement devenu l'aéroport le plus fréquenté d'Europe en termes de trafic de passagers, avec plus de 64 millions de passagers en 2022. La construction du nouvel aéroport d'Istanbul a été une énorme entreprise financière, qui a coûté plus de 10 milliards d'euros.



2. Au cours des dernières décennies, le nombre global de passagers aériens a connu une augmentation significative. Cette évolution a été brièvement interrompue par la pandémie de Covid-19 entre 2020 et 2022.

L'aéroport est conçu pour le long terme, avec une capacité potentielle de plus de 200 millions de passagers par an une fois qu'il sera pleinement opérationnel. Il s'agit de l'un des aéroports les plus fréquentés au monde, ce qui souligne le rôle d'Istanbul en tant qu'important centre mondial de voyage et de commerce. Le nouvel aéroport d'Istanbul devrait avoir une influence économique profonde et apporter une contribution substantielle au PIB de la Turquie. En outre, il génère des milliers d'emplois directs et indirects.

Les cartes satellite montrent l'impact considérable de l'aéroport sur le paysage. Situé à environ 30 kilomètres au nord-ouest du centre-ville, le nouvel aéroport a remplacé des forêts et des terres agricoles sur une superficie de près de 40 kilomètres carrés. En outre, le réseau routier desservant l'aéroport a été considérablement amélioré en même temps que le projet.

3. Vue aérienne du nouvel aéroport d'Istanbul Havalimanı, en direction de l'ouest.

4. Région au nord-ouest d'Istanbul, Turquie, en 2010. Image satellite en vraies couleurs montrant les forêts et les terres agricoles avant la construction du nouvel aéroport. Données : Landsat 5, 2010-09-18.

5. Site de construction du nouvel aéroport d'Istanbul en 2017. Image satellite en vraies couleurs mettant en évidence l'étendue des travaux de construction. Données : Sentinel-2, 2017-07-24.

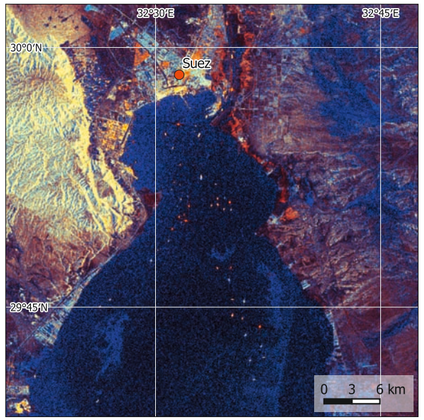
6. Aéroport d'Istanbul, Turquie, en 2023. Carte satellite en vraies couleurs. Données : Sentinel-2, 2023-07-23.

Canal de Suez, Égypte

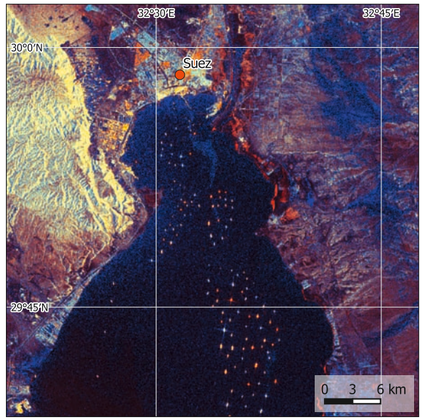
Le canal de Suez est une voie d'eau artificielle reliant la mer Méditerranée à la mer Rouge. Ouvert en 1869, le canal a considérablement raccourci la route maritime entre l'Europe et l'Asie, permettant aux navires d'éviter le long et dangereux voyage autour de l'Afrique. L'emplacement stratégique du canal en a fait un lien vital entre l'Orient et l'Occident, contribuant de manière significative au commerce mondial.

En mars 2021, l'Ever Given, un porte-conteneurs de 400 mètres de long capable de transporter plus de 20 000 conteneurs, s'est échoué dans la partie sud du canal en raison de conditions météorologiques défavorables. Cet échouage a entraîné la fermeture temporaire du canal, ce qui a considérablement perturbé les chaînes d'approvisionnement mondiales. Des satellites optiques et radar ont capturé l'Ever Given, bloquant l'ensemble du canal, et l'embouteillage provoqué par l'accident pour les navires en attendante d'entrer dans le canal.

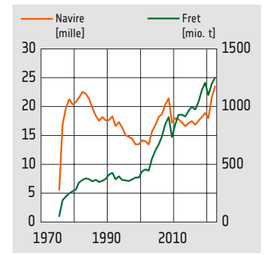
7. Suez, Égypte, avec l'extrémité sud du canal de Suez, 2021-03-29. L'image satellite en vraies couleurs montre le porte-conteneurs Ever Given coincé dans le canal, bloquant tout le trafic. Données : Sentinel-2.



8. Image radar de Suez, Égypte, avec l'extrémité sud du canal de Suez, 2021-03-21. L'image montre un trafic normal dans le canal et seulement quelques navires en attente. Données : Sentinel-1.

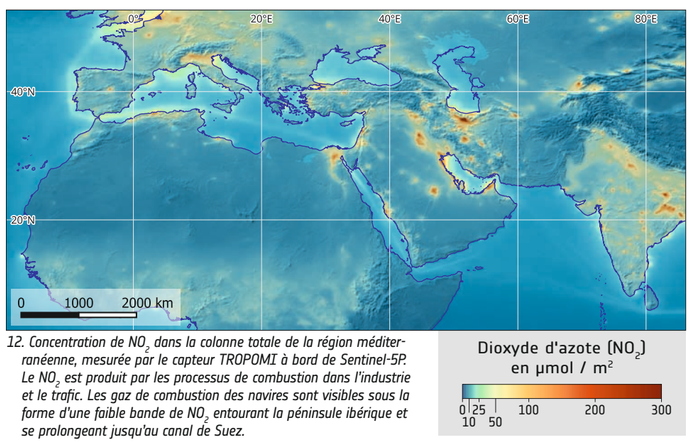


9. Image radar de Suez, Égypte, avec l'extrémité sud du canal de Suez, 2021-03-27. Un embouteillage s'est formé en raison du blocage du canal. Données : Sentinel-1.

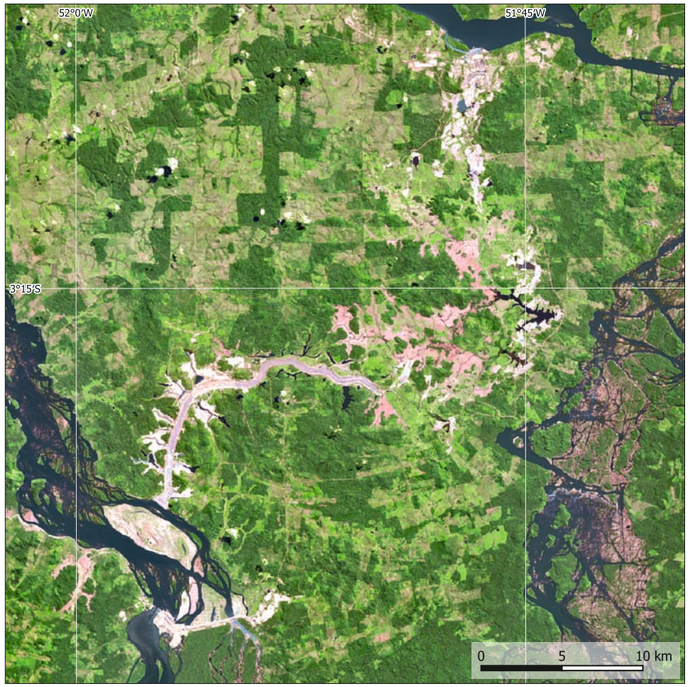


10. L'importance croissante du trafic international se traduit par le développement du transport de marchandises par le canal de Suez. Dans le même temps, le nombre de navires passant par le canal a beaucoup moins évolué, car des navires plus grands ont été utilisés.

11. L'Ever Given, un porte-conteneurs de la compagnie maritime Evergreen. Avec sa longueur de près de 400 mètres, il est l'un des plus grands porte-conteneurs du monde et peut transporter plus de 20 000 conteneurs standard.



12. Concentration de NO_2 dans la colonne totale de la région méditerranéenne, mesurée par le capteur TROPOMI à bord de Sentinel-5P. Le NO_2 est produit par les processus de combustion dans l'industrie et le trafic. Les gaz de combustion des navires sont visibles sous la forme d'une faible bande de NO_2 entourant la péninsule ibérique et se prolongeant jusqu'au canal de Suez.

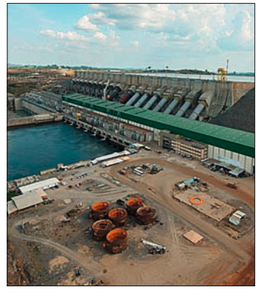


1. Travaux de construction le long du fleuve Xingu près d'Altamira en 2015. Données : Landsat 5, 2015-07-15.

Énergie hydraulique — Barrage de Belo Monte, Brésil

La centrale électrique de Belo Monte, située dans l'État du Pará, au nord du Brésil, est l'une des plus grandes centrales hydroélectriques au monde. Sa construction a débuté en 2011 et s'est achevée en 2019. La centrale utilise l'eau du fleuve Xingu, un affluent majeur de l'Amazone. La capacité totale installée de plus de 11 000 mégawatts (MW) est suffisante pour fournir de l'électricité à plus de 60 millions de personnes. La centrale compte 18 unités de production d'électricité, chacune d'une capacité de 611 MW.

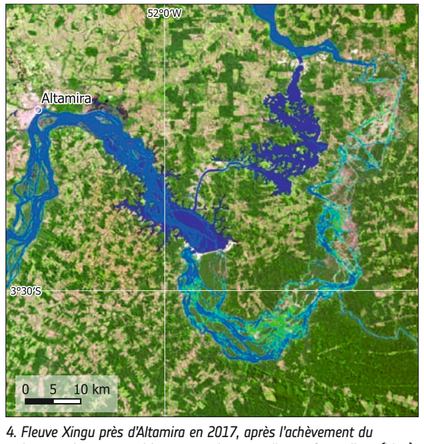
La construction de la centrale électrique de Belo Monte a été très controversée. Les écologistes et les groupes indigènes se sont inquiétés de l'impact de la centrale sur l'écosystème local et sur les moyens de subsistance des populations indigènes de la région. La construction de la centrale a entraîné l'inondation d'une vaste zone forestière et le déplacement de milliers de personnes. En outre, la modification du régime des eaux a eu un impact sur l'écosystème du fleuve Xingu en aval du barrage. Malgré ces préoccupations, le gouvernement brésilien a défendu la construction de la centrale électrique de Belo Monte, en estimant qu'elle était nécessaire pour répondre aux besoins énergétiques du pays et promouvoir le développement économique. La centrale a également été présentée comme un moyen de réduire la dépendance du Brésil à l'égard des combustibles fossiles et de contribuer à la lutte contre le changement climatique.



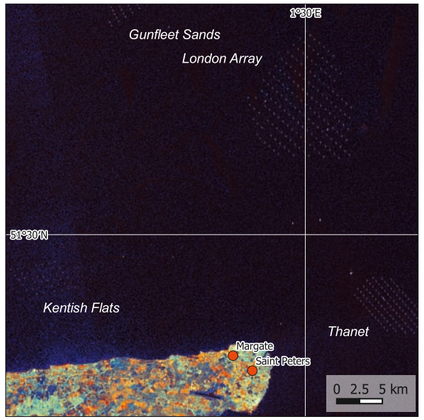
5. Vue de la centrale électrique de Belo Monte pendant la construction.

2. Fleuve Xingu près d'Altamira en 2011. Image satellite en vraies couleurs montrant les forêts et les terres agricoles avant la construction du barrage. Données : Landsat 5, 2011-07-27.

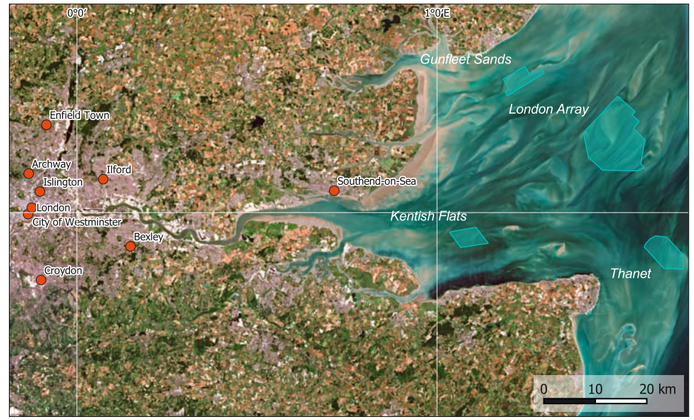
3. Fleuve Xingu près d'Altamira en 2017, après l'achèvement du barrage. Image satellite en vraies couleurs montrant les plans d'eau, les forêts et les terres agricoles. Données : Sentinel-2, 2017-07-28.



4. Fleuve Xingu près d'Altamira en 2017, après l'achèvement du barrage. La superposition montre les nouvelles surfaces d'eau (bleu) et les cours d'eau tombés à sec (vert clair). Image satellite en vraies couleurs. Données : Sentinel-2, 2017-07-28.



6. Image radar de parcs éoliens dans l'estuaire de la Tamise. Données : Sentinel-1, 2024-03-02.



7. Image satellite de l'estuaire de la Tamise avec ses parcs éoliens offshore. Données : Sentinel-2, 2023-07-07.

Récolter l'énergie éolienne au-dessus de la mer

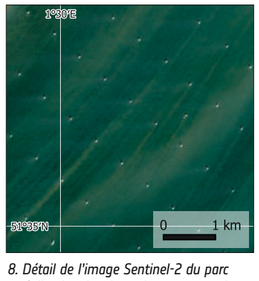
L'estuaire de la Tamise, situé dans le sud-est de l'Angleterre, est devenu un site pour l'installation de parcs éoliens en mer. Ces parcs éoliens exploitent les courants éoliens forts et constants présents dans l'estuaire.

Leur proximité avec des zones densément peuplées comme Londres garantit une distribution efficace de l'électricité produite, en minimisant les pertes de transmission. En outre, l'implantation en mer réduit la pollution visuelle et sonore par rapport aux parcs éoliens terrestres. Les parcs éoliens en mer contribuent à la réalisation des objectifs en matière d'énergies renouvelables, ce qui permet de réduire les émissions de carbone et de lutter contre le changement climatique. Le développement de parcs éoliens dans l'estuaire de la Tamise pose également des problèmes, notamment en ce qui concerne les impacts potentiels sur les écosystèmes marins et les habitats de la faune et de la flore.

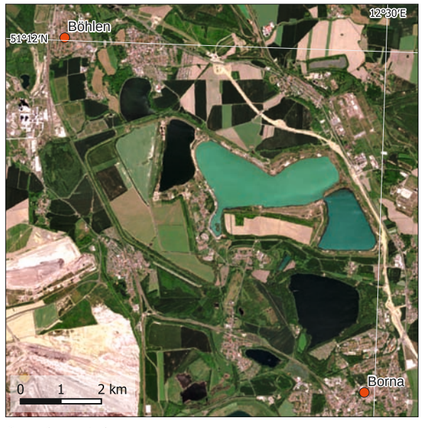
Du lignite à l'énergie solaire

Située dans le Land de Saxe, Allemagne, la ferme solaire près de Böhlen (Solarpark Böhlen) utilise la lumière du soleil de la région pour produire de l'électricité propre et durable. Cette centrale solaire, la plus grande de ce type en Allemagne, est composée de panneaux photovoltaïques (PV) qui convertissent directement la lumière du soleil en énergie électrique. L'installation couvre environ 100 hectares de terrain, accueillant plus de 300 000 panneaux photovoltaïques. Avec une capacité totale installée supérieure à 100 mégawatts (MW), cette installation est capable de produire suffisamment d'électricité propre pour alimenter plus de 30 000 foyers par an.

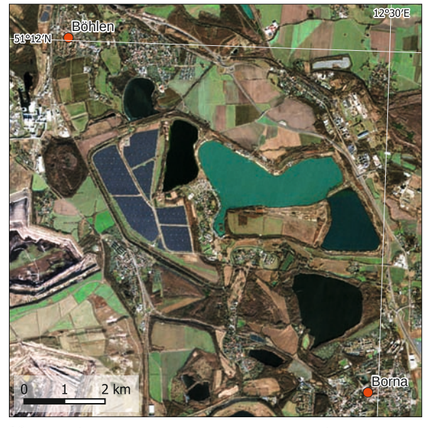
L'installation de la centrale solaire près de Böhlen s'inscrit dans le cadre des objectifs ambitieux de l'Allemagne en matière d'*Energiewende* (transition énergétique), qui vise à abandonner les combustibles fossiles au profit des sources d'énergie renouvelables.



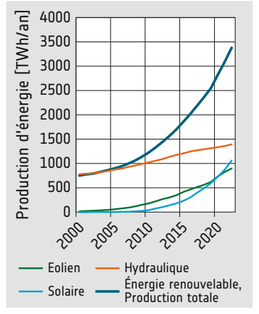
8. Détail de l'image Sentinel-2 du parc éolien London Array. Les courants de marée remuent les sédiments.



9. La région située au sud de la ville allemande de Leipzig a connu une exploitation intensive de lignite à ciel ouvert, qui a façonné le paysage. Certaines parties des zones minières ont été remises en culture et transformées en zones de loisirs. Sentinel-2, 2017-05-27.



10. Une partie de la zone d'une ancienne mine de lignite accueille aujourd'hui une centrale solaire (Solarpark Böhlen). Données : Sentinel-2, 2024-01-28.



11. La production mondiale d'énergie électrique à partir de sources renouvelables, en particulier l'énergie éolienne et solaire, augmente rapidement.

A

Absorption — Processus par lequel l'énergie rayonnante est retenue par une substance.

Aérosol — Colloïde de particules solides ou liquides en suspension dans un gaz (par exemple, fumée, brouillard).

Albédo — Rapport entre le rayonnement solaire sortant réfléchi par un objet et le rayonnement solaire entrant incident.

Altimètre — Instrument actif utilisé pour mesurer l'altitude d'un satellite au-dessus d'un niveau fixe. Associé à la connaissance exacte de l'orbite, il permet de déterminer la topographie.

Amplitude — L'ampleur du déplacement d'une onde par rapport à une valeur moyenne. Pour une onde harmonique simple, il s'agit du déplacement maximal par rapport à la moyenne.

Apogée — Point de l'orbite elliptique d'un satellite où sa distance à la Terre est maximale.

Ariane — Véhicules de lancement développés pour l'ESA par une filiale de la société European Aeronautic Defence and Space Company (EADS) et lancés depuis le Centre spatial de Kourou en Guyane française.

ASAR *(Advanced Synthetic Aperture Radar)* — capteur radar du satellite ENVISAT fonctionnant en bande C.

ASTER *(Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer)* — Instrument d'imagerie embarqué sur le satellite Terra de la NASA. ASTER est utilisé pour obtenir des cartes détaillées de la température, de l'émissivité, de la réflectance et de l'élévation de la surface terrestre.

Atténuation — diminution de la puissance d'un signal en cours de transmission. L'atténuation peut être exprimée en décibels et peut être causée par des interférences telles que la pluie, les nuages ou les signaux de radiofréquence.

AVHRR *(Advanced Very High Resolution Radiometer)* — Instrument de balayage à cinq canaux qui mesure quantitativement le rayonnement électromagnétique sur les satellites environnementaux de la NOAA. Il détermine la couverture nuageuse et la température de surface. Les détecteurs visibles et infrarouges observent la végétation, les nuages, les lacs, les rivages, la neige et la glace.

Azimut — Direction, en degrés par rapport au nord, dans laquelle une antenne doit être orientée pour recevoir un signal satellite. La distance angulaire est mesurée dans le sens des aiguilles d'une montre.

B

Bande — Région du spectre électromagnétique à laquelle répond un capteur à distance ; un capteur multispectral effectue des mesures dans un certain nombre de bandes spectrales.

Bande C — Partie du spectre électromagnétique des micro-ondes comprise entre 500 MHz et 1000 MHz.

Bande Ku — Bande radar et micro-ondes dans laquelle les longueurs d'onde varient de 1,67 à 2,4 cm.

Bande S — Gamme de fréquences de 4 à 2 GHz (longueur d'onde de 7 à 20 cm) dans la partie micro-ondes (radar) du spectre électromagnétique. Les radars en bande S sont utilisés pour des applications météorologiques à moyenne portée, par exemple pour mesurer les précipitations.

Bande spectrale — Un segment fini de longueurs d'onde dans le spectre électromagnétique.

Bande X — Bande de fréquence radar comprise entre 12,5 et 8 GHz (longueur d'onde 2,4-3,75 cm).

Bathymétrie — Cartographie de la topographie du fond de l'océan.

Bilan radiatif — Mesure des entrées et des sorties d'énergie radiative par rapport à un système, tel que la Terre.

Biomass — Satellite de la mission Earth Explorer de l'ESA, créée pour observer et analyser les forêts du monde à l'aide de la technologie radar.

Biomasse — écologie : masse totale d'organismes biologiques vivants dans une zone ou un écosystème donné ; production d'énergie : masse biologique utilisée comme source d'énergie renouvelable.

C

Capteur — Dispositif produisant une sortie en réponse à un rayonnement incident. Les capteurs à bord des satellites obtiennent des informations sur les caractéristiques et les objets de la Terre en détectant les rayonnements réfléchis ou émis dans différentes bandes du spectre électromagnétique.

Carte-image satellite — Carte créée à partir de données d'images satellite.

Champ de vision — Gamme d'angles balayés ou détectés par un système ou un instrument, mesurée en degrés d'arc.

Charge utile — Instruments embarqués à bord d'un vaisseau spatial.

Constante solaire — Constante exprimant la quantité de rayonnement solaire atteignant la Terre en provenance du soleil, soit environ 1370 W/m².

Copernicus — (ancien nom : GMES, *Global Monitoring for Environment and Security*), le programme Copernicus d'observation de la Terre de l'UE.

Couleur de l'océan — capacité du phytoplancton à apparaître sous différentes couleurs dans certaines bandes du spectre électromagnétique en raison de sa concentration en chlorophylle.

Couverture terrestre — caractéristiques d'une surface terrestre déterminées par sa signature spectrale (la façon unique dont un type donné de couverture terrestre réfléchit et absorbe la lumière).

CryoSat — satellite de recherche de l'ESA cartographiant la cryosphère terrestre et recueillant notamment des données sur le volume des calottes glaciaires de l'Arctique et de l'Antarctique (depuis 2010).

Culmination — point auquel un satellite atteint sa plus haute position ou élévation dans le ciel, par rapport à un observateur.

D

Déclinaison — distance angulaire entre l'équateur et le satellite. Nœud descendant — Point de l'orbite d'un satellite où il traverse le plan équatorial du nord au sud.

Diffusion — processus par lequel le rayonnement électromagnétique interagit avec les molécules de l'atmosphère, de l'océan ou de la surface terrestre et est redirigé par elles.

Diffusomètre — instrument radar à haute fréquence qui transmet des impulsions d'énergie vers l'océan et mesure la rétrodiffusion de la surface de l'océan. Il détecte la vitesse et la direction du vent au-dessus des océans en analysant la rétrodiffusion des petites ondulations provoquées par le vent à la surface de l'eau.

DMSP *(Defense Meteorological Satellite Program)* — programme de satellites météorologiques de l'armée de l'air américaine, dont les satellites tournent en orbite héliosynchrone. Les images sont collectées dans la bande du visible au proche infrarouge (0,4 à 1,1 µm) et dans la bande de l'infrarouge thermique (environ 8 à 13 µm) à une résolution d'environ 3 km.

E

EAC — Centre des astronautes européens, Cologne ; installation centrale de l'ESA pour la formation des astronautes.

Earth Explorer — Mission de l'ESA dans le cadre du programme « Planète vivante », qui comprend les missions satellitaires fournissant de nouvelles données d'observation sur la Terre.

EarthCARE — Mission spatiale prévue pour étudier les aérosols et les nuages et leur impact sur le rayonnement dans l'atmosphère terrestre, dans le cadre du programme Planète vivante de l'ESA. Date de lancement : 2024.

Émissivité — Rapport entre le rayonnement émis par une surface et celui émis par un corps noir à la même température.

Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) — Radiomètre multispectral à balayage à huit bandes, embarqué à bord du satellite Landsat 7, qui fournit des informations d'imagerie à haute résolution sur la surface de la Terre.

Envisat *(Environmental Satellite)* — Mission de satellite environnemental, 2002-2012 ; grande plate-forme surveillant les changements environnementaux sur terre et dans l'atmosphère, mission scientifique visant à étudier les applications de l'observation de la Terre.

ERS *(European Remote Sensing Satellite)* — deux satellites radar de l'ESA, 1991-2011, précurseurs de Sentinel-1.

ESA — Agence spatiale européenne

ESOC — Centre européen d'opérations spatiales

ESRIN — Institut européen de recherche spatiale

ESTEC — Centre européen de recherche et de technologie spatiales

Étalonnage — Action de comparer la précision de mesure d'un instrument à un étalon connu.

Excentricité *e* — Décrit la forme d'une orbite. L'orbite d'un satellite est une ellipse, l'excentricité définissant la forme de l'ellipse. Lorsque $e = 0$, l'ellipse est un cercle. Lorsque *e* est proche de 1, l'ellipse est très longue et mince.

F

Fauchée — Zone observée par un satellite en orbite autour de la Terre.

Fausse couleur — Procédé d'imagerie couleur qui produit une image d'une couleur qui ne correspond pas à la couleur réelle ou naturelle de la scène (telle qu'elle est perçue par nos yeux).

Fenêtre atmosphérique — Gamme de longueurs d'onde pour lesquelles les gaz atmosphériques n'absorbent que faiblement le rayonnement. Les fenêtres atmosphériques permettent au rayonnement terrestre de s'échapper dans l'espace, à moins que les nuages n'absorbent le rayonnement.

Fraction du rayonnement photosynthétiquement actif (FPAR) — Rayonnement entre 400 et 700 nm utilisé par la canopée verte dans le processus de photosynthèse.

Fréquence *f* — Nombre de cycles et de parties de cycles effectués par seconde ; $f = 1/T$, où *T* est la durée d'un cycle en secondes.

G

Galileo — Système européen de navigation par satellite, composé de 30 satellites sur 3 orbites.

Gaz à effet de serre — Substances gazeuses présentes dans l'atmosphère qui affectent le rayonnement et contribuent au réchauffement de l'atmosphère terrestre, connu sous le nom d'effet de serre.

Géocodage — Élément du géoréférencement, qui consiste à traduire dans le système de référence souhaité des données qui n'ont pas de géoréférence.

Géostationnaire — Une orbite sur laquelle un satellite se trouve toujours dans la même position par rapport à la Terre en rotation. Le satellite tourne autour de la Terre dans la même direction, à une altitude d'environ 35 790 km, car cela produit une période orbitale égale à la période de rotation de la Terre. Utilisé pour les satellites météorologiques et la plupart des satellites commerciaux de télécommunications.

Géosynchrone — Synchrone par rapport à la rotation de la Terre.

GOES *(Geostationary Operational Environmental Satellite)* — Observe les États-Unis et les zones océaniques adjacentes à partir de points d'observation situés à 35 790 km au-dessus de l'équateur, à 75 degrés ouest et 135 degrés ouest. Les satellites GOES ont une orbite équatoriale, synchronisée avec la Terre, avec une période de 24 heures, une résolution visible de 1 km et une résolution IR de 4 km.

GOME *(Global Ozone Monitoring Experiment)* — Instrument embarqué à bord d'ERS.

GPS *(Global positioning system)* — Système composé de 25 satellites répartis sur 6 plans orbitaux à 20 000 km d'altitude avec des périodes de 12 heures, utilisé pour fournir des informations très précises sur la position, la vitesse et l'heure.

H

Héliosynchrone — Une orbite héliosynchrone est une orbite quasi polaire. Chaque fois qu'elle traverse l'équateur, elle le fait à la même heure locale.

I

Inclinaison — L'inclinaison est l'angle entre l'orbite d'un satellite et l'équateur.

Infrarouge lointain (FIR) — Rayonnement électromagnétique plus long que l'infrarouge thermique, dont les longueurs d'onde sont comprises entre 25 et 1 000 micromètres environ.

Infrarouge moyen (MIR) — Rayonnement électromagnétique situé entre le proche infrarouge et l'infrarouge thermique, d'une longueur d'onde comprise entre 2 et 5 µm.

Infrarouge proche (NIR) — Rayonnement électromagnétique dont les longueurs d'onde sont à peine plus grandes que celles du visible (environ 0,7 µm) et vont jusqu'à environ 2 µm.

Infrarouge thermique (TIR) — Rayonnement électromagnétique dont les longueurs d'onde sont comprises entre 3 et 25 µm.

Interférométrie — Méthode d'analyse des données exploitant la différence de phase entre deux faisceaux optiques ; utilisée par exemple pour déduire les différences ou les changements d'altitude.

Interférométrie radar — Étude des interférences provoquées par les signaux radar ; technique permettant aux scientifiques de générer des images tridimensionnelles de la surface de la Terre.

ISS *(International Space Station)* — Station spatiale internationale, projet commun de 16 pays conçu comme un laboratoire scientifique dans l'espace.

L

Landsat — Satellite de télédétection terrestre, exploité par la société américaine Earth Observation Satellite Company (EOSAT). Commercialisé en vertu de la loi de 1984 sur la commercialisation de la télédétection terrestre, Landsat est une série de satellites (anciennement appelés ERTS) conçus pour recueillir des données sur les ressources de la Terre de manière régulière et systématique.

Largeur de bande — Plage totale de fréquences nécessaire pour faire passer un signal modulé spécifique sans distorsion ni perte de données.

Longueur d'onde — Distance entre deux maximas d'une onde.

Lumière visible — Partie du spectre électromagnétique visible par l'œil humain (0,4 µm à 0,7 µm).

M

MERIS *(Medium Resolution Imaging Spectrometer)* — Instrument embarqué à bord d'Envisat pour l'observation de l'océan et de la végétation.

METEOSAT *(METEOrological SATellite)* — Satellite météorologique géostationnaire européen, lancé par l'Agence spatiale européenne et exploité par Eumetsat.

Micro-ondes — Rayonnement électromagnétique dont la longueur d'onde est comprise entre environ 1000 µm et 1 m.

Modèle climatique — Modèle informatique permettant de calculer et de prévoir le climat pour une période donnée.

Modèle numérique d'élévation (MNE) — Représentation de la topographie de la Terre en format numérique, c'est-à-dire par des coordonnées et des descriptions numériques de l'altitude.

MODIS *(Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer)* — Capteur embarqué à bord des satellites TERRA et AQUA. Il effectue des observations dans 36 bandes spectrales, à une résolution modérée (0,25 — 1 km), de la température à la surface des terres et des océans, de la productivité primaire, de la couverture terrestre, des nuages, des aérosols, de la vapeur d'eau, des profils de température et des incendies.

Multispectral — Comprend des données provenant de différentes bandes spectrales.

Multispectral Scanner (MSS) — Instrument à balayage linéaire embarqué sur les satellites Landsat qui balaie continuellement la Terre dans une fauchée de 185 km. Sur les satellites Landsat 1, 2, 4 et 5, le MSS disposait de quatre bandes spectrales dans le visible et le proche infrarouge avec un IFOV de 80 mètres. Landsat 3 disposait d'une cinquième bande dans l'infrarouge thermique avec un IFOV de 240 mètres.

Multitemporel — Comprend des données provenant de différents points dans le temps.

N

NASA *(National Aeronautics and Space Administration)* — La NASA, créée en 1958 et dont le siège se trouve à Washington D.C., est l'agence responsable du programme spatial public des États-Unis. Sa mission est de planifier, diriger et conduire les activités aéronautiques et spatiales.

NDVI *(Normalised Difference Vegetation Index)* — Modèle permettant de convertir les mesures satellitaires en types de végétation de surface. Pour ce faire, le NDVI utilise un rapport complexe de la réflectance dans les parties rouge et proche infrarouge du spectre. Il s'agit d'une quantité qui mesure la verdure et la vigueur de la végétation.

NOAA *(National Oceanic and Atmospheric Administration)* — La NOAA a été créée en 1970 au sein du ministère américain du commerce. Elle se concentre sur les conditions des océans et de l'atmosphère. La NOAA a deux composantes principales : le NWS (National Weather Service) et NESDIS (National Environmental Satellite, Data, and Information Service).

Nœud ascendant — Point d'une orbite (longitude) où un satellite traverse le plan équatorial dans le sens sud-nord.

O

Onde — Variations mobiles d'un paramètre, périodiques dans l'espace et dans le temps, par exemple le rayonnement électromagnétique.

Operational Land Imager (OLI) — capteur d'imagerie multispectrale à bord de Landsat 8 et 9.

Orbite — Trajectoire décrite par un corps céleste dans sa révolution périodique. Les orbites des satellites terrestres dont l'inclinaison est proche de 0° sont appelées orbites équatoriales car le satellite reste presque au-dessus de l'équateur. Les orbites dont l'inclinaison est proche de 90° sont appelées orbites polaires car le satellite passe presque au-dessus des pôles nord et sud.

Orbite elliptique — Les corps en orbite dans l'espace suivent des orbites elliptiques plutôt que circulaires en raison de facteurs tels que la gravité et la traînée. Le point où le satellite en orbite est le plus proche de la Terre est le périgée, le point où le satellite est le plus éloigné de la Terre est appelé apogée.

Orbite polaire — Orbite dont l'inclinaison orbitale est proche de 90° et sur laquelle la trace au sol du satellite traverse les deux régions polaires une fois par orbite.

P

Panchromatique — Sensible à l'ensemble ou à la majeure partie du spectre visible.

Périgée — Sur une orbite elliptique, point où le satellite est le plus proche de la Terre.

Période — Temps nécessaire à un satellite pour effectuer une orbite complète.

Pixel — « Élément d'image », zone au sol correspondant à un seul élément d'un ensemble de données d'images numériques.

Plan orbital — Plan plat gigantesque imaginaire contenant l'orbite d'un satellite terrestre. Le plan orbital passe par le centre de la Terre.

Plate-forme — Satellite pouvant transporter des instruments.

PROBA *(Project for On-Board Autonomy)* — satellite de démonstration technologique à petite échelle de l'ESA, transportant plusieurs instruments d'observation de la terre avec des résolutions au sol allant jusqu'à 20 m (CHRIS, multispectral) et 5 m (HRV, panchromatique).

R

Radiomètre à balayage — Système d'imagerie composé d'objectifs, de miroirs mobiles et de capteurs d'images à semi-conducteurs, utilisé pour obtenir des observations de la Terre et de son atmosphère.

Radiomètre à micro-ondes passif — Système détectant uniquement le rayonnement micro-ondes émis par l'objet vu ou réfléchi par l'objet à partir d'une source autre que le système.

Rayonnement — Transfert d'énergie sous forme d'ondes électromagnétiques ou de particules qui libèrent de l'énergie lorsqu'elles sont absorbées par un objet.

Rayonnement à ondes courtes — Rayonnement reçu du soleil et émis dans les longueurs d'onde spectrales inférieures à 4 µm. Il est également appelé rayonnement solaire.

Rayonnement électromagnétique — Énergie se propageant sous forme de champs électriques et magnétiques variant dans le temps à la vitesse de la lumière. La lumière et le radar sont des exemples de rayonnement

GLOSSAIRE

GLOSSAIRE

électromagnétique qui ne diffèrent que par leur longueur d'onde (ou fréquence).

Rayonnement gamma — Rayonnement électromagnétique de haute énergie, notamment émis par un noyau lors d'une transition entre deux niveaux d'énergie.

Rayonnement infrarouge (IR) — L'infrarouge est un rayonnement électromagnétique dont la longueur d'onde est comprise entre 0,7 et 1 000 µm environ (entre le rayonnement visible et les micro-ondes), subdivisé en visible et proche infrarouge, infrarouge moyen et infrarouge lointain.

Rayonnement solaire — Énergie reçue du soleil. L'énergie se présente sous de nombreuses formes, telles que la lumière visible. Les autres formes de rayonnement comprennent les ondes radio, les infrarouges, les ultraviolets et les rayons X.

Rayonnement terrestre — L'ensemble du rayonnement infrarouge émis par la Terre et son atmosphère dans la plage de température d'environ 200-300 K.

Rayonnement ultraviolet (UV) — Partie du spectre électromagnétique dont les longueurs d'onde sont inférieures à la région violette ; il contient environ 5 % de l'énergie rayonnée par le Soleil et constitue la principale source d'énergie dans la stratosphère et la mésosphère.

Réflexion — Proportion du rayonnement électromagnétique irradié réfléchie par une surface.

Réflexion — Retour d'ondes lumineuses ou sonores à partir d'une surface. Si la surface réfléchissante est plane, l'angle de réflexion d'un rayon lumineux est le même que l'angle d'incidence.

Résolution — Dans le cas de l'imagerie, elle décrit la zone représentée par chaque pixel d'une image. Plus la surface représentée par un pixel est petite, plus l'image est précise et détaillée.

Résolution au sol — Décrit la longueur du côté d'un seul pixel carré dans une image. Plus cette valeur est petite, plus l'image est précise et détaillée.

Rétrodiffusion — Processus par lequel jusqu'à 25 % de l'énergie rayonnante du soleil est réfléchie ou diffusée loin de la surface par les nuages.

S

SAR — radar à synthèse d'ouverture (RSO). Technique de cartographie du sol à haute résolution qui synthétise efficacement une grande antenne de réception en traitant la phase du retour radar réfléchi.

Satellite — Objet volant librement en orbite autour de la Terre, d'une autre planète ou du soleil.

Satellite d'observation de la Terre — Satellites observant la Terre depuis l'espace.

Satellite météorologique — Satellite d'observation de la Terre qui observe les processus météorologiques.

Scène — Espace de l'objet éclairé par un capteur.

Sentinel — Série de satellites d'observation de la Terre sous la responsabilité de l'ESA dans le cadre du programme Copernicus.

Signature spectrale — Forme particulière du spectre de puissance calculé à partir des données de la série temporelle d'un processus.

SMOS *(Soil Moisture and Ocean Salinity Mission)* — la deuxième mission Earth Explorer Opportunity de l'ESA visant à recueillir des données d'observation globales pour la modélisation des conditions météorologiques, du climat et des courants océaniques.

Spectre électromagnétique — Toute la gamme des énergies rayonnantes ou des fréquences d'ondes, des plus grandes aux plus courtes longueurs d'onde. Le spectre est généralement divisé en sept sections : radio, micro-ondes, infrarouge, visible, ultraviolet, rayons X et rayons gamma.

SPOT *(Système pour l'observation de la Terre)* — Satellite français d'observation de la Terre en orbite polaire avec une résolution au sol de 10 m. Les images SPOT sont disponibles dans le commerce et sont destinées à des fins de recherche et de surveillance de l'environnement ou de gestion de l'écologie.

SRTM *(Shuttle Radar Topography Mission)* — Mission de la navette spatiale qui a utilisé des radars interférométriques à synthèse d'ouverture (IFSAR) en bande C et en bande X pour acquérir des données topographiques sur 80 % de la masse terrestre (entre 60°N et 56°S) en février 2000.

Swarm — Mission d'exploration de la Terre de l'ESA, visant à observer le champ magnétique de la Terre.

Système actif (capteur actif) — Système de télédétection qui émet son propre rayonnement pour détecter un objet ou une zone à observer et qui reçoit le rayonnement réfléchi ou transmis. Exemple : Radar.

Système d'information géographique (SIG) — Système d'archivage, d'extraction et de manipulation de données stockées et indexées en fonction des coordonnées géographiques de leurs éléments. Le système peut généralement utiliser une variété de types de données, tels que l'imagerie, les cartes, les tableaux, etc.

Système passif — Système détectant uniquement le rayonnement émis par l'objet vu ou réfléchi par l'objet à partir d'une source autre que le système.

T

Taux de répétition (période orbitale) — Temps nécessaire à un satellite pour effectuer une orbite.

Télédétection — Technologie permettant d'acquérir des données et des informations sur un objet ou un phénomène à l'aide d'un dispositif sans contact physique. La télédétection terrestre consiste à recueillir des informations sur la Terre et son environnement à distance.

Température de surface de la mer (SST) — Température de la couche d'eau de mer (environ 0,5 m de profondeur) proche de la surface.

Thematic Mapper (TM) — Capteur d'imagerie multispectrale avec 7 bandes spectrales à bord de Landsat-4 et Landsat-5, acquérant des données dans les parties visible et infrarouge du spectre électromagnétique. La résolution au sol des bandes visible et infrarouge à ondes courtes est de 30 m/pixel, celle de la bande thermique de 120 m/pixel.

Trace au sol — L'inclinaison d'un satellite, combinée à son altitude orbitale et à la période de son orbite, crée une trace définie par une ligne imaginaire reliant le satellite au centre de la Terre.

TRMM *(Tropical Rainfall Measuring Mission)* — programme satellitaire lancé par la NASA et la NASDA en 1997 pour acquérir des données sur les précipitations tropicales.

U

Unité Dobson (DU) — Unité standard pour les quantités d'ozone dans l'atmosphère. Une UA correspond à 2,7 x 1016 molécules d'ozone par cm² et se réfère à une couche d'ozone d'une épaisseur de 0,001 cm dans des conditions de température (0°C) et de pression normales.

USGS *(United States Geological Survey)* — bureau américain chargé de l'acquisition et de la diffusion de la géoinformation.

Utilisation des terres — Caractéristiques d'une surface terrestre déterminées par son utilisation (la manière unique dont un type donné de terre est — ou n'est pas — exploité par l'homme).

V

Vapeur d'eau — Eau à l'état gazeux ; dans l'atmosphère, le facteur le plus important de l'effet de serre naturel.

VHR *(Very High Resolution)* — données d'observation de la Terre avec une résolution au sol de 1 m et plus.

VISSR *(Visible/Infrared Spin Scan Radiometer)* — système d'imagerie multispectrale à haute résolution, déployé à bord des satellites météorologiques GOES (jusqu'à GOES-7).

INDICE GÉOGRAPHIQUE

A
A23a (iceberg) 45
Abéché 60
Achgabat 38
Addis-Abeba 25
Agriculture dans le désert 63
Aitik (mine) 30
Alexandrie 36
Altamira 74
Amu Darya 38
Anchorage 46
Anomalies de température 49
Antarctique 44
Archipel de Bissago 67
Ariane 11
Assiout 36

B
Baie Columbia 46
Baie de Bohai 66
Baie du Prince William 46
Bangkok 55
Barrage de Belo Monte 74
Bełchatów (mine de charbon) 32
Boende 61
Böhlen 75
Bruxelles 8
Buenos Aires 54, 68

C
Calotte glaciaire du Groenland 43
Campo Novo de Rondônia 64
Canal de Suez 73
Cantanhez Forest, Parc national 67
Catane 28
Chengdu 55
Chicago 39, 54
Chlorophylle-a 58
Cologne 8, 9
Colombie-Britannique 65
Colorado (fleuve) 27
Copenhague 15
Courant circumpolaire antarctique 56, 57
Courant de Benguela 56
Courant de Californie 56
Courant de Guinée 56
Courant de Humboldt 56
Courant de l'Atlantique Nord 35
Courant des Aiguilles 57
Courant de Somalie 57
Courant du Brésil 56
Courant du Labrador 56
Courant du Pacifique nord 56
Courant équatorial nord 56, 57
Courant équatorial sud 56, 57
Couverture des sols 61
Cumbre Vieja 29

D
Dallas 39
Darmstadt 8, 9
Deepwater Horizon 39
Déforestation 64
Delhi 24, 55, 69
Delta du Mississippi 39
Delta du Nil 36
Dépression de Toshka 37
Dérive nord-atlantique 56
Derudeb 68
Désert peint 27
Detroit 54
Dhaka 55
Djibouti 25

E
El Ejido 62
El Niño 34
ENSO 35
Estuaire de la Tamise 75
Etna 28
Extraction d'or 31

F
Fairbanks 46
Fayoum 36
Frascati 8, 9

G
Gällivare 30
Gdansk 58
Gizeh 36
Glacier Columbia 46
Glacier d'Aletsch 47
Golfe du Mexique 39
Grand Canyon 27
Groenland 43
Grossglockner 67
Guangzhou 55
Gulf Stream 35, 56

H
Ha'il 63
Harwell 8, 9
Haut barrage d'Assouan 36
Havalimanı (aéroport d'Istanbul) 72
Himalaya 25, 26
Hohe Tauern, Parc national 67
Hong Kong 55, 69
Houston 38
Hubble (télescope spatial) 10

I
Iceberg A23a 45
Iles Canaries 29
Ilha de Orango 67
Incendie de forêt 65
Industrie pétrolière 39
Innsbruck 51
In Salah 51
Istanbul 72

J
Jakarta 55, 69
Jakobshavn Isbrae 43
James Webb (télescope spatial) 10
João Vieira, Parc national marin 67
Johannesbourg-Pretoria 54

K
Kaboul 24
Karachi 55
Kiruna 8, 60
Kolkata 55
Kontish Flats parc éolien 75
Kourou 9, 11
Kuro-Shio 57

L
Lac Nasser 37
Lacs supraglaciaires 43
Lagos 68
Lahore 24
La Niña 34
La Palma 29
Le Caire 36, 69
Le Cap 51
Lithium 33
Liverpool 54
London 68, 75
London Array parc éolien 75
Longhuazhen 68
Los Angeles 54, 68

M
Madras 69
Madre de Dios 31
Marchand 61
Mar de Plástico 62
Melbourne 55
Mer arctique 42
Mer Baltique 58
Mer d'Aral 38
Messine 28
Mexico 54, 68
Milan 54
Mine de charbon 32
Mine de cuivre 30
Mine de lignite 32
Mississippi (fleuve) 39
Mogadiscio 25
Moscou 54, 69
MOSE 41
Mumbai 54, 55, 69

N
Nairobi 25, 51, 69
New York 54, 68
Niamey 70
Niger (fleuve) 70
Nil (fleuve) 36
Noordwijk 8, 9
Noukous 38
Nouvelle-Orléans 39
Nouvelle Vallée 37

O
Oscillation australe El Niño (ENSO) 35
Oya-Shio 57

P
Palerme 28, 51
Parc national 67
Paris 8, 9, 68
Pärnu 60
Pékin 55
Phoenix 39
Phytoplancton 58
Plaque africaine 24, 25
Plaque antarctique 24
Plaque arabique 24
Plaque australienne 25
Plaque caraïbe 24
Plaque de Cocos 24
Plaque de l'Amour 25
Plaque de Nazca 24
Plaque des Carolines 25
Plaque des Sandwich 24
Plaque d'Okhotsk 25
Plaque eurasiatique 24, 25, 26
Plaque indienne 24, 25, 26
Plaque indochinoise 25
Plaque nord-américaine 24, 25
Plaque pacifique 24, 25
Plaque Philippine 25
Plaque Scotia 24
Plaque somalienne 24, 25
Plaque sud-américaine 24
Plateau de Kaibab 27
Plateau du Colorado 27
Plateau tibétain 25, 26
Plate-forme glaciaire Filchner-Ronne 45
Plattsmouth 40
Poilão, Parc national marin 67
Point chaud des Canaries 29
Port-Saïd 36
Projet eau Toshka 37
Pyramide des âges 69

R
Redu 8, 9
Rio de Janeiro 54, 68
Rondônia 64
Rosette 37
Rotterdam 54
Ruhr Région 54

S
Salar d'Atacama 33
Samarcande 38
Santiago 54
São Paulo 68
Seattle 54
Sentinel 15
Séoul 55
Shanghai 55, 69
Shenzhen 55
Sicile 28
Spitzberg 51
Station spatiale internationale (ISS) 11
Suez 36, 73
Suqian 71
Sydney 55, 69
Syracuse 28
Syr Darya 38

T
Tazirbu 60
Tehran 54
Thanet parc éolien 75
Thessaloniki 60
Tianjin 55
Tokyo 55, 69
Tripoli 28
Trou d'ozone 55
Tunis 28
Türkmenabat 38

U
Uru-Eu-Uaw-Uaw (territoire indigène) 64
Utilisation des sols 61

V
Vallée du rift est-africain 25
Vastitas Borealis (cratère) 10
Vega 11
Venise 41
Villafranca 8, 9
Vitesse de la calotte glaciaire 43
Volcanisme de point chaud 29

W
Whitehorse 46
Wuhan 55

X
Xingu (fleuve) 74

Z
Zone protégée 67

SOURCES D'IMAGES ET DE DONNÉES

8.1: ESA • **8.2** *[Modis | Mosaic]*: NASA Goddard Space Flight Center • **8.3**, **9.4**: ESA • **9.5**: ESA - Harwell Campus • **9.6**: ESA • **9.7**: ESA - A. Van Der Geest • **9.8**: ESA • **9.9**: ESA - Philippe Sebirot • **9.10**: ESA - Stephane Corvaja • **9.11**, **9.12**, **10.1**: ESA • **10.2**: ESA/D. Ducros • **10.3**: ESA/DLR/FU Berlin (G. Neukum) • **10.4**: NASA, ESA, CSA, STScI, J. Diego (Instituto de Física de Cantabria, Spain), J. D'Silva (U. Western Australia), A. Koekemoer (STScI), J. Summers & R. Windhorst (ASU), and H. Yan (U. Missouri) • **10.5**: ESA/ATG medialab • **11.6**: ESA/CNES/Ariane space • **11.7**: ESA/David Ducros, Jacky Huart • **11.8**, **12.1** *[GOCE | Mosaic]*: ESA • **12.2** *[Aeolus | 06.05.2020]*: ESA/VirES • **12.3** *[SMOS | 01.09.2023]*: ESA CCI/Climate from Space • **12.4**, **13.5**, **13.6**, **13.7**, **14.1**, **14.1**, **14.1**: ESA • **14.2**: Copernicus • **15.7**: ESA/P. Carril • **15.3a**: ESA/ATG medialab • **15.3b** *[Sentinel-1 | 06.02.2024]*: Copernicus • **15.4a**: ESA • **15.4b** *[Sentinel-2 | 08.07.2023]*: Copernicus • **15.5a**: ESA • **15.5b** *[Sentinel-3 | 08.06.2023]*: Copernicus • **15.6a**: ESA/P. Carril • **15.6b** *[Sentinel-5P | 08.07.2023]*: Copernicus • **16.1**: eoVision • **16.2**: Union of Concerned Scientists • **16.3**: ESA • **17.4**, **17.5**, **18.4**: eoVision/ESA • **18.1a** *[Sentinel-2 | 21.03.2022]*, **18.1b** *[Sentinel-2 | 21.03.2022]*, **18.1c** *[Sentinel-2 | 21.03.2022]*, **18.1d** *[Sentinel-2 | 21.03.2022]*, **18.1e** *[Sentinel-2 | 21.03.2022]*, **18.2a** *[Sentinel-2 | 21.03.2022]*, **18.2b** *[Sentinel-2 | 21.03.2022]*, **18.3a** *[Sentinel-2 | 21.03.2022]*, **18.3b** *[Sentinel-2 | 21.03.2022]*, **18.3c** *[Sentinel-2 | 21.03.2022]*, **19.5** *[Sentinel-1 | 23.03.2022]*, **19.6** *[Sentinel-1 | 23.03.2022]*, **19.7** *[Sentinel-1 | 23.03.2022]*, **19.8** *[Sentinel-1 | 23.03.2022]*: Copernicus • **19.9**: eoVision/ESA • **20.1** *[Sentinel-2 | 21.03.2022]*, **20.2** *[Sentinel-2 | 21.03.2022]*, **20.3** *[Sentinel-2 | 21.03.2022]*, **20.4** *[Sentinel-2 | 21.03.2022]*: Copernicus • **21.5** *[Modis | Mosaic]*, **21.6a** *[Modis | Mosaic]*, **21.6b** *[Modis | Mosaic]*, **21.6c** *[Modis | Mosaic]*, **21.6d** *[Modis | Mosaic]*: NASA Goddard Space Flight Center • **21.7a**: BEV • **21.7b** *[Sentinel-2 | 19.06.2023]*: Copernicus • **21.7c**: BEV • **22.1** *[Modis | Mosaic]*: NASA Goddard Space Flight Center • **22.2** *[DMSP OLS | Mosaic]*: NASA/NOAA/USGS • **22.3** *[07.12.1972]*: Ron Evans/Harrison Schmitt, NASA • **22.4** *[Modis | Mosaic]*, **24.1** *[Modis | Mosaic]*: NASA Goddard Space Flight Center • **24.2** *[Sentinel-2 | 02.08.2023]*: Copernicus • **24.3** *[Modis | Mosaic]*: NASA Goddard Space Flight Center • **25.4**: eoVision, based on work of American Museum of Natural History • **25.5**: eoVision, based on work by Hannes Grobe • **25.6** *[Sentinel-2 | 26.08.2023]*: Copernicus • **25.7** *[Modis | Mosaic]*: NASA Goddard Space Flight Center • **26.1**: USGS • **26.2** *[Sentinel-2 | 22.10.2023]*: Copernicus • **26.3**, **26.3**, **26.4**, **26.4**, **27.5**: USGS • **27.5** *[Sentinel-2 | 24.09.2023]*, **27.6** *[Sentinel-2 | 24.09.2023]*, **27.7**: Copernicus • **27.8**, **27.9** *[Landsat 7 | 06.06.2000]*: USGS • **28.1** *[Sentinel-2 | June 2022]*, **28.2** *[Sentinel-2 | 03.06.2022]*, **28.3** *[Sentinel-2 | 21.06.2022]*, **28.4** *[Sentinel-5P | 21.06.2022]*: Copernicus • **28.5**: Branca, S., M. Coltelli, G. Groppelli and F. Lentini (2011). Geological map of Etna Volcano • **28.6**: gnuckx • **29.7** *[Sentinel-2 | 21.08.2021]*, **29.8** *[Sentinel-2 | 30.09.2021]*, **29.9** *[Sentinel-2 | 03.01.2022]*, **29.10** *[Sentinel-2 | 03.01.2022]*: Copernicus • **29.11**: eoVision • **29.12** *[Modis | Mosaic]*: NASA; Carracedo et al. 1998 • **29.13** *[Sentinel-2 | 21.08.2021]*, **30.1** *[Sentinel-2 | 15.06.2023]*: Copernicus • **30.2** *[Landsat 5 | 05.06.1992]*: USGS • **30.3**: Tzorn • **30.4** *[2022]*: Boliden Summary Report • **30.5** *[2024]*: USGS, Mineral Commodity Summaries 2024 • **31.6** *[Landsat 5 | 03.09.2011]*: USGS • **31.7** *[Sentinel-2 | 03.06.2023]*, **31.8** *[Sentinel-1 | 25.05.2023]*, **31.9** *[Sentinel-2 | 03.06.2023]*: Copernicus • **31.10**: Jason Houston (iLCP Redsecker Response Fund/CEES/CINCIA) • **32.1** *[Sentinel-2 | 15.08.2023]*, **32.2** *[Sentinel-2 | 01.07.2020]*: Copernicus • **32.3** *[Landsat 5 | 22.08.2010]*, **32.4** *[Landsat 5 | 28.07.2001]*, **32.5** *[Landsat 4 | 12.06.1990]*: USGS • **32.6**: Copernicus • **32.7**: Energy Institute - Statistical Review of World Energy (2023) • **33.8** *[Landsat 4 | 25.01.1985]*, **33.9** *[Landsat 5 | 03.01.2000]*: USGS • **33.10** *[Sentinel-2 | 18.01.2023]*: Copernicus • **33.11**: Energy Institute - Statistical Review of World Energy (2023) • **33.12** *[Sentinel-2 | 18.01.2023]*: Copernicus • **34.1** *[Multisensor | January 2023]*: Copernicus Marine Service/OSTIA • **34.3** *[Multisensor | 25.12.2015]*, **34.4** *[Multisensor | 25.12.2011]*: Copernicus/ESA SST CCI • **35.2** *[Multisensor | July 2023]*: Copernicus Marine Service/OSTIA • **35.5** *[Multisensor | 01.07.2014]*: Copernicus/ESA SST CCI • **35.6**: NOAA • **36.1** *[Sentinel-2 | July 2023]*: Copernicus • **36.2**: Copernicus Land Monitoring Service • **37.3** *[Landsat 5 | 10.06.1985]*: USGS • **37.4** *[Sentinel-2 | 25.06.2023]*: Copernicus • **37.5**: Mohamed Eissa • **37.6** *[Sentinel-2 | 05.11.2017]*, **37.7** *[Sentinel-2 | 14.11.2022]*, **38.1** *[Sentinel-2 | 2023]*, **38.2** *[Sentinel-3 | 2023]*: Copernicus • **38.3**: Kamshat Tusspova et al., Water 12/2020. • **38.4** *[Sentinel-3 | 2023]*: Copernicus • **38.5** *[Landsat 4 | 1987]*, **38.6** *[Argon | 1964]*: USGS • **39.7** *[Modis | Mosaic]*: NASA Goddard Space Flight Center • **39.8** *[Sentinel-2 | 22.04.2023]*: Copernicus; U.S. Department of the Interior, BOEM (Bureau of Ocean Energy Management) • **39.9** *[Landsat 4 | 04.05.1985]*, **39.10** *[Landsat 5 | 19.07.1995]*: USGS • **39.11** *[Sentinel-2 | 08.05.2017]*, **39.12** *[Sentinel-2 | 12.05.2023]*, **40.1** *[Sentinel-2 | 21.03.2023]*, **40.2** *[Sentinel-2 | 31.03.2019]*, **40.3** *[Sentinel-2 | 31.03.2019]*: Copernicus • **40.4**: US Army Corps of Engineers (Omaha) • **41.5**: Città di Venezia, Alte Maree • **41.6**: Fusi Sandro • **41.7** *[Sentinel-2 | 04.11.2021]*, **41.8** *[Sentinel-2 | 24.11.2022]*: Copernicus • **42.1** *[1980-2020]*, **42.2**, **42.3**: NSIDC • **42.4** *[CryoSat | January 2011]*, **42.5** *[CryoSat | January 2024]*: CPOM • **43.6**: Copernicus Climate Change Service • **43.7** *[Sentinel-1 | 2020]*: Coperniucs/ENVEO • **43.8** *[Sentinel-2 | 01.09.2023]*, **43.9** *[Sentinel-2 | 01.09.2023]*: Copernicus • **44.1** *[2004]*: NSIDC • **44.2** *[CryoSat | 2012]*: ESA/Helm et al., The Cryosphere, 2014 • **44.3.1** *[Sentinel-1 | 06.08.2023]*, **44.3.2** *[Sentinel-1 | 13.09.2023]*, **44.3.3** *[Sentinel-1 | 19.10.2023]*, **45.4** *[Sentinel-3 | 15.11.2023]*, **45.5** *[Sentinel-3 | 15.11.2023]*: Copernicus • **46.1** *[Modis | Mosaic]*: NASA Goddard Space Flight Center • **46.2** *[Sentinel-2 | 30.07.2023]*: Copernicus • **46.3** *[2023]*: WGMS Fluctuation of Glaciers database • **46.4** *[Landsat 5 | 28.07.1986]*: USGS • **46.5** *[Sentinel-2 | 30.07.2023]*: Copernicus • **47.6**: Dirk Beyer • **47.7** *[Landsat 5 | 26.07.1985]*: USGS • **47.8** *[Sentinel-2 | 13.07.2022]*: Copernicus • **47.9** *[Landsat 5 | 26.07.1985]*: USGS • **47.10** *[Sentinel-2 | 13.07.2022]*: Copernicus • **47.11** *[2023]*: WGMS Fluctuation of Glaciers database • **47.12** *[Landsat 5 | 26.07.1985]*: USGS • **48.1** *[Multisensor | 2022]*: Copernicus/C3S/ECMWF • **48.2** *[Multisensor | July 2023]*, **48.3** *[Multisensor | January 2023]*: Copernicus Atmosphere Monitoring Service • **49.4**: eoVision/ESA • **49.5**: NOAA/NCEI • **50.1** *[Multisensor | 2000-2023]*: NASA • **50.3** *[NOAA AVHRR | January 2023]*: EUMETSAT/CM SAF • **51.2**, **51.2**, **51.2**, **51.2**, **51.2**, **51.2**: climatecharts.net • **51.4** *[NOAA AVHRR | 01.07.2023]*: EUMETSAT/CM SAF • **52.1** *[Meteosat MSG | 2004]*, **53.2** *[Meteosat MSG | 2004]*: EUMETSAT • **54.1** *[Sentinel-5P | 2023]*, **54.2** *[Multisensor | January 2020]*, **55.3** *[Multisensor | July 2020]*, **55.4a** *[Sentinel-5P | January 2020]*, **55.4b** *[Sentinel-5P | July 2020]*: Copernicus Atmosphere Monitoring Service information • **55.5a** *[Multisensor | October 1970]*, **55.5b** *[Multisensor | October 1980]*, **55.5c** *[Multisensor | October 1990]*, **55.5d** *[Multisensor | October 2000]*, **55.5e** *[Multisensor | October 2010]*: Copernicus Climate Change Service, Climate Data Store • **56.1**: W. Lauer, P. Frankenberg; USGS • **56.1**, **56.1**: 0 • **58.1** *[Sentinel-3 | June 2023]*, **58.2** *[Sentinel-3 | December 2023]*: Copernicus Marine Service Information, provided by OCTAC/PML production centre • **58.3** *[Sentinel-2 | 20.07.2019]*, **59.4** *[Sentinel-3 | July 2018]*, **59.5** *[Sentinel-3 | January 2018]*, **59.6a** *[Sentinel-2 | 08.04.2023]*, **59.6b** *[Sentinel-2 | 13.04.2023]*: Copernicus • **60.1** *[2019]*: Copernicus Land Monitoring Service • **60.2** *[Sentinel-2 | 08.09.2023]*, **60.3** *[Sentinel-2 | 26.09.2023]*, **60.4** *[Sentinel-2 | 20.09.2023]*, **60.5** *[Sentinel-2 | 27.09.2023]*, **60.6** *[Sentinel-2 | 24.09.2023]*, **61.7** *[Sentinel-2 | 08.09.2023]*, **61.8** *[Sentinel-2 | 31.03.2023]*: Copernicus • **61.9** *[2024]*: Our World in Data • **62.1** *[Sentinel-2 | 10.09.2022]*, **62.2** *[Sentinel-2 | 10.09.2022]*: Copernicus • **62.3** *[Landsat 5 | 17.10.1985]*: USGS • **62.4**: ANE • **63.5** *[Landsat 5 | 15.04.1985]*, **63.6** *[Landsat 5 | 27.04.1995]*, **63.7** *[Landsat 5 | 18.04.2015]*: USGS • **63.8** *[Sentinel-2 | 26.04.2023]*, **63.9** *[Sentinel-2 | 26.04.2023]*: Copernicus • **63.10**: U.S. Dept. Agriculture • **64.1** *[Landsat 5 | 28.06.1991]*: USGS • **64.2**: Bruno Kelly/Amazônia Real • **64.3**: INPE • **64.4** *[Landsat 5 | 24.06.1984]*, **64.5** *[Landsat 5 | 15.05.2010]*: USGS • **64.6** *[Sentinel-2 | 07.10.2023]*: Copernicus • **65.7**: National Forestry Database • **65.8** *[Sentinel-2 | 18.05.2023]*, **65.9** *[Sentinel-2 | 07.06.2003]*, **65.10** *[Sentinel-2 | 07.06.2003]*, **65.11** *[Sentinel-2 | 07.06.2003]*: Copernicus • **65.12**: Cameron Strandberg • **66.1** *[Sentinel-2 | 29.04.2023]*: Copernicus • **66.2** *[2022]*: FAO, The state of world fisheries and aquaculture 2022 • **66.3** *[Sentinel-1 | 26.04.2023]*: Copernicus • **66.4** *[Landsat 5 | 05.05.2007]*, **66.5** *[Landsat 5 | 17.05.1989]*: USGS • **67.6** *[Sentinel-2 | 24.04.2023]*, **67.7** *[Sentinel-2 | 14.04.2023]*, **67.8** *[Sentinel-2 | 24.04.2023]*, **67.9** *[Sentinel-2 | 24.04.2023]*: Copernicus • **67.10**: Powell.Ramsar • **67.11**: Bsmuc64ger • **67.12** *[Sentinel-2 | July 2023]*: Copernicus • **68.1**: Gridded Population of the World (GPW) v4; NASA/SEDAC • **68.2** *[Sentinel-2 | 13.04.2024]*, **68.3** *[Sentinel-2 | 18.04.2024]*, **69.4** *[Sentinel-2 | 19.03.2024]*: Copernicus • **69.6**: UNDESA, 2013 • **69.5a**, **69.5b**, **69.5c**: LivePopulation.com • **70.1** *[Landsat 4 | 13.10.1984]*: USGS • **70.2** *[Sentinel-2 | 27.02.2023]*: Copernicus • **70.3**: worldpopulationreview.com • **70.4** *[2018]*: UNDESA, World Urbanization Prospects 2018 • **70.5**: Noah Maxwell • **71.6**: Sinopitt Xu • **71.7** *[2015]*: UNDESA • **71.8** *[Landsat 4 | 21.04.1987]*: USGS • **71.9** *[Sentinel-2 | 05.07.2023]*, **72.1** *[Sentinel-2 | 23.07.2023]*: Copernicus • **72.2**: ICAO, ACI/Moodie-Davitt-Report • **72.3**: Kulttuurinavigaattori • **72.4** *[Landsat 5 | 18.09.2010]*: USGS • **72.5** *[Sentinel-2 | 24.07.2017]*, **72.6** *[Sentinel-2 | 23.07.2023]*, **73.7** *[Sentinel-2 | 29.03.2021]*, **73.8** *[Sentinel-1 | 21.03.2021]*, **73.9** *[Sentinel-1 | 27.03.2021]*: Copernicus • **73.10**: Suez Canal Authority • **73.11**: Wolfgang Fricke • **73.12** *[Sentinel-5P | 2023]*: Copernicus (S5P-PAL; STAC?) • **74.1** *[Landsat 5 | 15.07.2015]*, **74.2** *[Landsat 5 | 27.07.2011]*: USGS • **74.3** *[Sentinel-2 | 26.07.2017]*, **74.4** *[Sentinel-2 | 26.07.2017]*: Copernicus • **74.5**: Fernanda Brandt • **75.6** *[Sentinel-1 | 02.03.2024]*, **75.7** *[Sentinel-2 | 07.07.2023]*, **75.8** *[Sentinel-2 | 07.07.2023]*, **75.9** *[Sentinel-2 | 27.05.2017]*, **75.10** *[Sentinel-2 | 28.01.2024]*: Copernicus • **75.11** *[2024]*: IRENA - International Renewable Energy Agency •

Explication pour les sources d'images et de données :

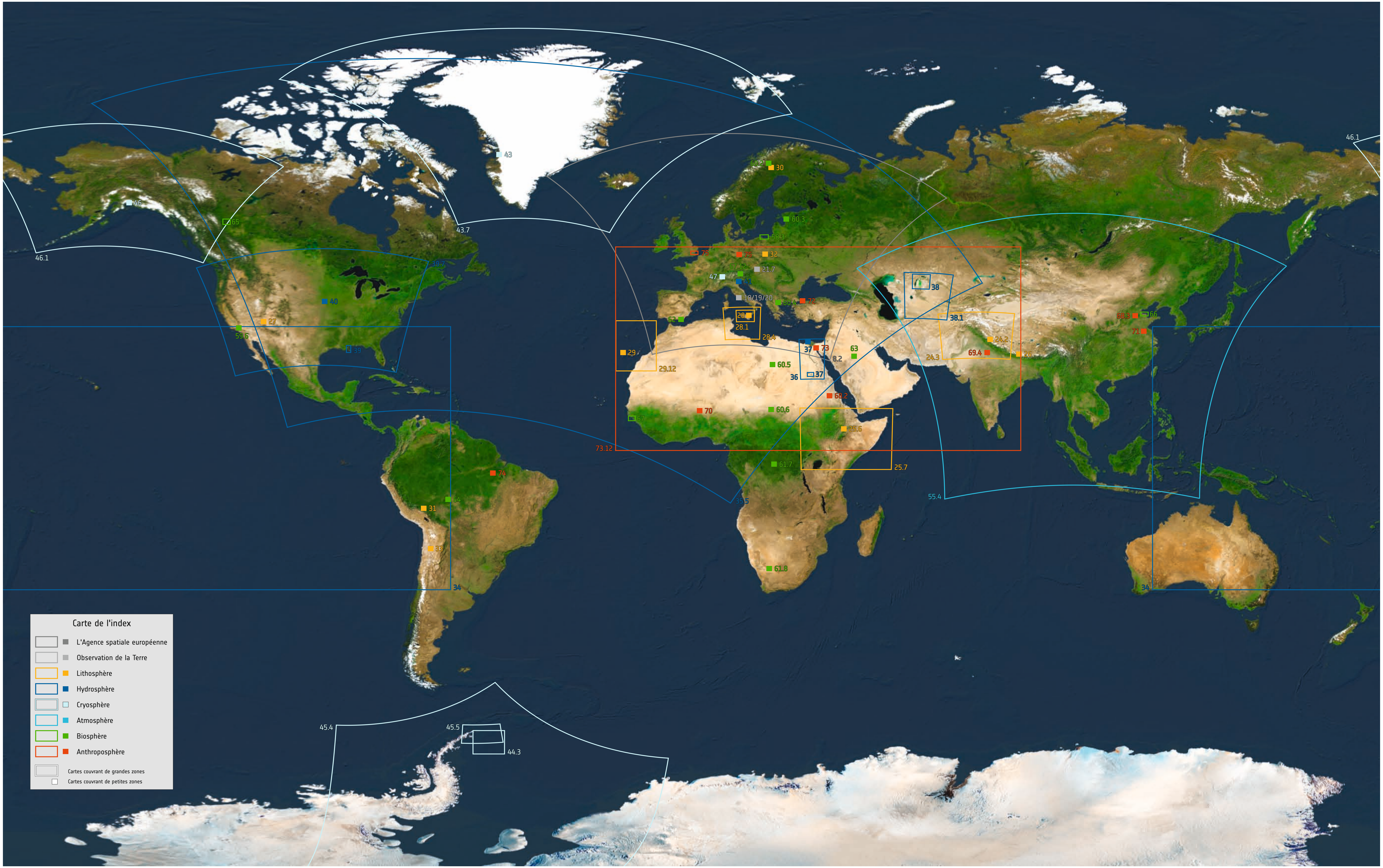
19.8 *[Sentinel-1 | 23.03.2022]* : Copernicus

19.8 ..... numéro de page . consécutif numéro de la figure

[satellite | date d'acquisition]...si la figure est une image satellite, le satellite et la date d'acquisition est spécifiée

Copernicus ..... source de données/crédit d'image

• ..... séparateur


Carte de l'index
L'Agence spatiale européenne
Observation de la Terre
Lithosphère
Hydrosphère
Cryosphère
Atmosphère
Biosphère
Anthroposphère
Cartes couvrant de grandes zones
Cartes couvrant de petites zones
46.1
43.7
43
30
40
27
59.5
29
29.12
28.1
28.4
60.5
60.6
70
38
38.1
36
37
73
8.2
63
24.2
24.3
69.4
71
66
25.7
73.12
61.7
31
34
55.4
45.4
45.5
44.3
47
21.7
32
25.6