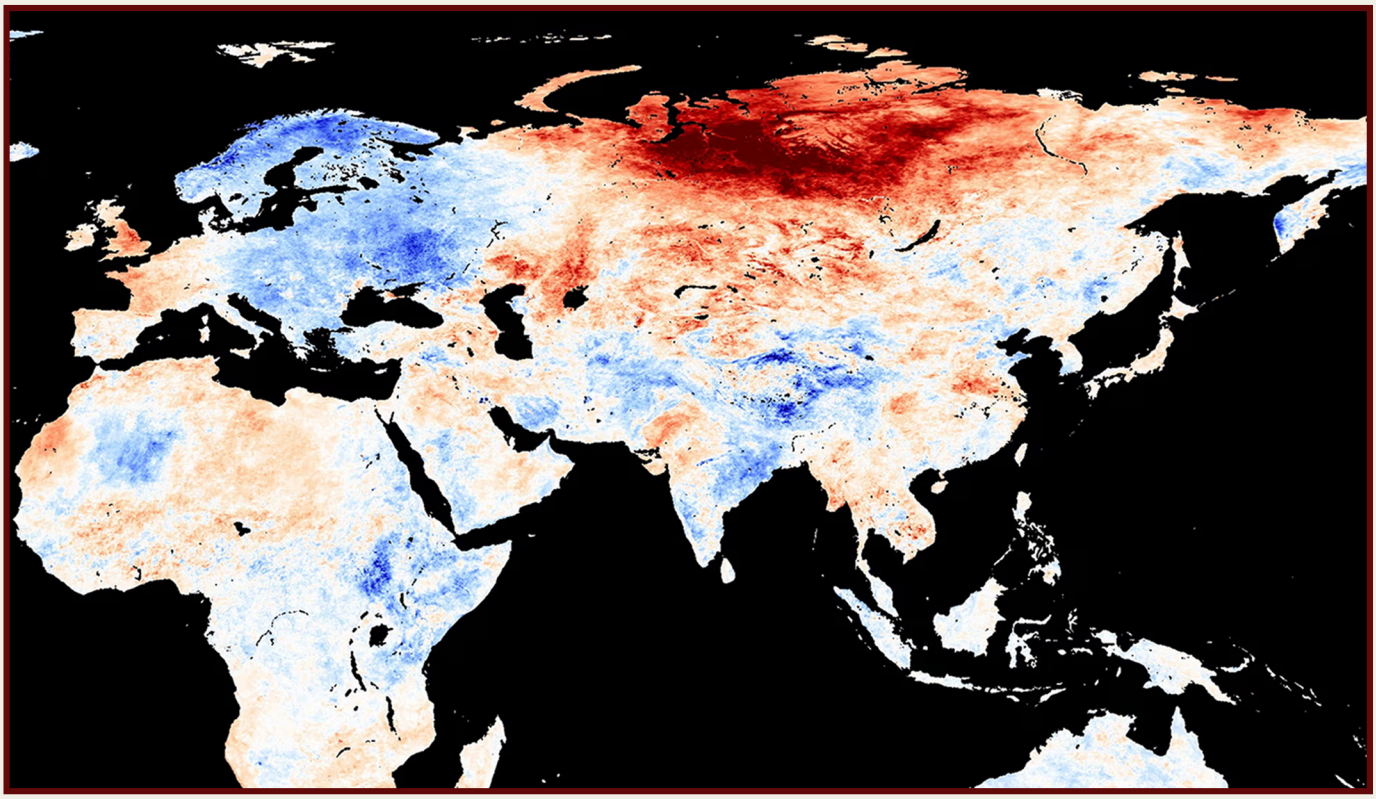
Rapport

SUR LA MENACE

DE L'ÉRUPTION D'UN PANACHE MAGMATIQUE EN SIBÉRIE

ET LES STRATÉGIES POUR ABORDER CE PROBLÈME



Rapport

SUR LA MENACE

DE L'ÉRUPTION D'UN PANACHE MAGMATIQUE EN SIBÉRIE

ET LES STRATÉGIES POUR ABORDER CE PROBLÈME

CONTENU

Une brève description du modèle géodynamique du changement climatique sur Terre dans la période actuelle 5

Le déplacement du noyau vers la Sibérie en 1998 17

La Sibérie et l'Arctique sibérien se réchauffent 3 à 4 fois plus vite que le reste du monde 22

Les signes indirects de l'ascension du panache sibérien 26

La fonte du permafrost 28

Les manifestations de volcanisme de boue 30

Le réchauffement du sol 32

La température de l'air proche de la surface 33

L'augmentation du nombre d'impacts de foudre 35

L'appauvrissement de la couche d'ozone 37

La structure, les dimensions possibles et la localisation du panache magmatique sur la base des données et des observations publiées 39

La localisation du panache magmatique 45

L'augmentation de l'activité sismique comme indicateur de la déstabilisation des plaques tectoniques 49

Les preuves de l'inévitabilité de l'éruption du panache sibérien 74

Scénario 1 : Une éruption instantanée et ponctuelle du panache sibérien 75

L'activation des supervolcans et des systèmes volcaniques 82

Les pluies acides 84

Un hiver volcanique 85

Scénario 2 : Une éruption progressive du panache sibérien 87

Les conséquences de la percée progressive du panache sibérien pour la Russie 92

Les conséquences mondiales de la percée progressive du panache sibérien 93

Les conséquences à long terme de la percée progressive du panache sibérien pour la planète 95

Scénario 3 : Un dégazage planifié et contrôlé 96

Les méthodes existantes de géo-ingénierie volcanique 96

L'exemple d'un programme pour le dégazage planifié du panache sibérien 103

La justification de la sélection des sites de forage de recherche pour surveiller la dynamique du panache mantellique sibérien moderne 105

Les caractéristiques du forage et du blocage des canaux magmatiques lors du dégazage planifié 109

Le choix du moment optimal pour forer des puits lors du dégazage planifié 110

Les résultats projetés du dégazage planifié du panache sibérien 111

Conclusions 113
Annexe 1 114
Références 116

Une brève description du modèle géodynamique du changement climatique sur Terre dans la période actuelle

Au cours des 30 dernières années, la Terre a connu une augmentation sans précédent et synchronisée des changements climatiques, des anomalies et des événements extrêmes à travers toutes les couches de la planète, ainsi que de ses paramètres géophysiques. La progression de ces changements s'accélère de manière exponentielle. Une analyse approfondie des données scientifiques indique que les principaux facteurs à l'origine des anomalies observées dans l'ensemble des sphères terrestres sont les cycles astronomiques qui impactent l'ensemble du système solaire tous les 12 000 ans.

Cette hypothèse d'une influence astronomique externe est étayée par l'observation d'anomalies climatiques, géodynamiques et magnétiques analogues, qui se produisent simultanément sur d'autres planètes du système solaire ainsi que leurs lunes. Par exemple, des vents plus violents et une augmentation de la taille des ouragans ont été observés sur Uranus, Jupiter et Vénus. Parallèlement, on observe la fonte des calottes glaciaires polaires sur Mars, ainsi qu'un renforcement de l'activité volcanique sur Vénus et Mars. De plus, l'intensification de l'activité sismique sur Mars suggère l'apparition de processus géodynamiques inhabituels.

Les changements critiques au sein du système terrestre associés au cycle astronomique de 12 000 ans ont débuté dans le cycle actuel en 1995. Cette année-là, les anomalies géophysiques majeures enregistrées comprenaient une accélération soudaine de la rotation de la Terre (Image 1), un déplacement de son axe[1] (Image 2), et le début d'une dérive prononcée du pôle magnétique Nord[2] (Image 3). Ces phénomènes suggèrent des changements substantiels se produisant au sein du noyau terrestre.

[1]Deng, S., Liu, S., Mo, X., Jiang, L., & Bauer Gottwein, P. (2021). Polar Drift in the 1990s Explained by Terrestrial Water Storage Changes. Geophysical Research Letters, 48(7). https://doi.org/10.1029/2020gl092114

[2]Dyachenko, A. I. (2003). Earth's magnetic poles [Les pôles magnétiques de la Terre]. MCCME.

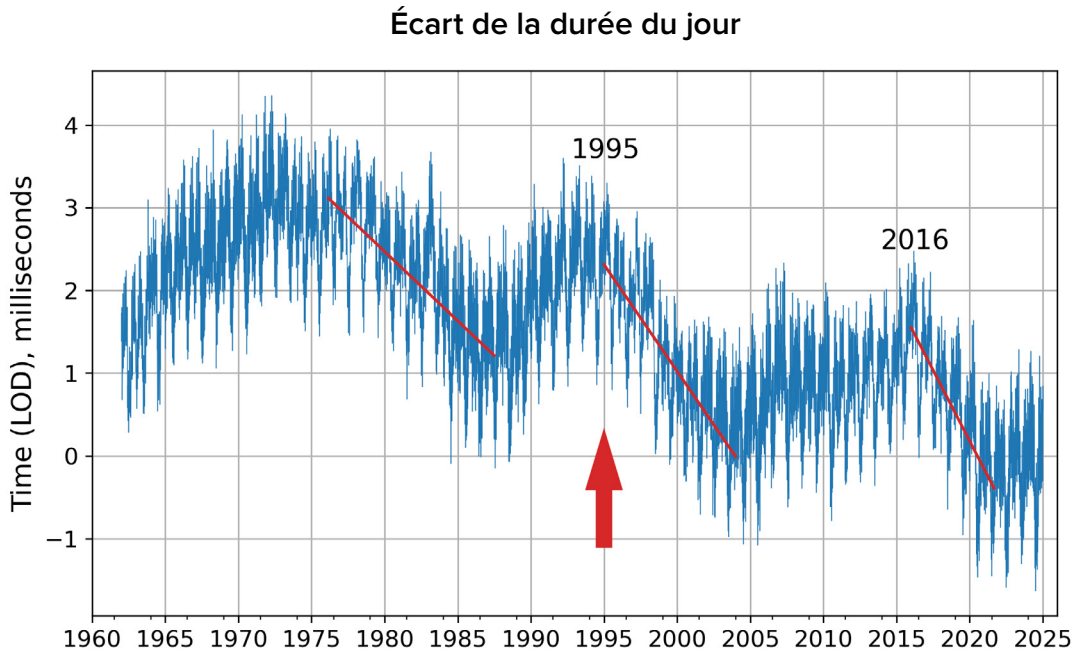


Image 1
Anomalie de la durée du jour en millisecondes de 1962 à 2023
Source : Centre d'Orientation de la Terre de l'IERS, Observatoire de Paris, Durée du jour – paramètres d'orientation de la Terre :
https://datacenter.iers.org/singlePlot.php?plotname=EOPC04_14_62-NOW_IAU1980-LOD&id=223

Sur l'image, les lignes rouges représentent les lignes de tendance illustrant la vitesse à laquelle la durée du jour diminue. Par exemple, la ligne de tendance à gauche est relativement douce, tandis que la ligne de tendance à droite, qui marque l'accélération depuis 2016, est presque verticale. Cela indique que la durée du jour diminue beaucoup plus rapidement, ce qui signifie que la rotation de la planète s'accélère.

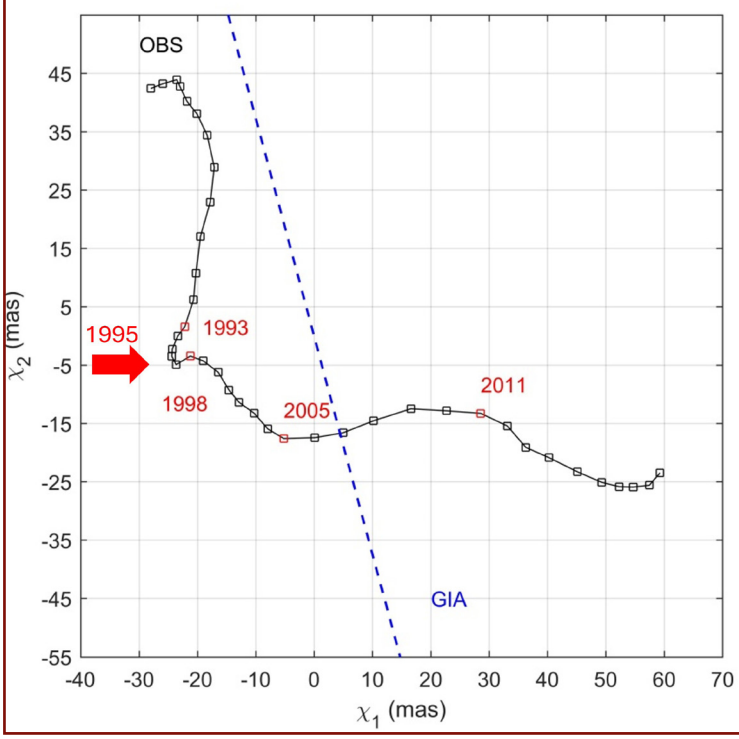


Image 2
Trajectoire à long terme de l'excitation observée après élimination des cycles annuels et des cycles de Chandler en utilisant la méthode de moyenne mobile (ligne noire avec les carrés) ainsi que la direction de la dérive polaire causée par l'ajustement isostatique glaciaire (AIG) (ligne bleue en pointillés).

La taille du sous-ensemble de la moyenne mobile a été définie sur 84 mois, qui est le plus petit multiple commun de 12 mois (cycle annuel) et 14 mois (cycle de Chandler), selon l'étude de Liu et al. (2017).

Source : Deng, S., Liu, S., Mo, X., Jiang, L., & Bauer Gottwein, P. (2021). Polar Drift in the 1990s Explained by Terrestrial Water Storage Changes. Geophysical Research Letters, 48(7).
https://doi.org/10.1029/2020gl092114

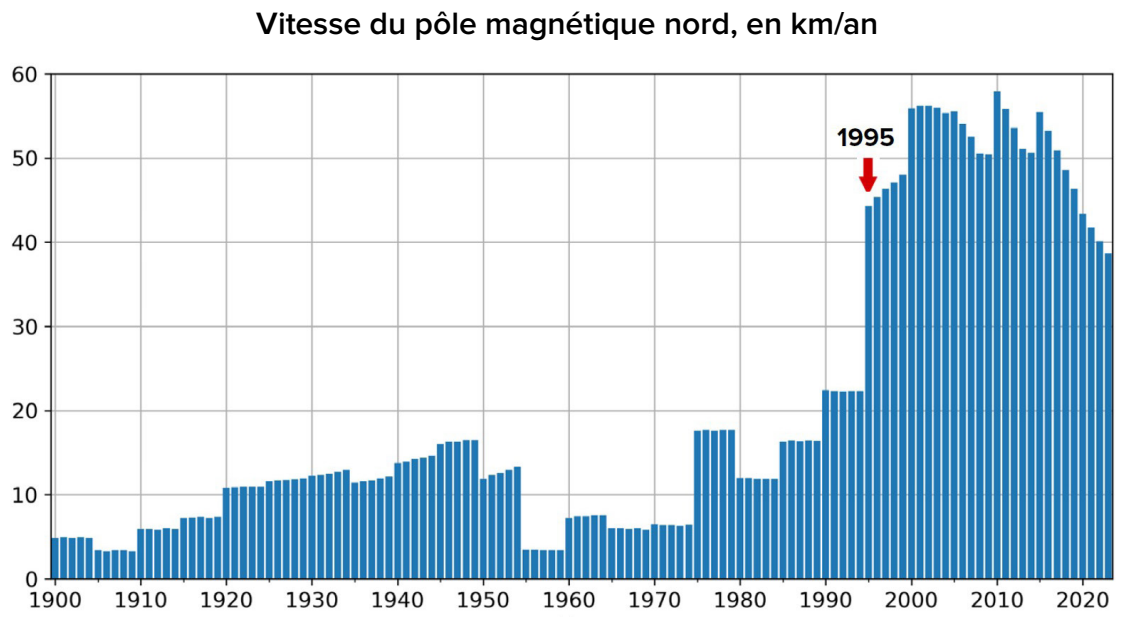


Image 3
Vitesse de la dérive du pôle magnétique Nord (km/an)
Source : Données de la NOAA sur la position du pôle magnétique Nord
https://www.ngdc.noaa.gov/geomag/data/poles/NP.xy

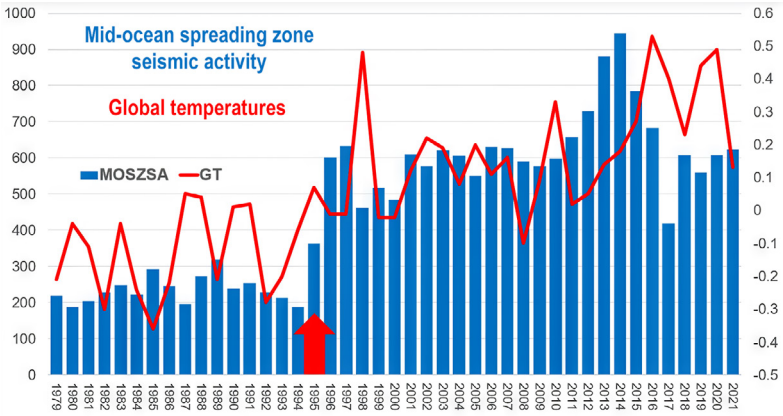
Selon l'hypothèse, à ce moment précis, le système solaire a commencé à entrer dans une région où des forces cosmiques externes ont commencé à exercer une influence significative sur les noyaux planétaires. Les changements observés au sein du noyau de la Terre en 1995 suggèrent une augmentation du réchauffement du noyau externe, ce qui implique que de l'énergie supplémentaire a commencé à atteindre le noyau de la Terre. De tels changements profonds dans le noyau terrestre nécessitent un apport d'énergie des quadrillons de fois plus important que toute l'énergie produite par la civilisation humaine tout au long de son existence.

L'afflux d'énergie externe dans le noyau terrestre a déclenché des processus associés à la fonte du manteau et à l'ascension du magma vers la surface. Cela, à son tour, a initié une réaction en chaîne d'activité sismique et volcanique, d'augmentation de la chaleur émanant de l'intérieur de la Terre et de hausse des catastrophes climatiques mondiales.

Par exemple, depuis 1995, une augmentation significative de l'activité sismique a été observée, caractérisée par une fréquence, une magnitude et une énergie plus élevées des tremblements de terre. Cette tendance touche à la fois les régions continentales et le fond marin (Image 4), y compris les zones précédemment considérées comme sismiquement inactives, ce qui indique le caractère global de ces changements.

Il est important de noter que l'augmentation du nombre de tremblements de terre de magnitude 5,0 ou plus n'est pas attribuable aux progrès de la technologie de surveillance sismique (Image 5), mais reflète de véritables changements dans le système géodynamique de la Terre. Les données cumulées du Centre International de Sismologie confirment que le nombre de tremblements de terre a considérablement augmenté au cours des 25 dernières années et continue d'augmenter (Image 6).

Augmentation des séismes du plancher océanique le long des dorsales médio-océaniques



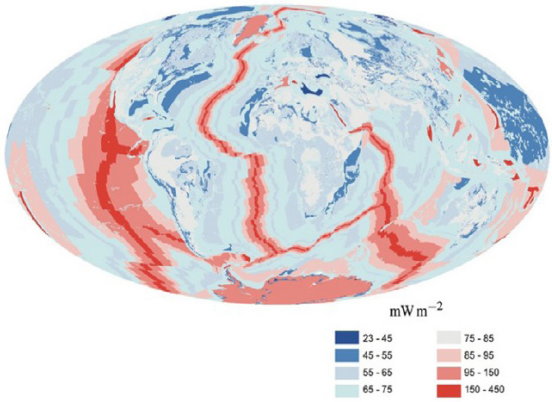


Image 4
Augmentation simultanée des tremblements de terre sur le fond océanique et des températures atmosphériques mondiales (à gauche)
Réchauffement géothermique des dorsales médio-océaniques (à droite)

Source : Davies & Davies, 2010 ; Viterito, A. (2022). 1995: An Important Inflection Point in Recent Geophysical History. [1995 : Un point d'inflexion important dans l'histoire géophysique récente.] International Journal of Environmental Sciences & Natural Resources, 29(5). https://doi.org/10.19080/ijesnr.2022.29.556271

Le diagramme illustre une forte augmentation du nombre de tremblements de terre sur le fond océanique le long des dorsales médio-océaniques à partir de 1995, accompagnée d'une forte corrélation entre la sismicité du fond océanique et les températures atmosphériques. Cela indique une source de chaleur profonde supplémentaire affectant à la fois les océans et l'atmosphère.

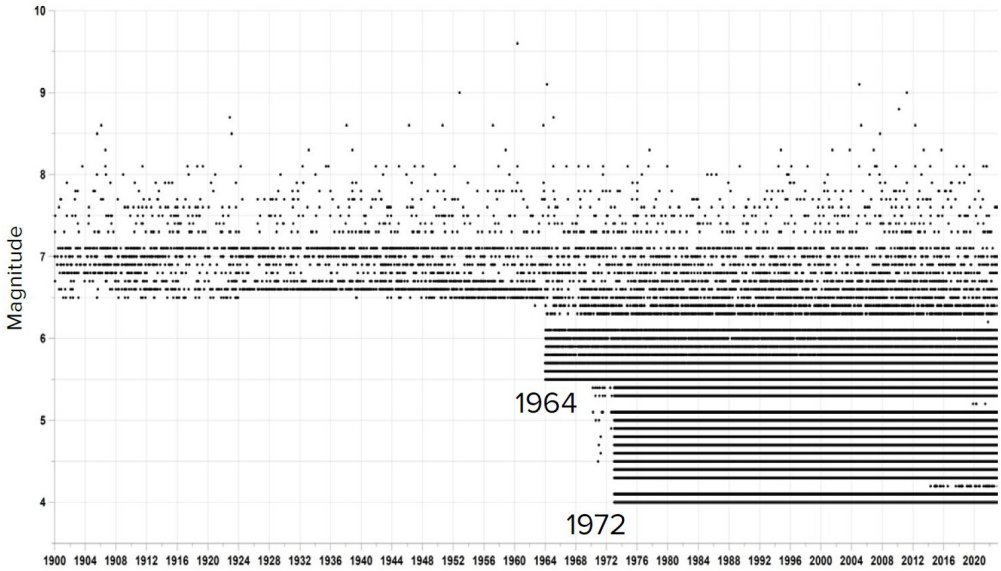


Image 5
Magnitudes des tremblements de terre enregistrées au fil du temps.
Les points noirs représentent des tremblements de terre de différentes magnitudes au cours de différentes années. Avant 1964, seuls les tremblements de terre de magnitude 6,5 et plus étaient enregistrés. À partir de 1964, avec l'introduction de capteurs plus sensibles, les tremblements de terre de magnitude 5,5 et plus ont été documentés. Depuis 1972, les tremblements de terre de magnitude 4,0 et plus ont été systématiquement enregistrés, quelle que soit la localisation.

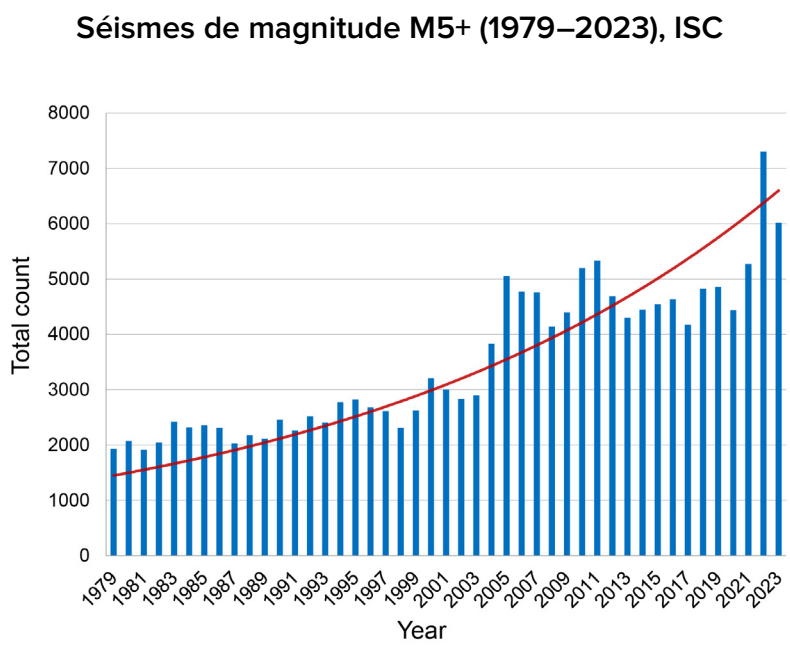


Image 6
Tremblements de terre de M5+ de 1979 à 2023
Source : Base de données de l'ISC.

L'ensemble des données a été compilé en utilisant l'algorithme de la magnitude maximale, sélectionnant la valeur de magnitude la plus élevée enregistrée dans la base de données ISC pour chaque événement (voir Annexe 1).

De plus, l'activité sismique près des volcans augmente, y compris au niveau des supervolcans tels que Yellowstone (États-Unis), Campi Flegrei (Italie), Taupo (Nouvelle-Zélande) et d'autres qui sont entrés en éruption lors des cycles de 12 000 ans antérieurs. Le nombre total de jours d'éruptions volcaniques augmente également, accompagné d'éruptions anormales. Lors de ces événements, la lave expulsée est surchauffée. De plus elle présente une composition atypique caractéristique du magma provenant des couches plus profondes du manteau.[3,4,5,6,7]

Une attention particulière est accordée à l'augmentation des tremblements de terre à foyer profond, qui se produisent à des profondeurs supérieures à 300 kilomètres et atteignent parfois jusqu'à 750 kilomètres sous la surface de la Terre. Ces événements ne proviennent pas de la croûte terrestre, mais du manteau, où le matériau se déforme généralement de manière fluide plutôt que de se fracturer. Cela rend la nature de ces tremblements de terre très inhabituelle.

Étant donné les pressions et les températures extrêmes à ces profondeurs, ces phénomènes peuvent être compris comme de puissantes explosions comparables en énergie à la détonation simultanée de plusieurs bombes atomiques à l'intérieur du manteau terrestre. De plus, les tremblements de terre à foyer profond déclenchent souvent des événements sismiques importants dans la croûte terrestre, amplifiant leur impact destructeur.[8,9]

[3]Castro, J., & Dingwell, D. (2009). Rapid ascent of rhyolitic magma at Chaitén volcano, Chile. Nature, 461, 780-783. https://doi.org/10.1038/nature08458
[4]Smirnov, S. Z., et al. (2021). High explosivity of the June 21, 2019 eruption of Raikoke volcano (Central Kuril Islands): Mineralogical and petrological constraints on the pyroclastic materials. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 418, 107346. https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2021.107346
[5]Why the Tongan eruption will go down in the history of volcanology. (2022). Nature, 602, 376-378. https://doi.org/10.1038/d41586-022-00394-y
[6]Halldórsson, S. A., Marshall, E. W., Caracciolo, A., et al. (2022). Rapid shifting of a deep magmatic source at Fagradalsfjall volcano, Iceland. Nature, 609, 529-534. https://doi.org/10.1038/s41586-022-04981-x
[7]D'Auria, L., Koulakov, I., Prudencio, J., et al. (2022). Rapid magma ascent beneath La Palma revealed by seismic tomography. Scientific Reports, 12, 17654. https://doi.org/10.1038/s41598-022-21818-9
[8]Mikhailova, R. S. (2014). Strong earthquakes in the mantle and their influence in the near and far zone. Geophysical Survey RAS. http://www.emsd.ru/conf2013lib/pdf/seism/Mihaylova.pdf
[9]Mikhailova, R. S., Ulubieva, T. R., & Petrova, N. V. (2021). The Hindu Kush earthquake of October 26, 2015 with Mw=7.5, I0~7: Previous seismicity and aftershock sequence. Earthquakes in Northern Eurasia, 24(2015), 324-339. https://doi.org/10.35540/1818-6254.2021.24.31

Depuis 1995, on observe une augmentation exponentielle rapide du nombre de ces tremblements de terre profonds (Images 7, 8), coïncidant avec d'autres anomalies géodynamiques qui ont commencé durant la même période. L'augmentation de ces explosions intra-mantelliques indique une hausse de l'énergie à l'intérieur de la Terre et une intensification de la fonte du manteau, ce qui pourrait entraîner des éruptions volcaniques à grande échelle.

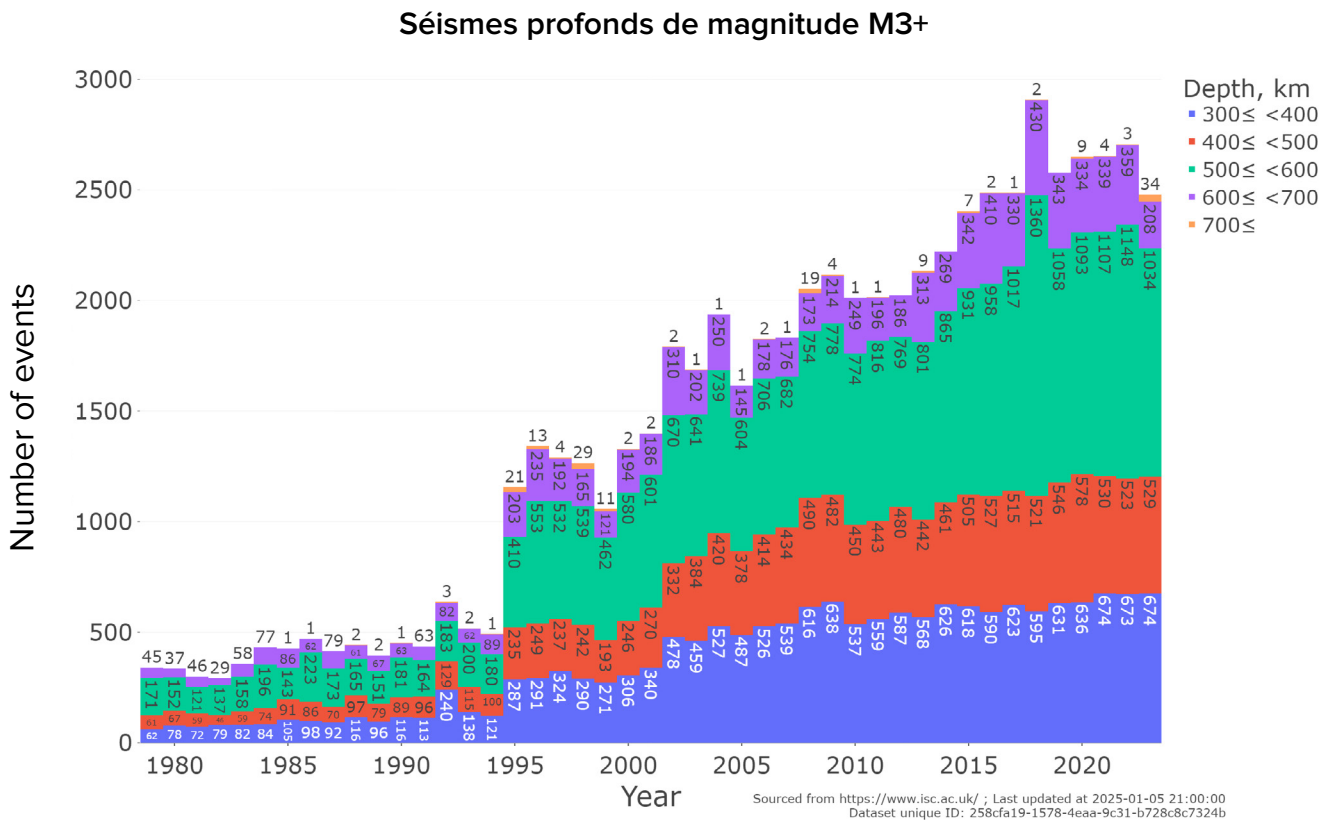


Image 7
Croissance exponentielle du nombre de tremblements de terre à foyer profond M3+ dans le monde depuis 1979. Le graphique est conçu selon un échantillonnage des données par l'algorithme de magnitude médiane spéciale (voir Annexe 1) contenu dans la base de données de l'ISC pour chacun des événements.

Source : Base de données de l'ISC.

Le graphique illustre la progression géométrique de l'augmentation des tremblements de terre à des profondeurs au-delà de 300 kilomètres dans le manteau supérieur de la Terre, où le milieu est traditionnellement considéré comme plastique et incapable de se fracturer. Une augmentation significative est observée à partir de 1995, coïncidant avec des augmentations soudaines de nombreuses autres anomalies géodynamiques. Il n'y a pas de corrélation de l'augmentation des tremblements de terre à foyer profond avec l'augmentation du nombre de capteurs de surveillance

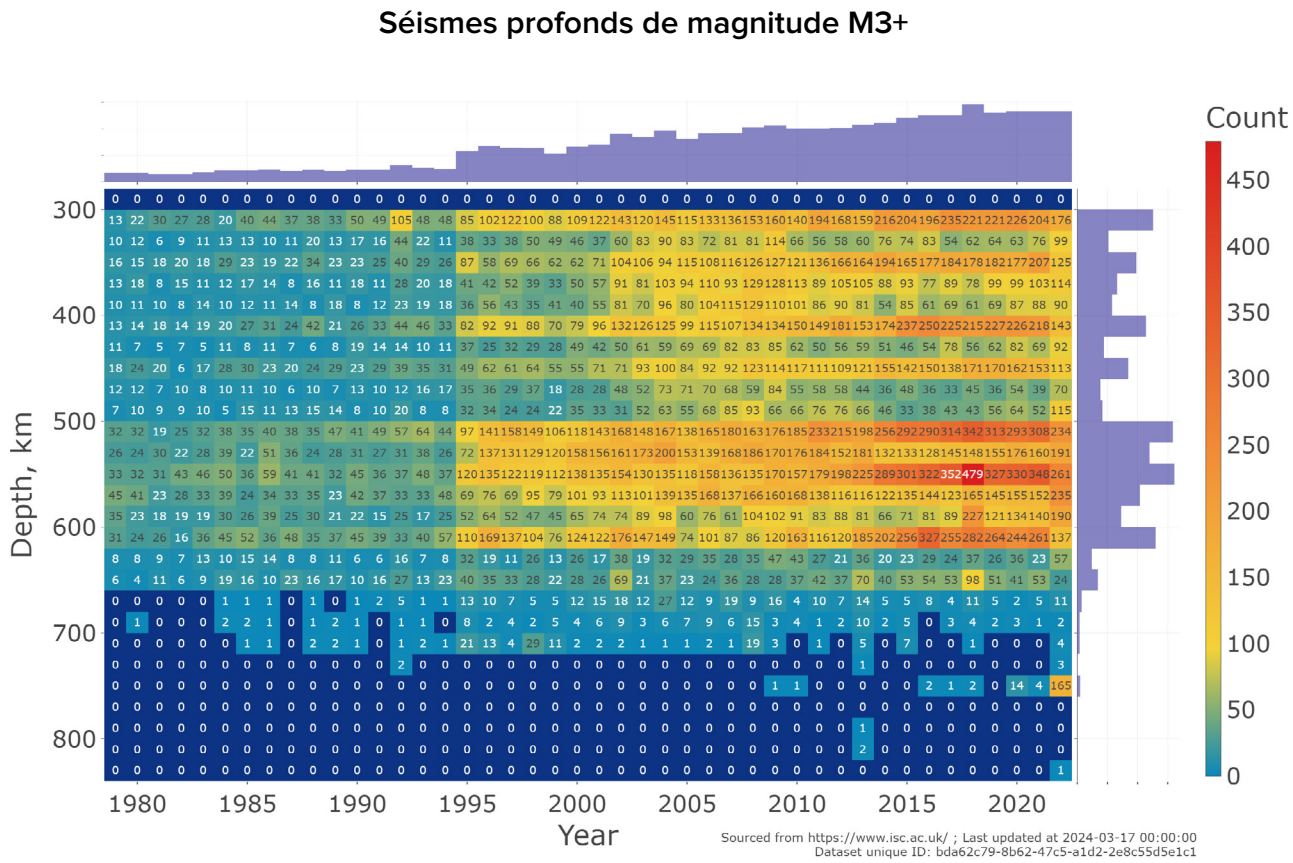


Image 8
Répartition des tremblements de terre à foyer profond M3+ par année et par profondeur
Source : Base de données de l'ISC.

L'augmentation des tremblements de terre à foyer profond indique la fonte du manteau chauffé par le noyau. En raison des forces centrifuges, le magma en fusion dans le manteau commence à monter rapidement vers la surface de la Terre. Ce mouvement érode et réchauffe la lithosphère de l'intérieur à un rythme accéléré. L'ascension du magma est directement responsable de l'augmentation du flux géothermique provenant de l'intérieur de la planète et de l'activation des panaches de magma sous les glaciers de l'Antarctique occidentale et du Groenland central. Ce processus accélère de manière significative la fonte des glaciers et du pergélisol de bas en haut.

Aujourd'hui, l'océan se réchauffe comme jamais auparavant, ce qui fait considérablement intensifier les événements naturels extrêmes tels que les inondations, les ouragans et les cyclones tropicaux. L'océan joue un rôle crucial dans la régulation de la chaleur de la planète, car il peut absorber et redistribuer l'excédent de chaleur, empêchant ainsi des conséquences catastrophiques. Cependant, maintenant que le réchauffement de la Terre s'intensifie en raison de l'activité géodynamique causée par les cycles astronomiques, l'océan a perdu sa fonction d'élimination de la chaleur des profondeurs. Cela s'est produit à cause de la pollution des océans par les humains. Les déchets plastiques se décomposent en microplastiques et nanoplastiques, réduisant la conductivité thermique de l'eau (Image 9).

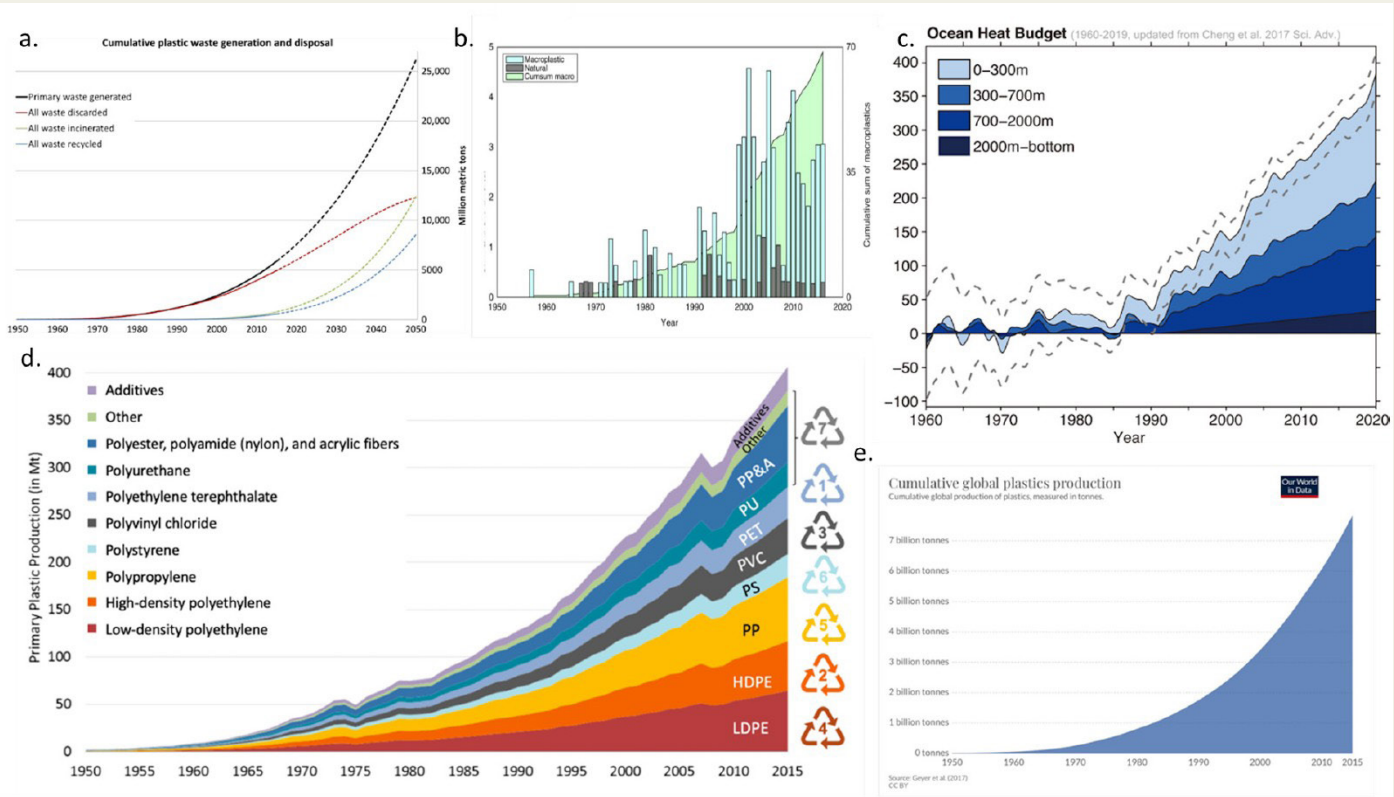


Image 9

Diagrammes des changements de la température de l'océan de 1960 à 2019 et leur comparaison avec les diagrammes de la croissance de la production de polymères synthétiques, de leur utilisation dans divers secteurs de l'économie, ainsi que de l'élimination des déchets plastiques dans l'océan (diverses sources).

a. Cumul des quantités de déchets plastiques produits et éliminés
Source : Geyer, R., Jambeck, J. R., & Law, K. L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. Science Advances, 3(7).
https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782

b. Cumul des macroplastiques dans l'océan et les indicateurs annuels
Source : Ostle, C., Thompson, R. C., Broughton, D., Gregory, L., Wootton, M., & Johns, D. G. (2019). The rise in ocean plastics evidenced from a 60-year time series. Nature Communications, 10(1622).
https://doi.org/10.1038/s41467-019-09506-1

c. Changements de la température de l'océan mondial entre 1960 et 2019 (Purkey et Johnson, 2010; mis à jour par Cheng et al., 2017)
Source : Cheng, L., Abraham, J., Zhu, J., Trenberth, K. E., Fasullo, J., Boyer, T., Locarnini, R., Zhang, B., Yu, F., Wan, L., Chen, X., Song, X., Liu, Y., & Mann, M. E. (2020). Record-Setting Ocean Warmth Continued in 2019. Advances in Atmospheric Sciences, 37, 137–142.
https://doi.org/10.1007/s00376-020-9283-7

d. Production mondiale du plastique primaire par type de polymère
Source : Geyer, R., Jambeck, J. R., & Law, K. L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. Science Advances, 3(7).
https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782

e. Cumul de la production plastique mondiale depuis 1950
Source des données : Plastic Marine Pollution Global Dataset

L'augmentation des températures de l'eau se produit non seulement à la surface, mais aussi dans toute la profondeur ainsi qu'à la surface du fond marin. Le réchauffement des océans est causé par la montée du magma, qui chauffe particulièrement la croûte océanique, plus fine et plus vulnérable que la croûte continentale.

Les données historiques provenant des carottes géologiques et glaciaires indiquent que la Terre a traversé des cycles catastrophiques similaires tous les 12 000 ans.[10] Tous les 24 000 ans, ces catastrophes planétaires ont été considérablement plus intenses, comme en témoignent les études des couches de cendres volcaniques dans les carottes de glace[11] (Image 10) et d'autres recherches géochronologiques. La Terre entre maintenant dans un de ces cycles. Cependant, le cycle actuel est exacerbé par des facteurs anthropiques, tels que la pollution des océans, qui a encore réduit la capacité des océans à réguler l'équilibre énergétique de la Terre.

À mesure que les océans se réchauffent, les déchets plastiques se décomposent en microplastiques et nanoplastiques, ce qui réduit encore la conductivité thermique des océans. Cette perte de conductivité thermique est d'une importance cruciale pendant les périodes d'activité géodynamique accrue causées par les cycles astronomiques.

L'accumulation d'excédent d'énergie à l'intérieur de la Terre a conduit à une augmentation du nombre de tremblements de terre à foyer profond et à la formation rapide de nouvelles chambres magmatiques, ce qui rend l'instabilité de la planète plus intense. Ce circuit fermé accélère le réchauffement et la déstabilisation de la Terre, rapprochant la planète d'une destruction inévitable.

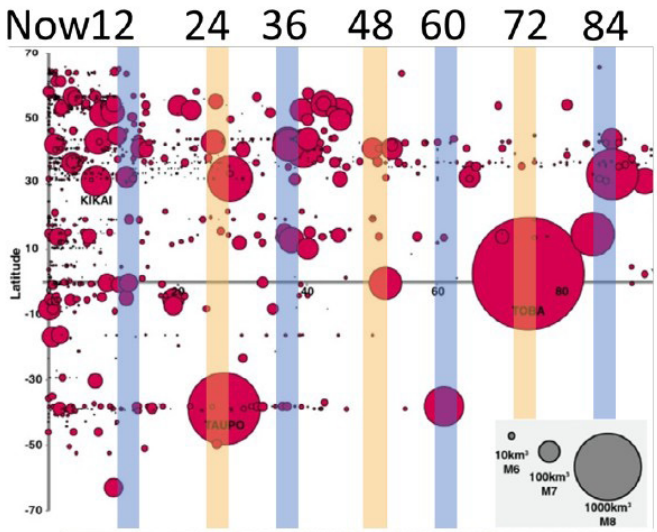
La modélisation mathématique indique que les systèmes économiques et sociaux mondiaux pourraient s'effondrer dans les 4 à 6 prochaines années en raison des dégâts croissants causés par les catastrophes climatiques. L'augmentation exponentielle des événements catastrophiques menace de rendre la Terre inhabitable d'ici la prochaine décennie (Image 11).

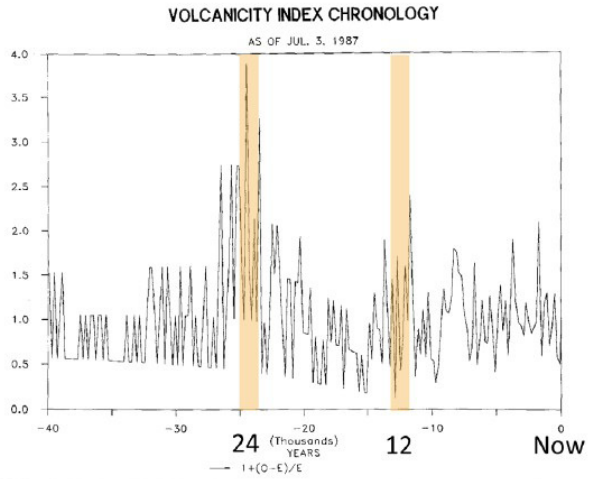
Contrairement aux cycles précédents, l'état actuel de la planète est aggravé par la pollution causée par l'activité humaine, laissant peu d'espoir pour la survie des écosystèmes ou de la Terre elle-même. **Il est important de comprendre que traiter les problèmes liés aux océans pourrait ralentir la progression des cataclysmes, mais ne les arrêtera pas complètement.**

[10] Arushanov, M. L. (2023). Climate dynamics: Space factors. LAMBERT Academic Publishing.

[11] Sawyer, D. E., Urgeles, R., & Lo Iacono, C. (2023). 50,000 yr of recurrent volcaniclastic megabed deposition in the Marsili Basin, Tyrrhenian Sea. Geology, 51(11), 1001-1006. https://doi.org/10.1130/G51198.1

Éruptions volcaniques catastrophiques se produisant tous les 12 000 ans





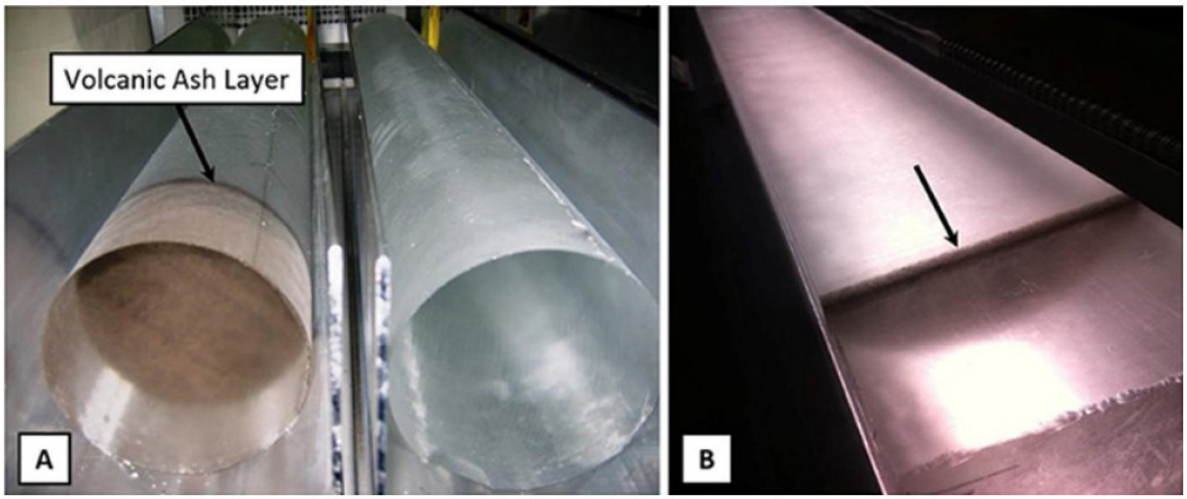


Image 10

Données de recherche sur les couches de cendres volcaniques provenant des éruptions des 100 000 dernières années dans les carottes de glace de l'Antarctique et de l'Arctique, compilées à partir des travaux de divers auteurs.

Source : Brown, S. K., Crosweller, H. S., Sparks, R. S. J., Cottrell, E., Deligne, N. I., Guerrero, N. O., Hobbs, L., Kiyosugi, K., Loughlin, S. C., Siebert, L., & Takarada, S. (2014). Characterisation of the Quaternary eruption record: analysis of the Large Magnitude Explosive Volcanic Eruptions (LaMEVE) database. Journal of Applied Volcanology, 3(5). https://doi.org/10.1186/2191-5040-3-5

Bryson, R. A. (1989). Late quaternary volcanic modulation of Milankovitch climate forcing. Theoretical and Applied Climatology, 39, 115–125. https://doi.org/10.1007/bf00868307

Les graphiques illustrent l'activité volcanique catastrophique se produisant tous les 12 000 ans, avec des événements encore plus intenses tous les 24 000 ans (en tenant compte des incertitudes de datation). Ces épisodes catastrophiques ont entraîné de fortes fluctuations de température, des catastrophes naturelles, des hivers volcaniques et des extinctions massives d'espèces. De nombreux supervolcans qui avaient explosé au cours des cycles passés ont commencé à manifester une activité anormale ces dernières années, en particulier depuis 1995.

La progression des catastrophes croissantes, illustrée par les tremblements de terre

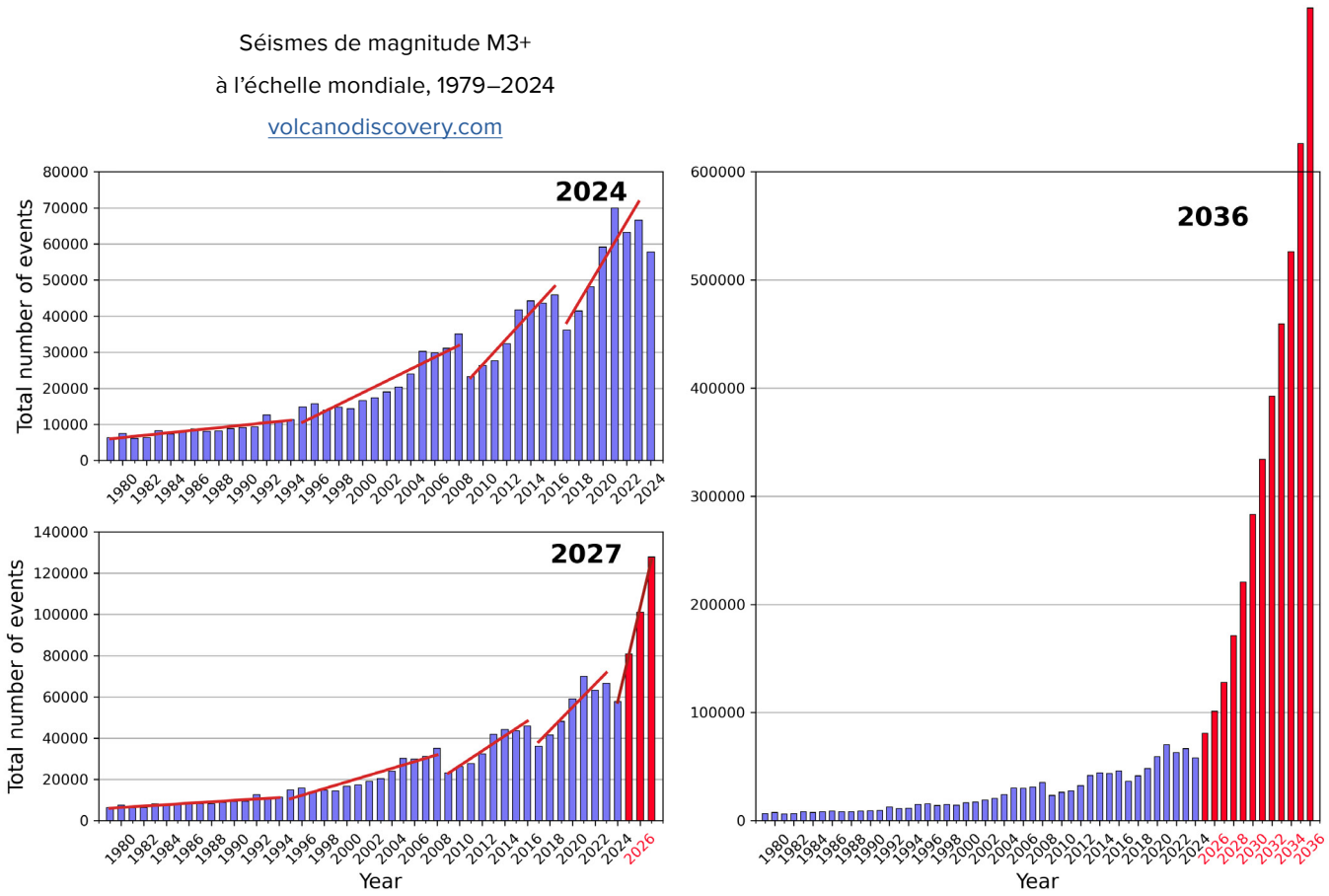


Image 11
Modèle de la croissance exponentielle du nombre de cataclysmes naturels sur l'exemple des tremblements de terre jusqu'en 2036.

Les graphiques montrent la progression géométrique de la fréquence et de l'amplitude des tremblements de terre dans le monde entier, sur la base des tendances actuelles. À chaque étape successive, le nombre de tremblements de terre triple. D'ici 2028, il est prévu que la Terre connaîtra 1 000 tremblements de terre par jour avec des magnitudes supérieures à 3,0, contre une moyenne actuelle de 125 tremblements de terre quotidiens.

Il est très probable que dans six ans, la Terre connaisse des tremblements de terre quotidiens aussi destructeurs que celui qui a frappé la Turquie et la Syrie le 6 février 2023.

Ce rapport aborde une menace supplémentaire posée par les changements dans le noyau terrestre résultant d'un afflux d'énergie externe. Dans les années 1997-1998, les scientifiques, en utilisant les données satellitaires des Études du Centre de Masse de la Terre, ont observé un phénomène sans précédent : un déplacement soudain du noyau interne de la planète. En conséquence, le noyau a migré vers le nord le long d'une trajectoire allant de l'Antarctique occidental à la Sibérie orientale et à la péninsule de Taïmyr dans la Fédération de Russie. Ce déplacement du noyau a provoqué une ascension incontrôlée du magma dans cette direction, entraînant la montée rapide d'un énorme panache magmatique sous la Sibérie.

Actuellement, le panache sibérien a déjà atteint la base de la croûte terrestre dans la région nord du craton de la Sibérie orientale et a commencé à soulever la plaque. Cela indique que le magma en fusion a commencé à percer son chemin vers la surface. Une rupture incontrôlée du panache sibérien pourrait entraîner une extinction mondiale, ne laissant à l'humanité aucune chance de survie. Selon les calculs, une telle éruption serait 1000 fois plus puissante que l'éruption la plus significative du supervolcan de Yellowstone. Des éruptions similaires d'un panache magmatique ont eu lieu en Sibérie il y a 250 millions d'années, provoquant la Grande Extinction permienne.

Ce rapport présente trois scénarios potentiels quant au développement de cette situation et propose des mesures pour faire face à la montée du panache sibérien et réduire les risques d'une rupture incontrôlée.

Le déplacement du noyau vers la Sibérie en 1998

Dans les années 1997-1998, en étudiant le centre de masse de la Terre par satellite, les scientifiques ont enregistré un phénomène sans précédent : un déplacement du noyau interne de la Terre.[12,13] En conséquence, le noyau de la planète s'est déplacé vers le nord, le long d'une ligne allant de l'Antarctique occidentale à la péninsule de Taïmyr au nord de la Sibérie orientale (Image 12).

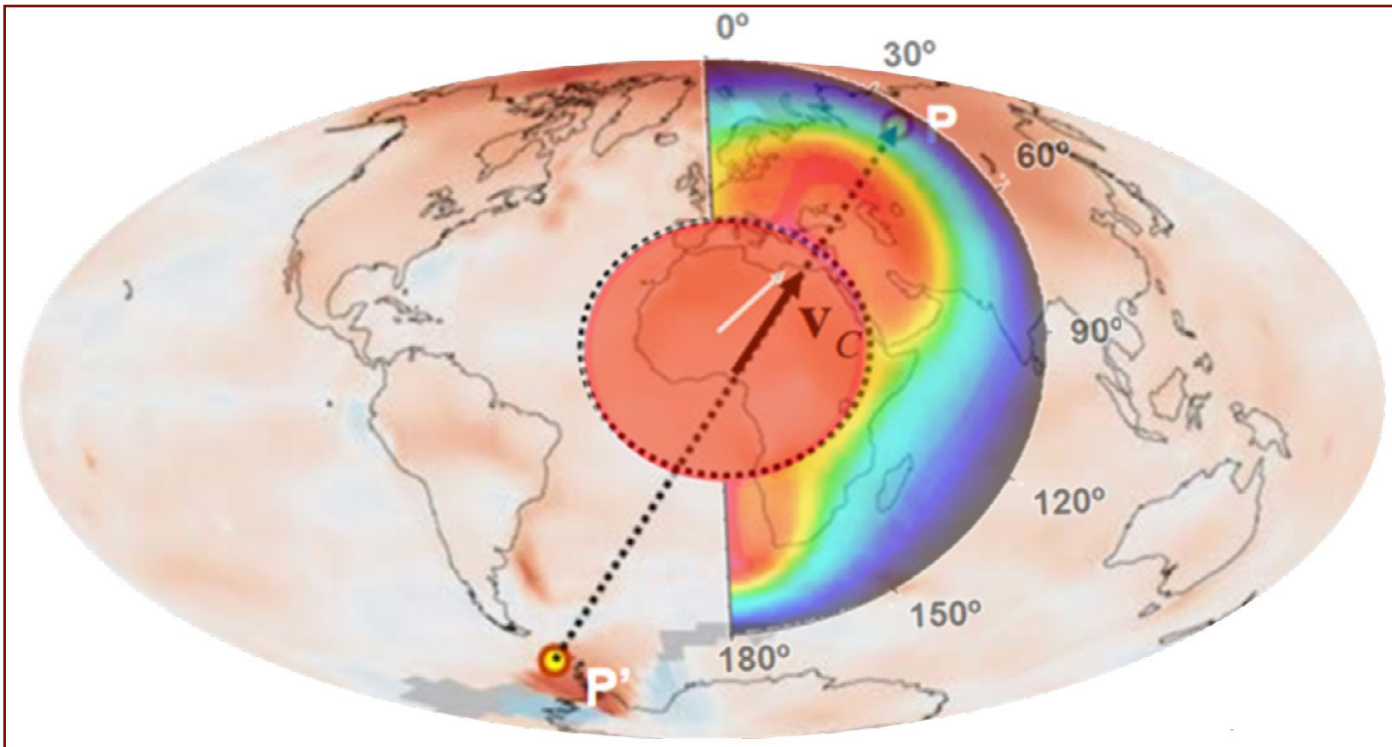


Image 12 Déplacement du noyau en 1997-1998 et les ondes thermiques dans le magma causées par le déplacement du noyau. (Barkin Yu. V.)
La carte montre le vecteur de déplacement du noyau interne de l'Antarctique occidentale vers la Sibérie orientale, en direction de la péninsule de Taïmyr.
Le schéma est superposé sur une carte des anomalies thermiques atmosphériques.

Source : Les conséquences géophysiques des déplacements relatifs et des oscillations du noyau et du manteau de la Terre. Présentation par Yu.V. Barkin, Moscou, IFZ, OMTS. 16 septembre 2014.

[12] Barkin, Yu. V. (2011). Synchronous jumps in activity of natural planetary processes in 1997-1998 and their unified mechanism. In Geology of Seas and Oceans: Proceedings of the XIX International Scientific Conference on Marine Geology (Vol. 5, pp. 28-32). GEOS.
[13] Smolkov, G. Ya. (2018). Exposure of the solar system and the earth to external influences. Physics & Astronomy International Journal, 2(4), 310-321. https://doi.org/10.15406/paij.2018.02.00104

En même temps, quatre équipes de recherche différentes ont indépendamment enregistré des changements anormaux dans divers paramètres géophysiques de la Terre, témoignant de cet événement. Selon les données satellitaires, une équipe d'auteurs de l'Université d'État de Moscou et de l'Institut de physique de la Terre de l'Académie des sciences de Russie a enregistré un déplacement du centre de masse de la Terre en 1998[14] (Image 13).

A la même période, le Service International de Rotation de la Terre (IERS) a enregistré une forte accélération de la rotation de la planète. En même temps, à la station de Medicina en Italie, les scientifiques ont enregistré un déplacement soudain de la gravité.[15] Simultanément, un changement brusque de la forme de la Terre[16] a été observé, enregistré à l'aide d'un système de télémètre laser depuis des satellites américains.

Selon le docteur en sciences physiques et mathématiques, le professeur Yuri Barkin, le docteur en sciences techniques, le professeur Gennadi Smolkov,[17] le docteur en sciences géographiques, le professeur Mikhail Arushanov,[18] l'académicien de l'Académie des sciences de Russie et le professeur honoré de l'Université d'État de Moscou Lomonossov, le docteur en sciences géologiques et minéralogiques Victor Khain,[19] et de nombreux autres chercheurs, le déplacement du noyau a entraîné des changements dans toutes les couches de la Terre.

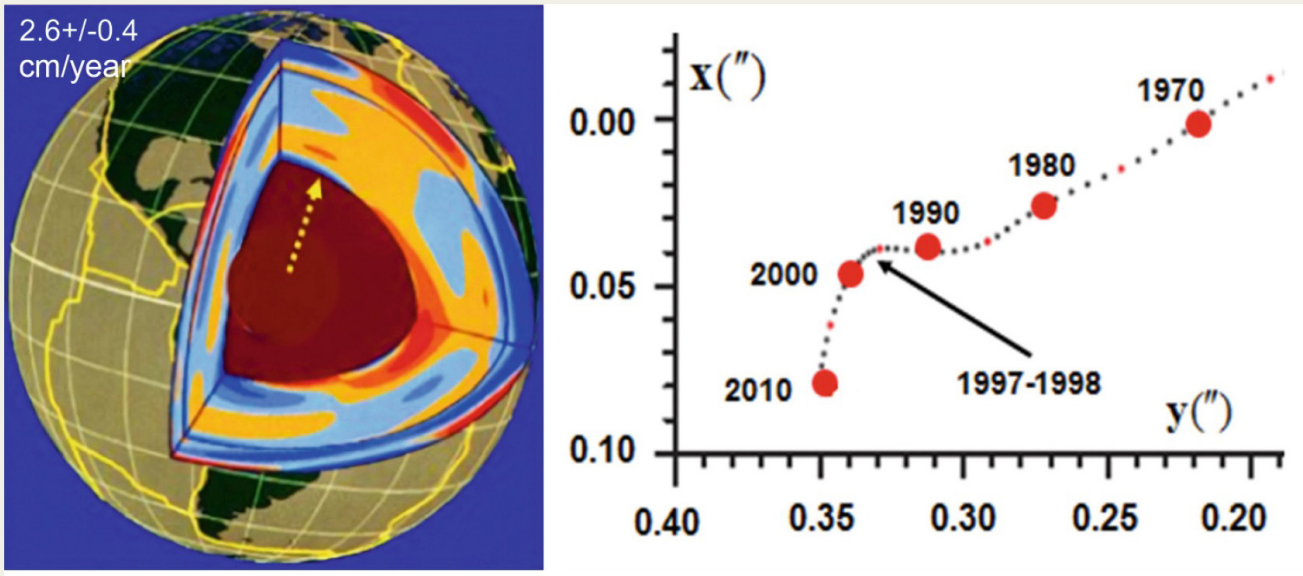


Image 13
Structure interne de la Terre ; la direction de la dérive séculaire du centre de masse de la Terre et la trajectoire de son pôle sur la surface de la Terre de 1990 à 2010, avec un virage presque à 90 degrés en 1997-1998 vers la péninsule de Taïmyr
Source : Smolkov, G.Ya. (2020). Heliogeophysical Research. Issue 25, 14–29. Retrieved from http://vestnik.geospace.ru/index.php?id=569
Source du graphique : Barkin, Y.V., & Klige, R.K. (2012)

[14] Zotov, L. V., Barkin, Yu. V., & Lyubushin, A. A. (2009). Geocenter motion and its geodynamics. In Proceedings of the Conference "Space Geodynamics and Modeling of Global Geodynamic Processes" (pp. 98-101). Siberian Branch of RAS.
[15] Romagnoli, C., Zerbini, S., Lago, L., Richter, B., Simon, D., Domenichini, F., Elmi, C., & Ghirotti, M. (2003). Influence of soil consolidation and thermal expansion effects on height and gravity variations. Journal of Geodynamics, 35(4-5), 521-539. https://doi.org/10.1016/S0264-3707(03)00012-7
[16] Cox, C., & Chao, B. F. (2002). Detection of a large-scale mass redistribution in the terrestrial system since 1998. Science, 297(5582), 831–833. https://doi.org/10.1126/science.1072188
[17] Barkin, Yu. V., & Smolkov, G. Ya. (2013). Abrupt changes in trends of geodynamic and geophysical phenomena in 1997-1998. In Proceedings of the All-Russian Conference on Solar-Terrestrial Physics (pp. 16-21). Irkutsk.
[18] Arushanov, M. L. (2023). Causes of Earth's climate change as a result of cosmic impact, dispelling the myth of anthropogenic global warming. Deutsche Internationale Zeitschrift Für Zeitgenössische Wissenschaft, 53, 4-14. https://doi.org/10.5281/zenodo.7795979
[19] International Committee GCGE GEOCHANGE. (2010). Global environmental changes: Threat to civilization development (Vol. 1). London: GCGE. ISSN 2218-5798

Il est important de noter que cette direction correspond à la dérive brutale du pôle magnétique nord qui a commencé en 1995. Depuis le début du siècle dernier, le pôle se déplaçait à une vitesse moyenne de 10 km/an, mais il a soudainement augmenté sa vitesse jusqu'à un maximum de 57 km/an et a changé de trajectoire, se dirigeant vers la Sibérie et la péninsule de Taïmyr[20] (Images 3, 14).

Cela indique que les conditions pour le déplacement du noyau vers la péninsule de Taïmyr ont commencé à se former dès 1995, entraînées par la liquéfaction additionnelle du noyau liquide externe de la Terre. En 2013, des chercheurs de l'Université de Leeds ont établi que ces changements dans le champ magnétique étaient dus à l'accélération du flux de fer liquide dans le noyau externe de la Terre[21] (Image 15), ce qui a probablement commencé en 1995.

Selon les données publiées, il existe une corrélation entre la fréquence des inversions du champ magnétique et l'intensité du magmatisme du manteau.[22,23,24] En même temps, il est connu que les inversions du champ magnétique sont probablement liées à des processus se produisant dans le noyau externe près de la limite entre le noyau et le manteau.[25]

La corrélation entre les changements dans l'intensité du magmatisme du manteau et la fréquence des inversions du champ magnétique terrestre indique que des perturbations dans le champ magnétique de la Terre se produisent dans le noyau externe suite à des changements dans l'intensité du transfert de la chaleur au niveau de la base des panaches, situés à la limite entre le noyau et le manteau.

La puissance thermique cumulée des panaches augmente à la fois en raison de l'apparition de nouveaux panaches et de l'augmentation de la production de la chaleur par des panaches déjà actifs. Il serait possible de supposer que les perturbations géodynamiques dans le noyau externe et le manteau se produisent pendant les périodes d'émergence et d'écoulement de panaches à la surface.[26]

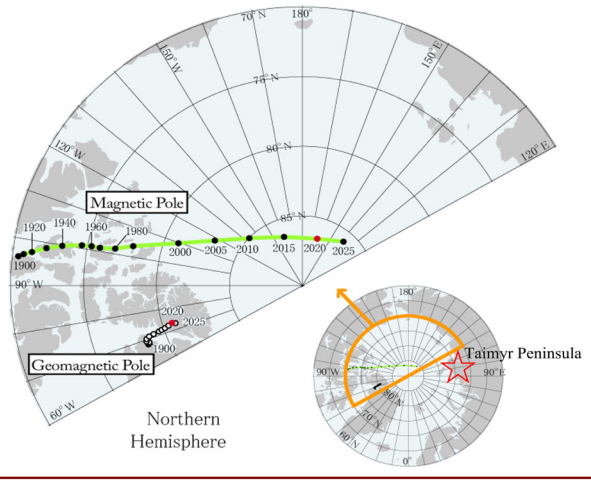


Image 14
Localisations des pôles géomagnétiques et des pôles magnétiques basées sur l'IGRF-13 de 1900 à 2015 par périodes de 5 ans et en 2020 (rouge) et 2025 (prédiction).

Source : World Data Center for Geomagnetism, Kyoto

[20]Dyachenko, A. I. (2003). Earth's magnetic poles. MCCME.
[21]Livermore, P. W., Hollerbach, R., & Finlay, C. C. (2017). An accelerating high-latitude jet in Earth's core. Nature Geoscience, 10, 62–68. https://doi.org/10.1038/ngeo2859
[22]Alain Mazaud, Carlo Laj, The 15 m.y. geomagnetic reversal periodicity: a quantitative test, Earth and Planetary Science Letters, Volume 107, Issues 3–4, 1991, Pages 689-696, ISSN 012-821X, https://doi.org/10.1016/0012-821X(91)90111-T
[23]Roger L. Larson, Peter Olson, Mantle plumes control magnetic reversal frequency, Earth and Planetary Science Letters, Volume 107, Issues 3–4, 1991, Pages 437-447, ISSN 0012-821X, https://doi.org/10.1016/0012-821X(91)90091-U
[24]Zonenshain, L.P., Kuzmin, M.I. *Deep Geodynamics of the Earth* // *Geology and Geophysics*, 1993, Vol. 34 (4), pp. 3–13.
[25]Dobretsov, N.L., Kirdyashkin, A.G., Kirdyashkin, A.A. *Deep Geodynamics*. Novosibirsk, Publishing House of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, GEO Branch, 2001, 408 p.
[26]Kirdyashkin, A.A., Kirdyashkin, A.G. Interaction of a Thermochemical Plume with Mantle Free-Convective Flows and Its Influence on Mantle Melting and Recrystallization // Geology and Geophysics, 2013, Vol. 54, No. 5, pp. 707–721.

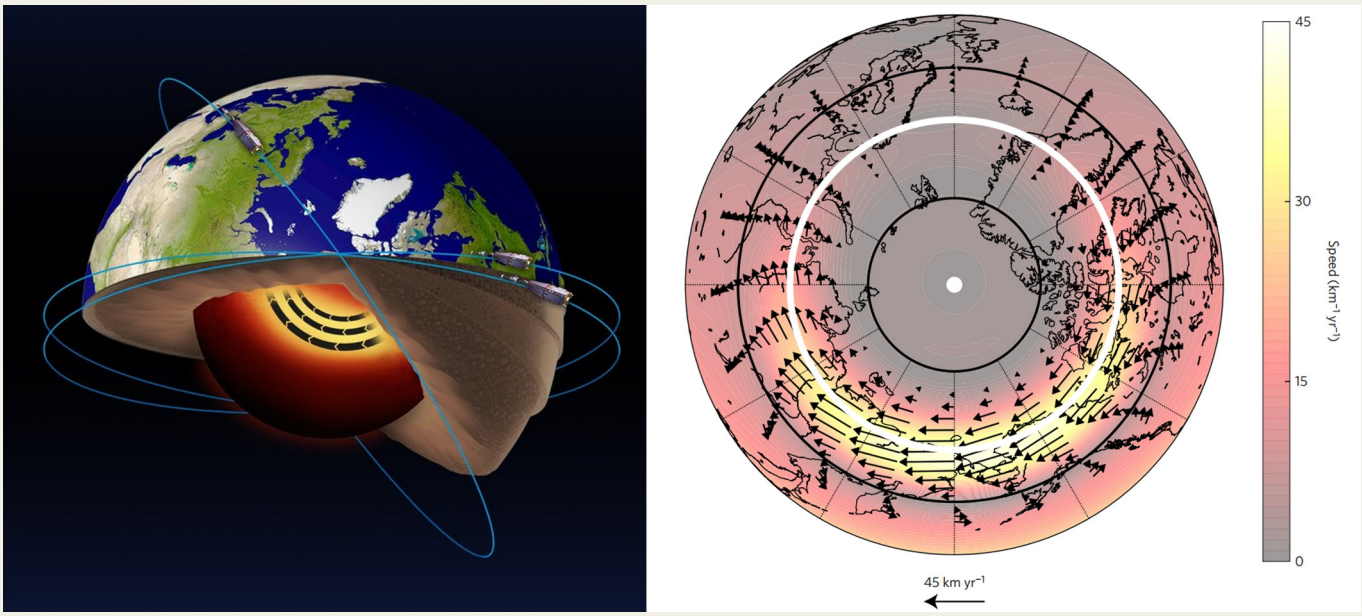


Image 15 L'analyse des données du satellite Swarm de l'ESA a révélé la présence d'un courant-jet dans la partie en fer liquide du noyau terrestre à une profondeur de 3000 km sous la surface, et également le fait que ce courant-jet est en accélération.
Source : ESA
Livermore, P. W., Hollerbach, R., & Finlay, C. C. (2017). An accelerating high-latitude jet in Earth's core. Nature Geoscience, 10, 62–68. https://doi.org/10.1038/ngeo2859

Par conséquent, la dérive actuelle du Pôle Magnétique Nord vers la péninsule de Taïmyr pourrait constituer une preuve supplémentaire des changements dans le noyau liquide externe de la Terre et de l'élévation brutale du panache qui se trouve à la limite entre le noyau et le manteau sous la Sibérie.

Ainsi, à la suite de l'influence cosmique externe sur le noyau terrestre en 1995, le noyau interne a commencé à se réchauffer. Le noyau externe a commencé à fondre, ce qui a conduit à l'accélération soudaine de la dérive du pôle magnétique nord. La liquéfaction du noyau externe a créé les conditions pour le déplacement du noyau vers la Sibérie et la péninsule de Taïmyr en 1997-1998. Selon l'hypothèse proposée par le Dr Yuri V. Barkin, le déplacement du noyau a provoqué un transfert de chaleur asymétrique vers la Sibérie (Image 16). Il est crucial de noter que le transfert de chaleur dans le manteau se fait principalement par un mélange convectif. Cela suggère que le déplacement du noyau a initialement déclenché l'ascension du magma vers la Sibérie. Par la suite, un réchauffement atmosphérique anormal a pu être observé dans cette partie de la Sibérie, et ce réchauffement augmente chaque année.

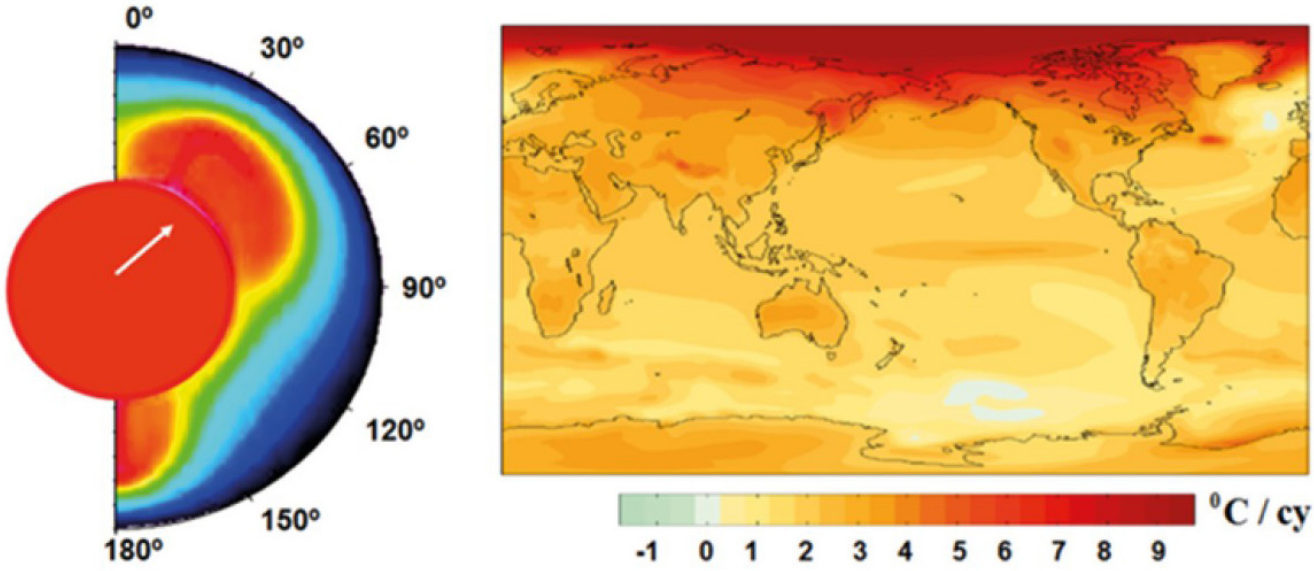


Image 16

Oscillation relative forcée du noyau et du manteau, et le schéma du transfert thermique asymétrique vers les couches supérieures du manteau (à gauche). Les tendances linéaires du réchauffement de la surface (en °C par siècle) selon les données du NCAR CCSM3, en moyenne selon un scénario spécial http://www.realclimate.org/bitz_fig3.png) (à droite).

Source : Barkin, Yu.V. (2009). Ciklicheskie inversionnye izmenenija klimata v severnom i juzhnom polusharijah Zemli [Cyclic Inversion Climate Change in the Northern and Southern Hemispheres of Earth]. Geology of the Seas and Oceans: Materials of the XVIII International Scientific Conference (School) on Marine Geology. Vol. III. - Moscow: GEOS. pp. 4-8.

La Sibérie et l'Arctique sibérien se réchauffent 3 à 4 fois plus vite que le reste du monde

Selon diverses organisations, le territoire de la Russie, en particulier la région arctique, connaît un réchauffement extrême.

Comme l'indiquent les données fournies par les scientifiques du Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat (GIEC) pour 2021, la Russie se réchauffe trois fois plus vite que le reste du monde, et ses régions arctiques et sibériennes se réchauffent quatre fois plus vite que la moyenne mondiale.

En 2022, Igor Shumakov, directeur de Roshydromet, a cité les données de l'Organisation météorologique mondiale[27] indiquant que le territoire de la Russie se réchauffe à 2,5 fois plus vite que le reste de la planète, avec la région polaire septentrionale du pays connaissant le rythme de croissance des températures le plus rapide, surtout au cours des dernières décennies. La Sibérie est l'une des régions connaissant le réchauffement le plus intense au niveau mondial (Image 17), ce qui est une tendance sans précédent au cours des 7 000 dernières années, selon les conditions climatiques modélisées à partir des études dendro-climatiques.[28]

Le Woodwell Climate Research Center des États-Unis (WCRC)[29] a réalisé une étude à grande échelle pour évaluer l'impact du changement climatique sur les températures, l'humidité du sol, l'épaisseur de la couverture neigeuse, les niveaux de précipitations et d'autres paramètres climatiques importants dans diverses régions de l'Arctique. Pour ce faire, les scientifiques ont combiné et systématisé les données collectées par satellites, avions, drones et stations météorologiques au sol au cours des 40 dernières années.

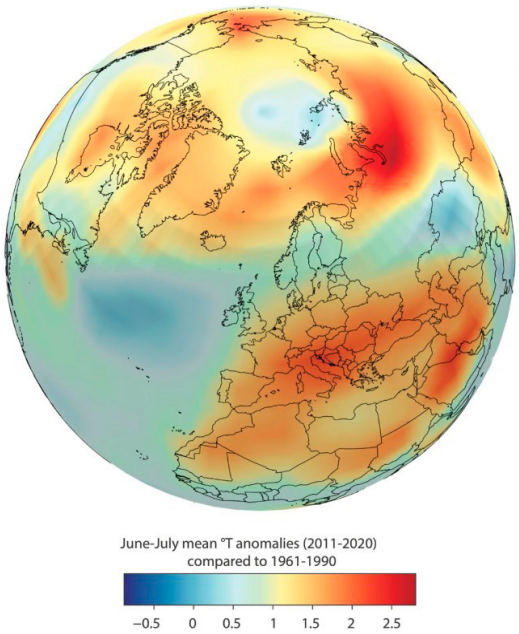


Image 17
Anomalies des températures moyennes en juin-juillet pour l'hémisphère nord (péninsules de Yamal et de Taïmyr) au cours de la dernière décennie d'observations (2011-2020). Les températures sont exprimées en anomalies par rapport au climat de base de 1961–1990 à l'aide d'une sélection de données HadCRUT.5.

Source : Hantemirov, R.M., Corona, C., Guillet, S., et al. Current Siberian heating is unprecedented during the past seven millennia. Nat Commun 13, 4968 (2022). https://doi.org/10.1038/s41467-022-32629-x

[27]TASS. (2024, January). Russia's territory is warming 2.5 times faster than the rest of the planet. TASS News Agency. https://tass.ru/obschestvo/16009287
[28]Hantemirov, R. M., Corona, C., Guillet, S., et al. (2022). Current Siberian heating is unprecedented during the past seven millennia. Nature Communications, 13, 4968. https://doi.org/10.1038/s41467-022-32629-x
[29]Watts, J. D., Potter, S., Rogers, B. M., Virkkala, A.-M., Fiske, G., Arndt, K. A., et al. (2025). Regional hotspots of change in northern high latitudes informed by observations from space. Geophysical Research Letters, 52, e2023GL108081. https://doi.org/10.1029/2023GL108081

L'analyse ultérieure de ces données a permis aux chercheurs d'identifier environ deux douzaines de "points chauds" climatiques. Le réchauffement le plus intense a affecté les régions polaires et centrales de la Sibérie orientale, où les températures moyennes annuelles ont augmenté de 1,1 degré Celsius chaque décennie, ce qui est plusieurs fois supérieur au taux de réchauffement mondial. Les températures ont augmenté encore plus rapidement sur la péninsule de Taïmyr : 1,7 degré Celsius par décennie. De même, les températures de la taïga sibérienne ont augmenté à un rythme de 0,6 degré Celsius par décennie depuis la fin des années 1980.

Les vagues de chaleur en Sibérie ont atteint des niveaux alarmants ces dernières années, notamment en 2020, lorsque les températures ont brusquement augmenté dans toute la région (Image 18).

Les températures en Sibérie ont été supérieures de plus de 5°C à la moyenne de janvier à juin, avec des anomalies atteignant jusqu'à 10°C au-dessus de la moyenne en juin (par rapport à la référence de 1981–2010). Cette période exceptionnellement chaude a battu les records locaux de chaleur, notamment à la station météorologique de Verkhoyansk, qui a enregistré un record absolu de +38°C le 20 juin (Image 19). Le service météorologique russe a déclaré que cette température était la plus élevée jamais enregistrée au nord du cercle arctique.

Anomalie de la température de l'air en surface en 2020
Période de référence : 1981–2010

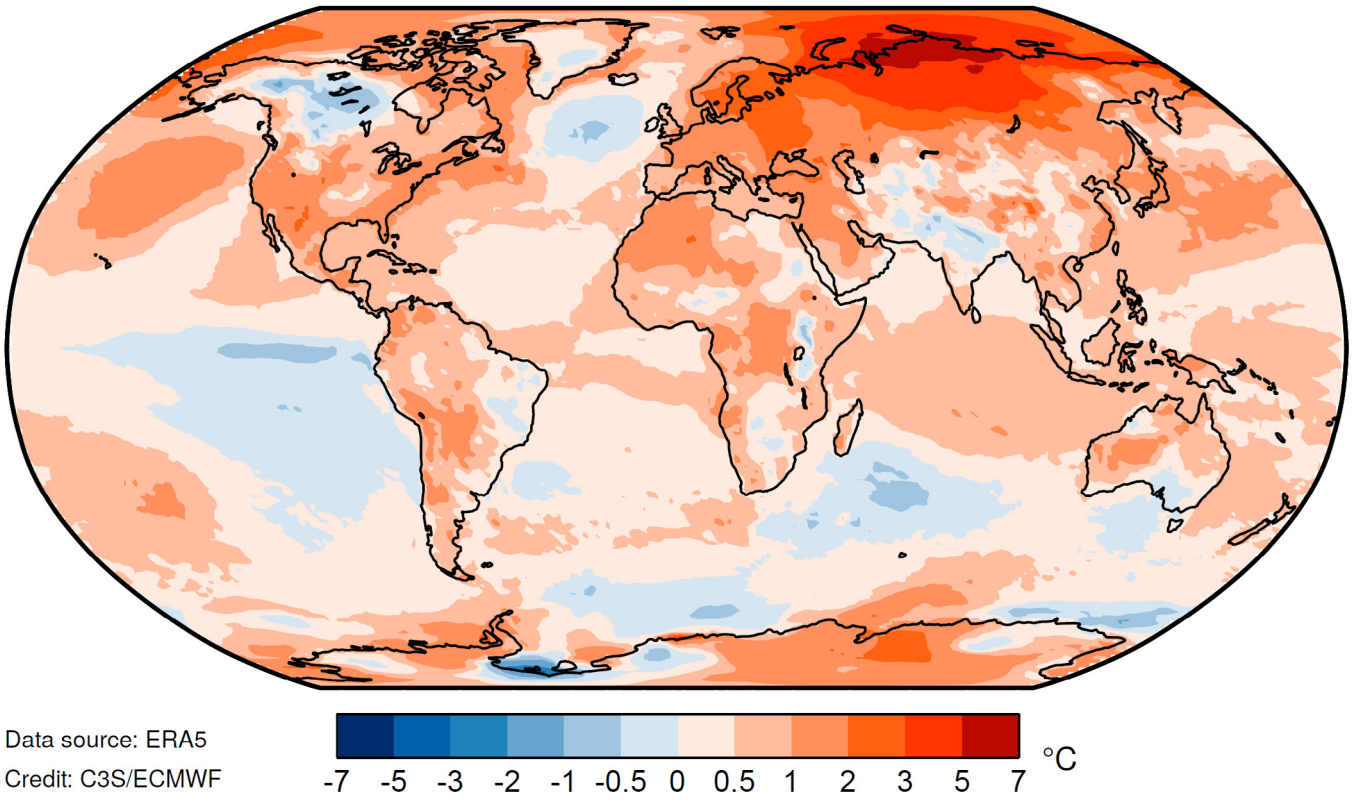


Image 18
Déviation des températures de 2020 par rapport à la moyenne de 1981-2010.
Source : Service d'observation des changements climatiques Copernicus, Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme (ECMWF)

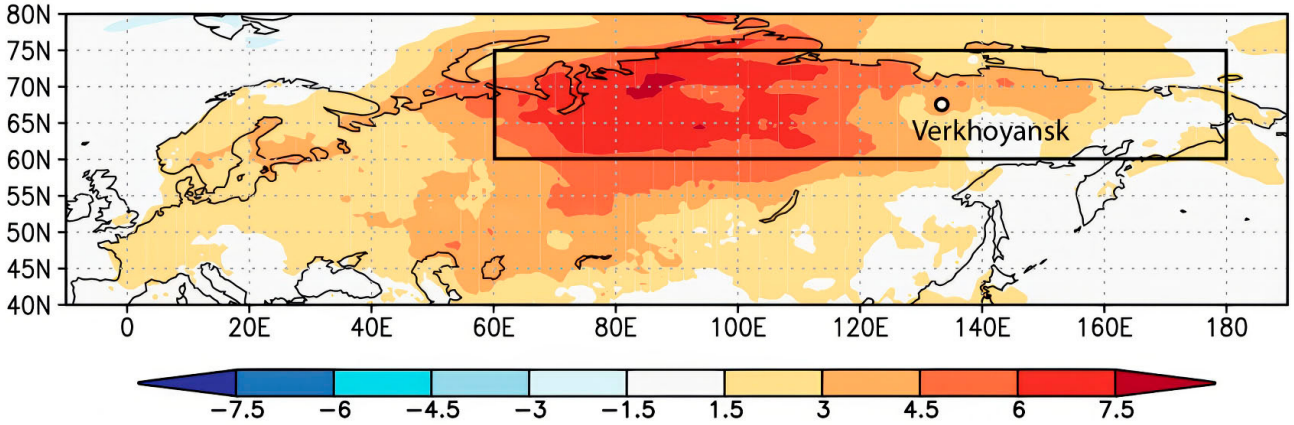


Image 19
Chaleur prolongée en Sibérie : les températures moyennes de janvier à juin 2020 comparées à la norme (1981–2010) dans la région sibérienne, et la localisation de Verkhoyansk, où la température record de +38°C a été observée en juin.

Source : Ciavarella, A., Cotterill, D., Stott, P., et al. (2021). Prolonged Siberian heat of 2020 almost impossible without human influence. Climatic Change, 166, 9. https://doi.org/10.1007/s10584-021-03052-w

Ces vagues de chaleur ne persistent pas en Sibérie de manière continue, mais se produisent sous forme de pulsations, car les inclusions de magma à l'origine des vagues de chaleur ont un caractère ondulatoire. Dans l'atmosphère, où les masses d'air se déplacent et se mélangent librement, les vagues de chaleur peuvent disparaître en quelques mois, comme cela s'est produit en 2020, contrairement aux vagues de chaleur en milieu aquatique.

Selon des recherches de 2022, l'Arctique sibérien se réchauffe presque quatre fois plus vite que la moyenne mondiale, un ratio plus élevé que ce qui était précédemment pris en compte dans les modèles climatiques, et un phénomène qui a surpris les scientifiques[30] (Image 20).

Notamment, ce réchauffement arctique se produit spécifiquement dans la région de la péninsule de Taïmyr. Cette anomalie dans la zone côtière océanique de la Sibérie peut être expliquée par une croûte océanique plus fine qui conduit la chaleur plus rapidement, et par la capacité thermique plus élevée de l'eau par rapport à l'atmosphère. Par conséquent, c'est justement l'eau de l'océan qui absorbe et cumule de manière intense la chaleur provenant du panache magmatique ascendant, même si le panache monte sous la croûte continentale à une distance relativement éloignée de la côte.

[30]Rantanen, M., Karpechko, A. Y., Lipponen, A., Nordling, K., Hyvärinen, O., Ruosteenoja, K., Vihma, T., & Laaksonen, A. (2022). The Arctic has warmed nearly four times faster than the globe since 1979. Communications Earth & Environment, 3, 168. https://doi.org/10.1038/s43247-022-00498-3

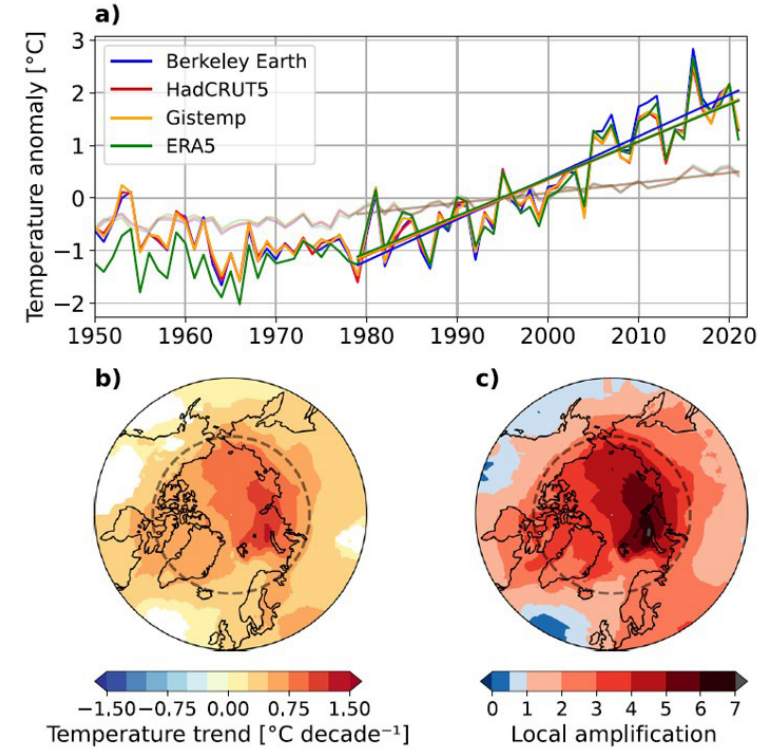


Image 20

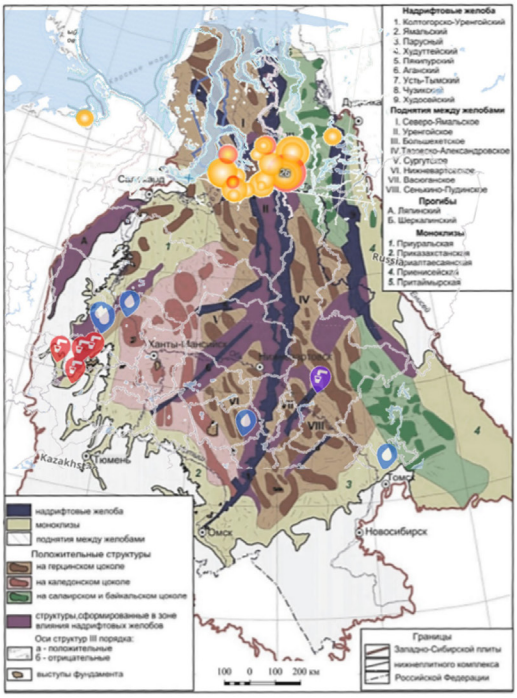
Évolution de la température moyenne annuelle dans l'Arctique. a) Les anomalies de température moyenne annuelle dans l'Arctique (66,5°–90°N) (couleurs sombres) et à l'échelle mondiale (couleurs claires) pendant la période 1950–2021, obtenues des différentes bases de données d'observation. Les anomalies de température ont été calculées par rapport à la période de référence standard de 30 ans de 1981–2010. La ligne pointillée dans (b) et (c) représente le cercle arctique (latitude 66,5°N).

Source : Rantanen, M., Karpechko, A. Y., Lipponen, A., Nordling, K., Hyvärinen, O., Ruosteenoja, K., Vihma, T., & Laaksonen, A. (2022). The Arctic has warmed nearly four times faster than the globe since 1979. Communications Earth & Environment, 3, 168. https://doi.org/10.1038/s43247-022-00498-3

Les signes indirects de l'ascension du panache sibérien

L'intrusion du panache magmatique dans la croûte terrestre sous la Sibérie entraîne non seulement un réchauffement atmosphérique, mais aussi une série d'autres anomalies : le permafrost fond de bas en haut ; l'activité sismique dans la région augmente ; l'eau chaude remonte à la surface, provoquant l'ébullition de l'eau dans des puits, et des incendies de forêt sans précédent qui ont éclaté à travers toute la Sibérie, y compris sous la neige. La localisation extrêmement précise des incendies sous la neige a commencé à se dessiner ces dernières années dans le sud de la péninsule de Taïmyr, de Yamal et de Gydan dans la région polaire. Un facteur important est que les "incendies zombies" — incendies sous la neige — et l'ébullition de l'eau dans les puits se produisent au-dessus des zones de failles profondes (Image 21).

Winter fires under Distribution of fires and thermal springs in Western Siberia (as of 02.12.2021)



Tectonic structure map of the Lower Plate complex of the West Siberian Plate [Geological Structure..., 2005]"

Image 21
Carte montrant la localisation des incendies de forêt hivernaux sous la neige au-delà du cercle polaire arctique en 2021

Avec des photographies d'incendies sous la neige dans la région de Sverdlovsk

Dans les latitudes nord, les émissions de méthane et d'hydrogène provenant du sous-sol augmentent, le nombre de cratères résultant d'explosions de gaz naturel croît, et le volcanisme de boue s'intensifie sur le plateau arctique. Le réchauffement par le bas provoque la dégradation du permafrost et la destruction des hydrates de gaz, ce qui entraîne une libération de gaz, la création des cratères d'explosions et une augmentation du volcanisme de boue. Les gaz libérés de l'intérieur de la planète affectent l'état de l'atmosphère, provoquant des anomalies thermiques, géo-chimiques et électromagnétiques supplémentaires. Examinons ces processus plus en détail.

La fonte du permafrost

Un autre marqueur de la chaleur géothermique supplémentaire provenant du panache mantellique est l'état du permafrost. Les auteurs du rapport ont analysé les données sur la profondeur de la fonte saisonnière du permafrost en Russie de 1994 à 2023. La base de données a été compilée sur la base des mesures effectuées dans le cadre du programme de Surveillance de la couche active circumpolaire (CALM), observant la réponse de la couche active et du permafrost proche de la surface. La base de données est disponible sur le site permafrost.su.

Actuellement, il existe 58 sites en Russie qui surveillent le permafrost selon une méthodologie standardisée, et 46 de ces sites effectuent des mesures depuis plus de 10 ans, ce qui permet d'identifier des tendances à long terme. L'analyse des données a permis aux chercheurs d'identifier des sites où il existe une tendance constante à l'augmentation de la profondeur de la fonte, ce qui indique un réchauffement supplémentaire dans cette zone.

Deux groupes de données ont été identifiés : des sites avec une tendance plus marquée à l'augmentation de la fonte à des profondeurs allant de 40 cm à 200 cm (Image 22, a) et des sites avec un taux de fonte du permafrost moins intense à des profondeurs allant de 40 cm à 140 cm (Image 22, b).

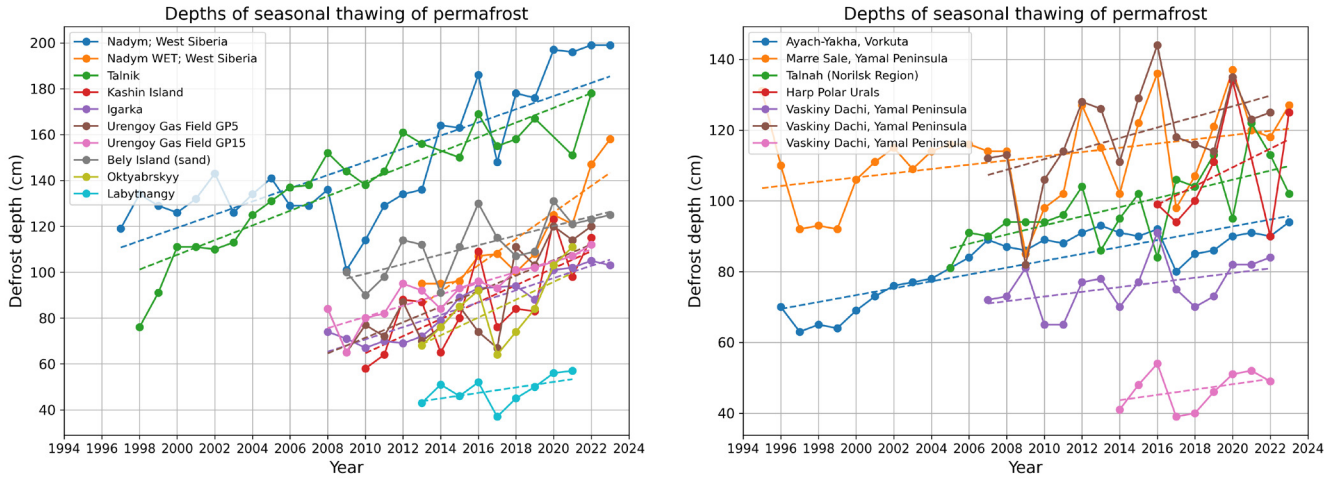


Image 22

La dynamique dans le changement de la profondeur de la fonte saisonnière du permafrost dans diverses régions avec des intensités différentes : a) avec une augmentation des profondeurs de la fonte plus prononcée; b) avec une augmentation des profondeurs de la fonte moins prononcée.

Source des données : https://permafrost.su
Les mesures sont effectuées dans le cadre du programme de Surveillance de la couche active circumpolaire (CALM) : https://www2.gwu.edu/~calm

Pour plus de clarté, tous les points surveillés ont été cartographiés et marqués respectivement en orange et jaune, (Image 23). Il est à noter que ces points sont principalement concentrés dans une région particulière : dans le nord de la Sibérie occidentale, sur la péninsule de Yamal, et au sud des péninsules de Gydan et de Taïmyr.

Cette localisation des zones de fonte maximale du pergélisol correspond à la zone de réduction de la vitesse des ondes sismiques dans le manteau, dans la zone supposée d'étalement de la tête du panache magmatique. Ceci, à son tour, est la cause de l'augmentation des températures du sol, y compris à l'intérieur de la couche gelée.

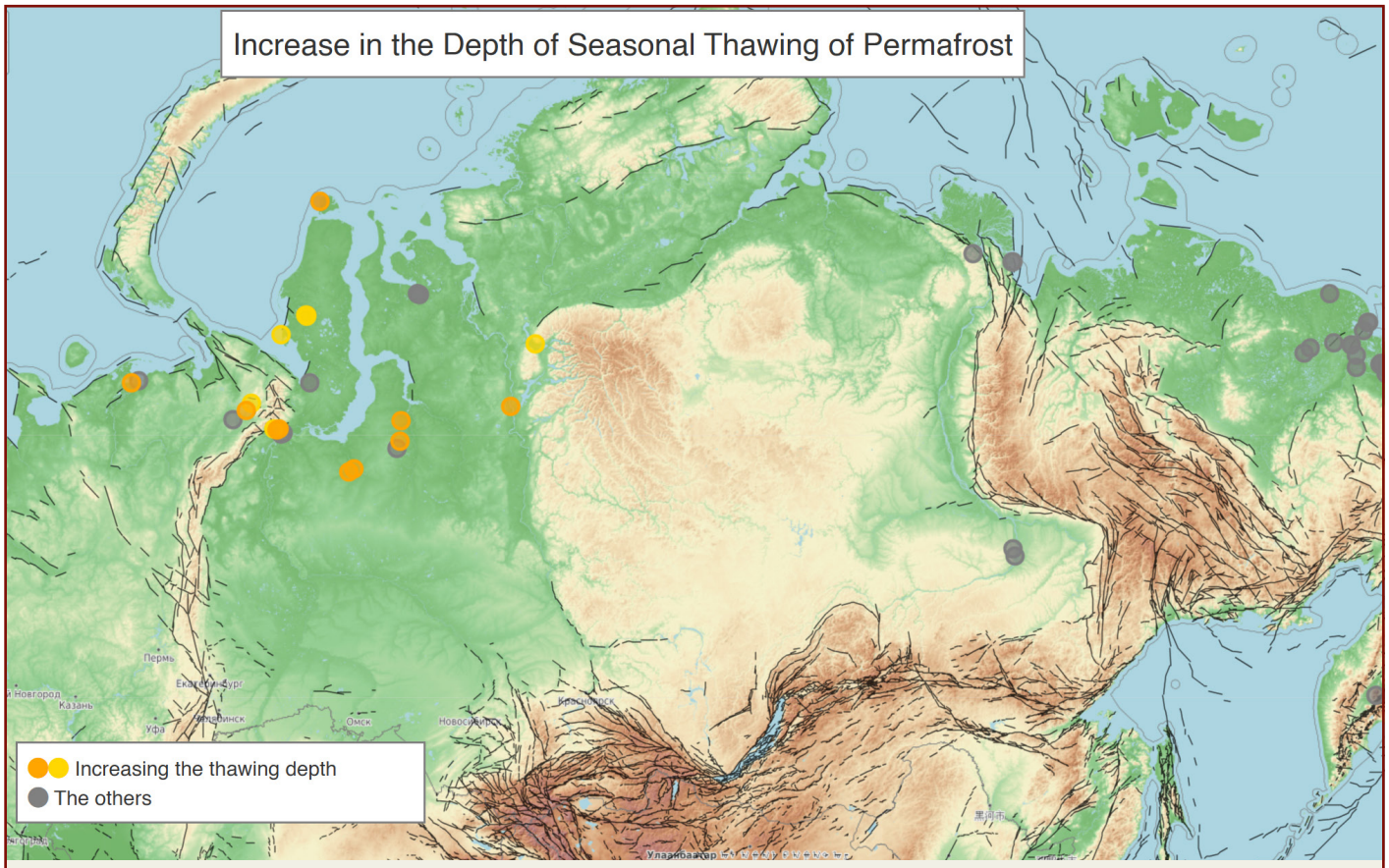


Image 23
Endroits où la profondeur de la fonte saisonnière du permafrost a augmenté. Les sites de mesure sont marqués par des points : gris - lieux sans augmentation notable de la fonte saisonnière, jaune - lieux où la profondeur de la fonte augmente.

Source : https://permafrost.su
Les mesures sont effectuées dans le cadre du programme de Surveillance de la couche active circumpolaire (CALM) : https://www2.gwu.edu/~calm

Les manifestations du volcanisme de boue

Un réchauffement supplémentaire provenant du magma ascendant entraîne la dégradation du permafrost et affecte les hydrates de gaz conservés dans les sols, libérant de grands volumes de gaz contenus dans ceux-ci. De plus, le gaz migre à partir des gisements de gaz et des eaux des nappes souterraines fortement saturées en gaz, réduisant les propriétés d'élasticité et de résistance des sols, favorisant la liquéfaction des argiles et conduisant à d'éventuels processus de volcanisme de boue.

Le volcanisme de boue est un processus géologique d'éruption d'un mélange de gaz, d'eau et de matériaux clastiques à travers des fissures dans la croûte terrestre sous l'influence de la pression géostatique interne.

Ces processus ont été découverts par des chercheurs de l'Académie des Sciences de Russie (RAS) sur la péninsule arctique de Yamal.[31] À la suite d'un ensemble d'études géologiques et géophysiques utilisant les données de sondage de la Terre à distance entre 2014 et 2022, les scientifiques ont identifié plus de 3000 zones d'émissions puissantes de gaz avec formation de cratères au fond des lacs thermokarstiques, des rivières et de la partie côtière de la mer de Kara (Image 24).

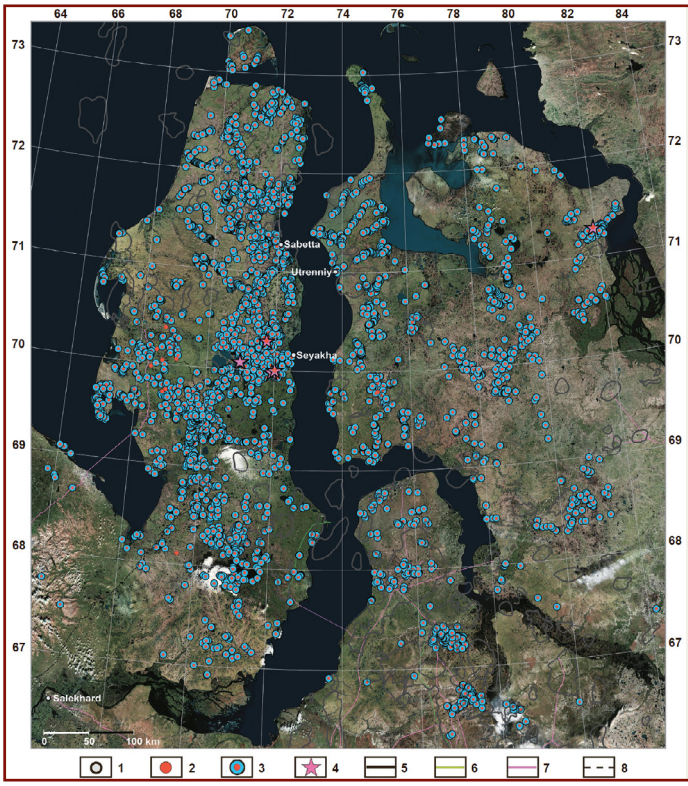


Image 24
Distribution des zones de puissantes émissions de gaz dans le nord de la Sibérie occidentale. Légende: 1 — localités, 2 — cratères isolés d'éruptions de gaz, 3 — cratères d'éruptions de gaz au fond des eaux, 4 — manifestations de volcans de boue, 5 — contours des champs pétroliers et gaziers, 6 — pipelines de pétrole, 7 — pipelines de gaz, 8 — chemin de fer. La base de la carte est une mosaïque d'images satellitaires d'ESRI

Source : Bogoyavlensky, V. I., Nikonov, R. A. & Bogoyavlensky, I. V. New data on intensive Earth degassing in the Arctic in the north of Western Siberia: thermokarst lakes with gas blowout craters and mud volcanoes. AEE 13, 353–368 (2023). https://doi.org/10.25283/2223-4594-2023-3-353-368

[31] Bogoyavlensky, V. I., Nikonov, R. A. & Bogoyavlensky, I. V. New data on intensive Earth degassing in the Arctic in the north of Western Siberia: thermokarst lakes with gas blowout craters and mud volcanoes. AEE 13, 353–368 (2023). https://doi.org/10.25283/2223-4594-2023-3-353-368

En 2022-2023, les données de télédétection ont révélé pour la première fois de grandes structures volcaniques de boue au fond des lacs thermokarstiques Labvarto et Yambuto, qui présentent parfois un volcanisme de boue actif[32] (Image 25). Un lac thermokarstique est une étendue d'eau formée par le dégel du pergélisol. Ainsi, non seulement le dégel du lac mais aussi la liquéfaction de l'argile en profondeur indiquent une source de chaleur en profondeur.

Selon les auteurs de l'étude, sur l'ensemble de la région circumarctique, de telles structures volcaniques de boue distinctes sur les fonds des lacs thermokarstiques n'avaient pas été connues auparavant.

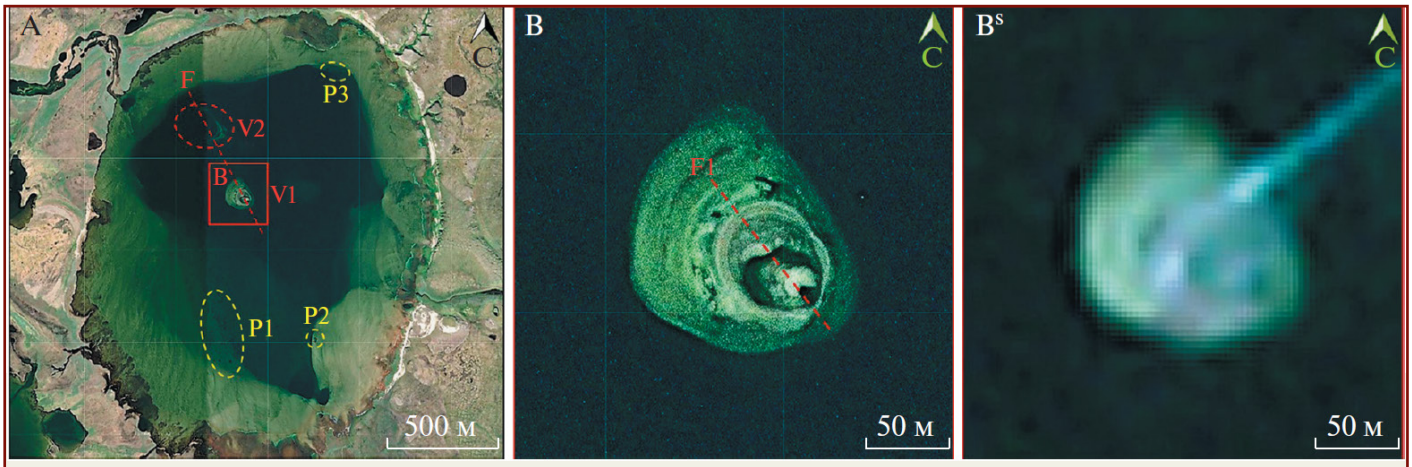


Image 25

Images satellites WorldView-2 du lac thermokarstique Labvarto (A) et son fragment agrandi (B), complété par un fragment de l'image satellite Sentinel-2 (BS). Légznde: P1, P2, et P3 – des pockmarks ; V1 et V2 – des volcans de boue ; F et F1 – des failles prédites.

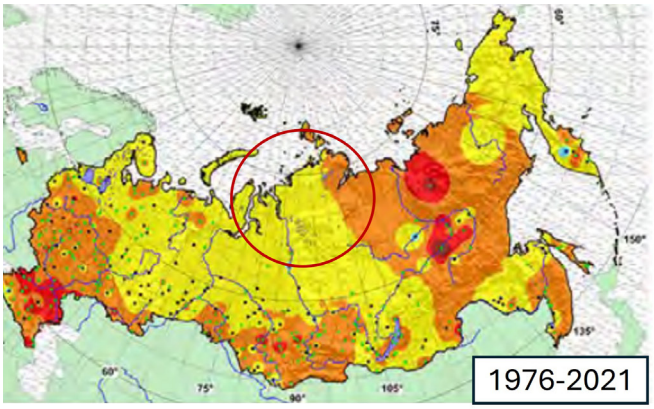
Source : Bogoyavlensky, V. I. New Data on Mud Volcanism in the Arctic on the Yamal Peninsula. Doklady Rossijskoj akademii nauk. Nauki o Zemle 512, 92–99 (2023). https://doi.org/10.31857/S2686739723601084

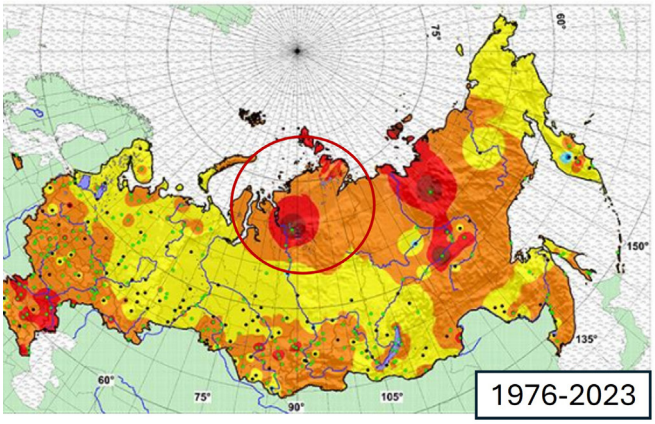
[32] Bogoyavlensky, V. I. NEW DATA ON MUD VOLCANISM IN THE ARCTIC ON THE YAMAL PENINSULA. Doklady Rossijskoj akademii nauk. Nauki o Zemle 512, 92–99 (2023). https://doi.org/10.31857/S2686739723601084

Le réchauffement du sol

Sur la base des données de Roshydromet de 2021 à 2023, les cartes des températures du sol à des profondeurs de 80 cm, 160 cm et 320 cm ont été analysées. La comparaison la plus informative a été celle des tendances de température sur les périodes 1976 à 2021 et 1976 à 2023 (Image 26). Entre 2021 et 2023, une anomalie distincte est apparue sur la carte des tendances dans la zone au sud des péninsules de Gydan et de Taimyr. Cette anomalie coïncide géographiquement avec la région de faibles vitesses des ondes sismiques dans le manteau, identifiée par la tomographie sismique sous la lithosphère de la région sibérienne.

Étant donné la profondeur significative des mesures (320 cm) et la couverture étendue des observations (466 stations météorologiques à travers la Russie), il peut être déduit que l'anomalie de température détectée est associée à une augmentation de la chaleur géothermique due à l'ascension du panache magmatique.





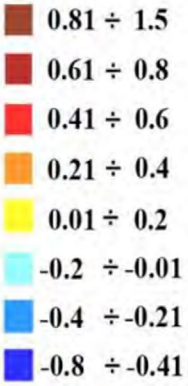


Image 26.
Cartes des tendances du réchauffement du sol selon les données de Roshydromet. Haut : 1976–2021 Bas : 1976–2023
Source : Roshydromet. (2022). Rapport sur les caractéristiques climatiques de la Fédération de Russie pour 2021. Moscou : Service fédéral de l'hydrométéorologie et du suivi de l'environnement.
Roshydromet. (2024). Rapport sur les caractéristiques climatiques de la Fédération de Russie pour 2023. Moscou : Service fédéral de l'hydrométéorologie et du suivi de l'environnement.

La température de l’air proche de la surface

Les observations de température pendant l’hiver 2023–2024 révèlent également un caractère anormal des températures de l’air près de la surface (Image 27). La carte des anomalies de température moyenne de décembre 2023 à février 2024 montre une augmentation de température de 2,0 à 4,5°C par rapport à la norme dans la zone des péninsules de Gydan et de Taïmyr.

Étant donné la localisation nord de cette région, une telle augmentation significative de la température hivernale peut être attribuée à l’influence thermique du panache mantellique.

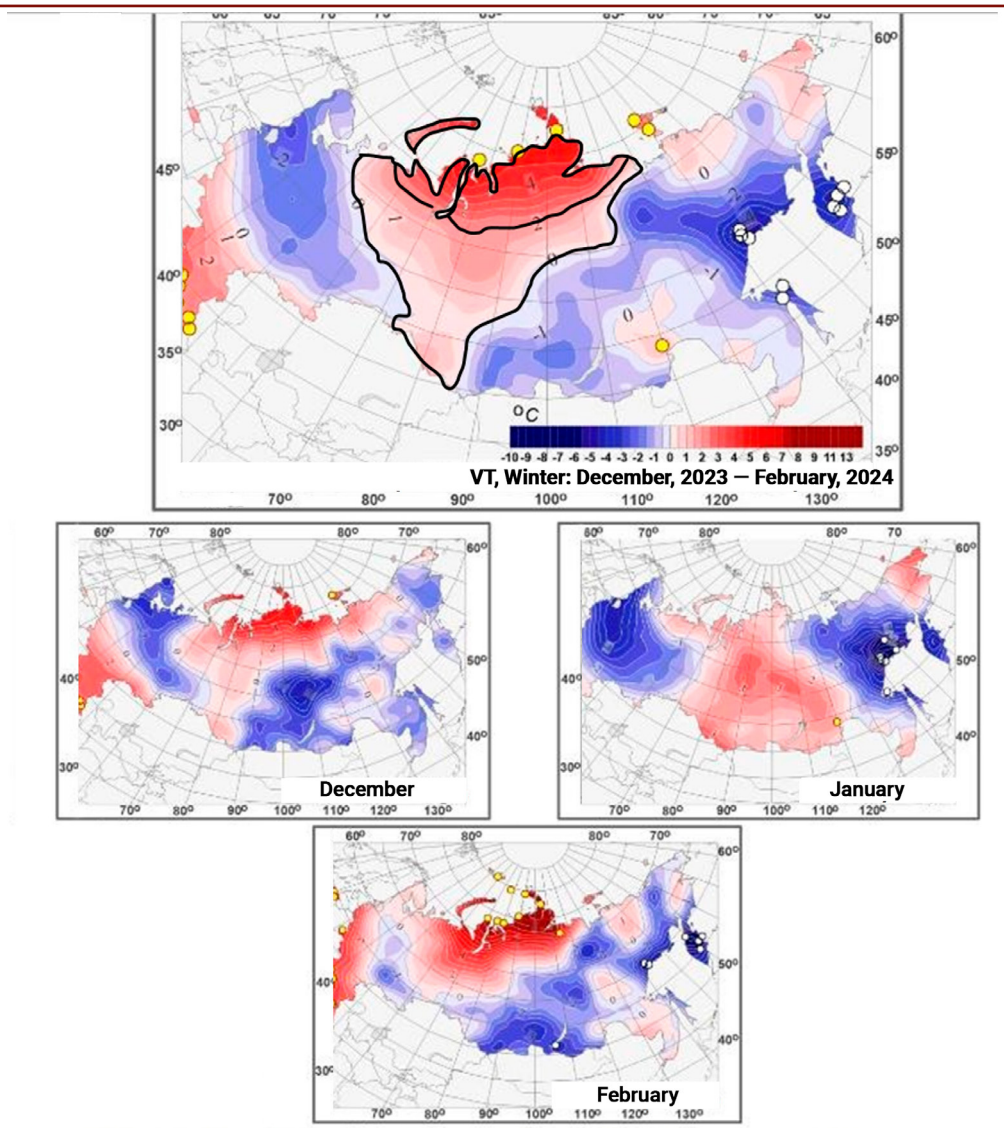


Image 27
Champs d’anomalies saisonnières et mensuelles moyennes de la température de l’air près de la surface (°C) en Russie au cours de l’hiver 2023/24.
Source : Roshydromet. (2024). Rapport sur les caractéristiques climatiques de la Fédération de Russie pour 2023. Moscou : Service fédéral de l’hydrométéorologie et du suivi de l’environnement.

Une analyse des cartes des températures moyennes mensuelles[33] pour janvier et juillet sur la période 2001–2022 montre une anomalie de température consistante dans la région étudiée (Images 28, 29). Ceci indique que l'anomalie n'a pas seulement été observée au cours des deux dernières années, mais qu'elle a persisté pendant toute la période d'observation de 23 ans, ce qui confirme la conclusion selon laquelle l'intrusion du panache influence les températures près de la surface.

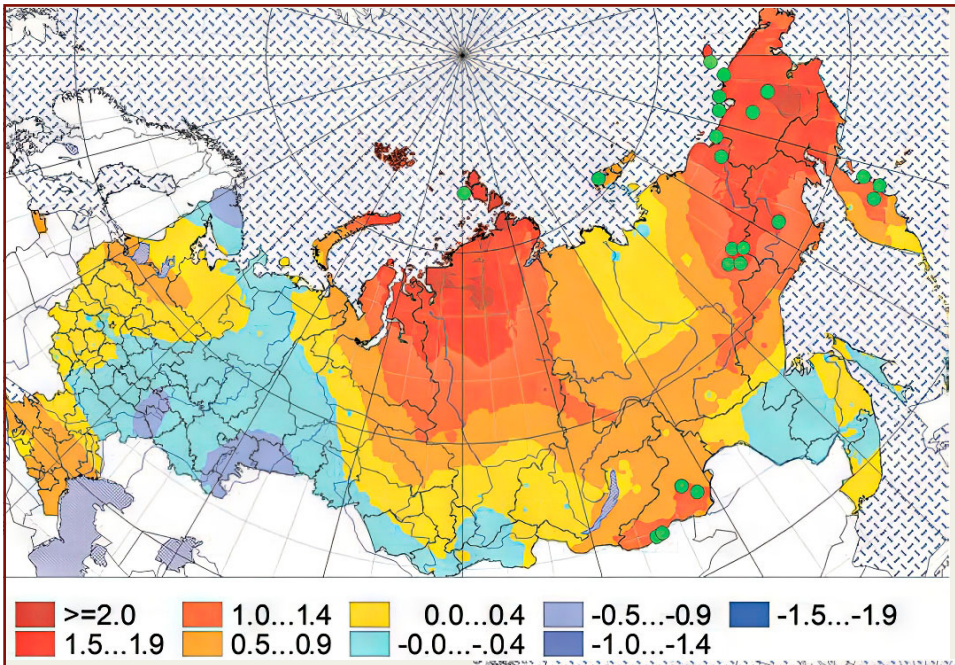
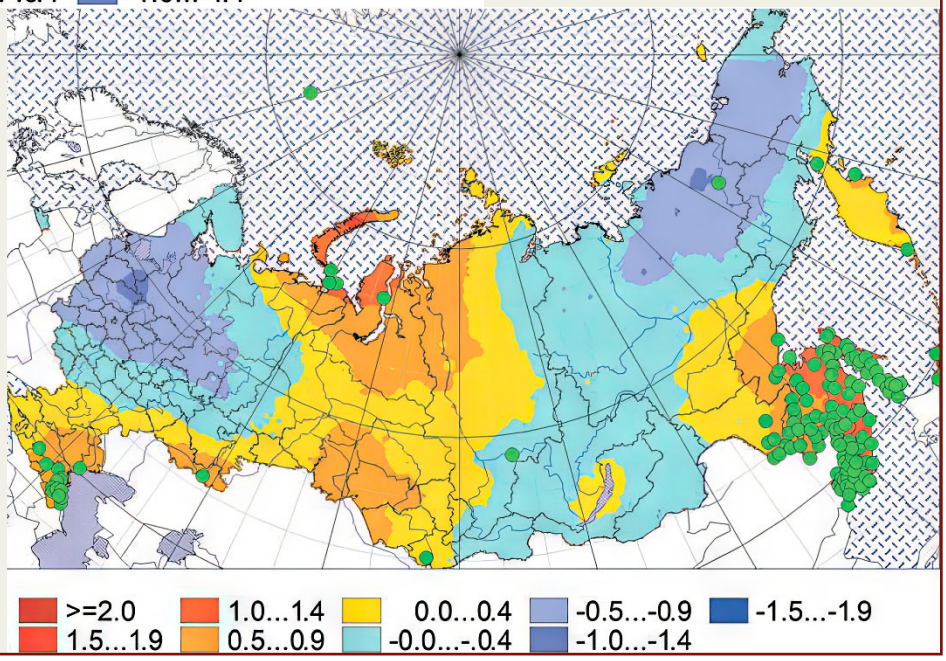


Image 28 Coefficients de tendance linéaire (°C/10 ans) des moyennes mensuelles de températures de l'air en 2001–2022 (dans les limites des frontières de la Russie en février 2022) — janvier.

Source : Sherstyukov, B. G. (2023). Global warming and its possible causes. Journal of Hydrometeorology and Ecology, 70, 7-37. https://doi.org/10.33933/2713-3001-2023-70-7-37

Image 29
Coefficients de tendance linéaire (°C/10 ans) des moyennes mensuelles de températures de l'air à Moscou de 2001 à 2022 (dans les limites des frontières de la Russie en février 2022) — juillet.

Source : Sherstyukov B. G. Global warming and its possible causes. Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology. 2023;(70):7—37. (In Russ.). https://doi.org/10.33933/2713-3001-2023-70-7-37



[33] Sherstyukov, B. G. (2023). Global warming and its possible causes. Journal of Hydrometeorology and Ecology, 70, 7-37. https://doi.org/10.33933/2713-3001-2023-70-7-37

L'augmentation du nombre d'impacts de foudre

La communauté scientifique s'inquiète de plus en plus de l'augmentation du nombre d'orages et d'impacts de foudre dans l'Arctique. Le nombre d'impacts de foudre au nord de la latitude 65° N a triplé entre 2010 et 2020[34] (Image 30). Il est à noter que la majorité de ces impacts sont concentrées dans le nord de la Sibérie, tandis qu'elles sont presque inexistantes dans le nord du Canada et du Groenland (Images 31, 32).

L'activité orageuse progresse vers le pôle Nord. En août 2019, plusieurs impacts de foudre ont été signalées à seulement quelques centaines de kilomètres du pôle.[35] La plupart des événements de impacts de foudre dans l'Arctique supérieur (au nord de 80° N) se produisent lors de quelques jours d'intenses orages chaque été. Cependant, ces tempêtes représentent un nouveau phénomène pour la région, car les orages y étaient rares les années précédentes.

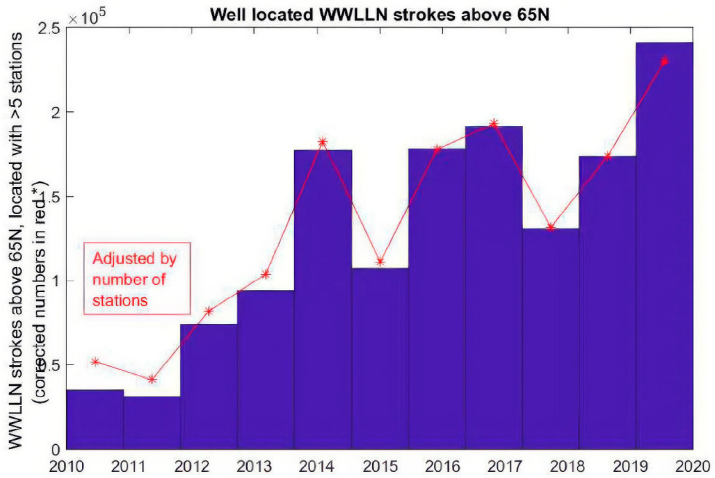


Image 30
Positions correctement identifiées des impacts de foudre par le WWLLN au-dessus du 65°N (bleu); le graphique rouge montre l'ajustement basé sur le nombre total de stations du WWLLN. WWLLN - Réseau mondial de localisation des impacts de foudre (World Wide Lightning Location Network).

Source : Holzworth, R. H., Brundell, J. B., McCarthy, M. P., Jacobson, A. R., Rodger, C. J., & Anderson, T. S. (2021). Lightning in the Arctic. Geophysical Research Letters, 48, e2020GL091366. https://doi.org/10.1029/2020GL091366

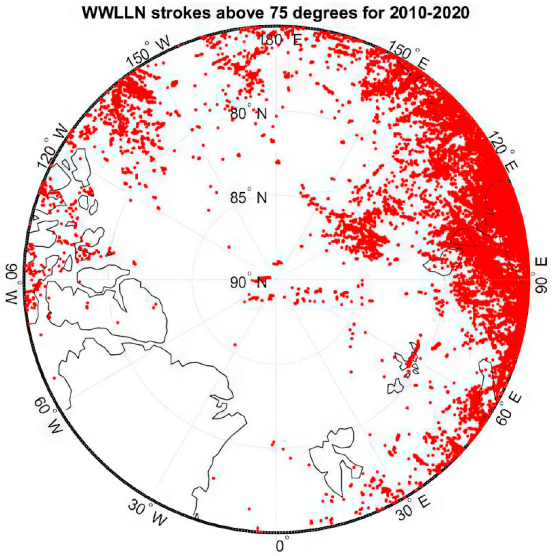


Image 31
Distribution mondiale des impacts de foudre selon le WWLLN en juin, juillet et août entre 2010 et 2020 au-dessus de 75°N. WWLLN, World Wide Lightning Location Network.

Source : Holzworth, R. H., Brundell, J. B., McCarthy, M. P., Jacobson, A. R., Rodger, C. J., & Anderson, T. S. (2021). Lightning in the Arctic. Geophysical Research Letters, 48, e2020GL091366. https://doi.org/10.1029/2020GL091366

[34] Holzworth, R. H., Brundell, J. B.,McCarthy, M. P., Jacobson, A. R.,Rodger, C. J., & Anderson, T. S. (2021).Lightning in the Arctic. GeophysicalResearch Letters, 48, e2020GL091366. https://doi.org/10.1029/2020GL091366

[35] Samenow, J. (2019, August 12). Lightning struck near the North Pole 48 times on Saturday, as rapid Arctic warming continues. The Washington Post. https://www.washingtonpost.com/weather/2019/08/12/lightning-struck-within-miles-north-pole-saturday-rapid-arctic-warming-continues/

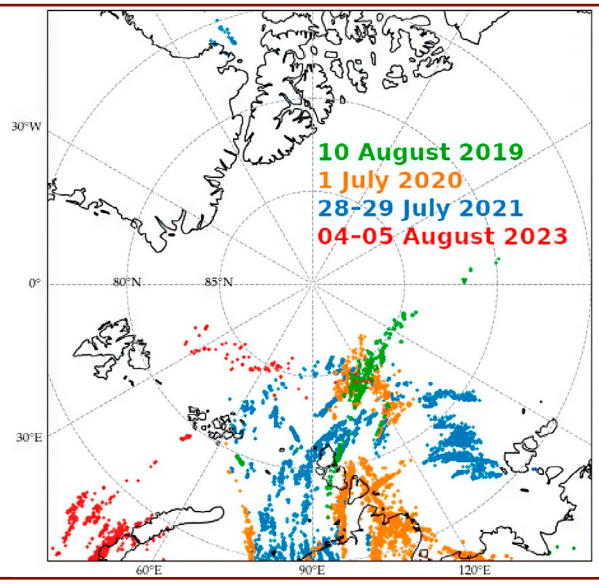


Image 32
Localisation des éclairs détectés par le WWLLN lors des orages de 2019 à 2023. Vert—2019, orange—2020, bleu—2021, rouge—2023.

Source : Popykina, A., Ilin, N., Shatalina, M., Price, C., Sarafanov, F., Terentev, A., & Kurkin, A. (2024). Thunderstorms near the North Pole. Atmosphere, 15(3), 310. https://doi.org/10.3390/atmos15030310

La localisation persistante de ces tempêtes ces dernières années est attribuée à la chaleur estivale extrême observée dans le nord de la Sibérie, avec des températures atteignant jusqu'à 35°C pendant les mois d'été. En outre, une hypothèse a été émise que l'augmentation générale de l'ionisation atmosphérique dans cette région, due à l'intrusion du panache magmatique, est également un facteur important contribuant à l'augmentation du nombre d'impacts de foudre. Ce processus implique la conversion de l'énergie thermique en énergie électrique via l'effet Yutkin, qui se produit lors des interactions explosives dans le manteau profond lorsque des flux de magma de températures différentes entrent en contact. De grandes quantités d'énergie sont ainsi libérées de l'intérieur de la Terre, ce qui entraîne une augmentation de la charge statique en surface, des modifications du potentiel de surface, une ionisation accrue de l'atmosphère et, par conséquent, une augmentation du nombre d'impacts de foudre.

Par ailleurs, d'importants volumes de gaz sont libérés par les fractures de la croûte terrestre. Ce processus peut influencer la formation des nuages et les conditions météorologiques locales. L'intrusion de magma est un facteur clé du réchauffement de la surface, de l'augmentation de l'humidité atmosphérique et du développement d'anomalies thermiques, qui contribuent tous à la formation de nuages orageux et d'éclairs.

Étant donné que la formation des orages et de la foudre nécessite une combinaison d'air froid, d'air chaud et d'instabilité convective, l'emplacement du panache mantellique sibérien offre des conditions optimales pour leur développement.

L'appauvrissement de la couche d'ozone

L'activité magmatique à l'intérieur de la Terre s'accompagne d'une libération de quantités significatives de gaz volcaniques, y compris d'hydrogène, de méthane et de dioxyde de carbone. Selon les recherches de V. L. Syvorotkin,[36] l'émission d'hydrogène contribue à la dégradation de la couche d'ozone. Étant donné que l'ascension du magma se produit sous forme de pulsations, le dégazage et la destruction subséquente de la couche d'ozone se manifesteront également de manière sporadique, c'est-à-dire sous forme d'événements occasionnels.

Des anomalies de la couche d'ozone ont été observées au-dessus du nord de la Sibérie depuis 1997–1998, coïncidant avec le déplacement du noyau terrestre vers la péninsule de Taïmyr. Des épisodes de déplétion de la couche d'ozone ont été enregistrés en 2011, 2016 et 2020[37] avec la déplétion la plus sévère de l'ozone survenue en 2016.[38] Fin janvier 2016, pour la première fois depuis le début des observations en 1973, une anomalie d'ozone a été détectée au-dessus des monts Oural septentrionaux et de la Sibérie, avec une teneur totale en ozone de 190 à 200 DU (Unités de Dobson), soit 40 à 45 % inférieur aux valeurs moyennes pluranuelles. Cette anomalie pouvant persister jusqu'à une semaine (Image 33).

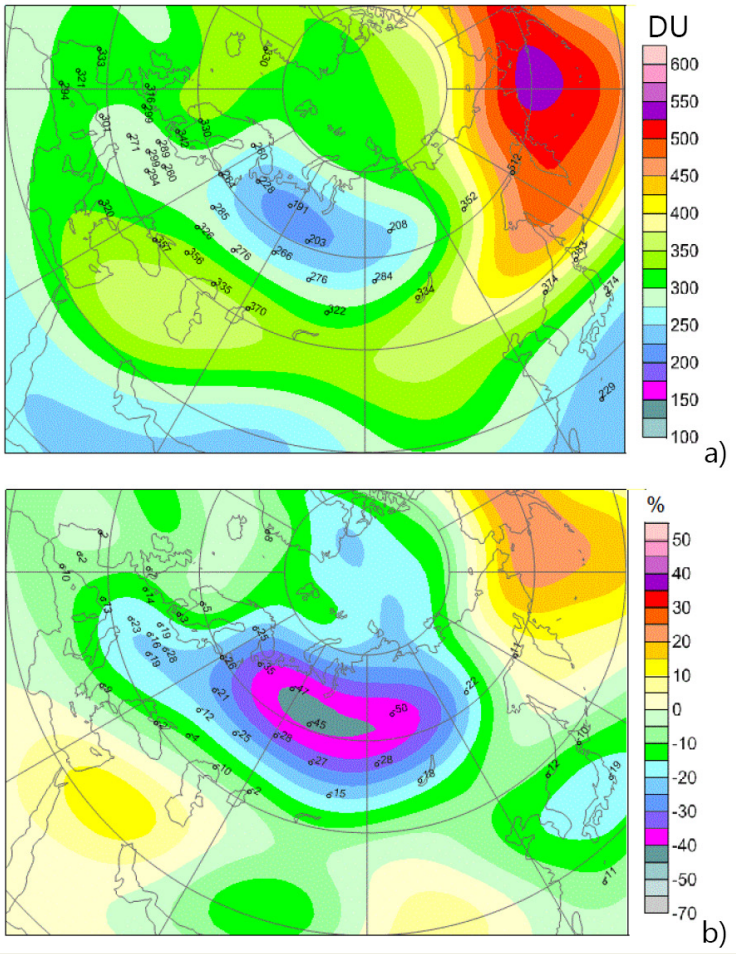


Image 33
Teneur totale en ozone (a) et ses écarts par rapport à la norme (b) le 28 janvier 2016, selon les données satellites du WOUDC [http://woudc.org/]. Les chiffres sur la carte représentent les mesures de l'ozone total effectuées par des stations de surveillance au sol.

Source : Nikiforova, M. P., Vargin, P. N., Zvyagintsev, A. M., Ivanova, N. S., Kuznetsova, I. N., & Luk'yanov, A. N. (2016). Ozone mini-hole over the Northern Urals and Siberia. Proceedings of the Hydrometeorological Research Center of the Russian Federation, 360, 168–180. In Proc. of the Hydrometeorological Conf., February 9–10, Vol. 4, 91–96. Voronezh: Nauchno-Issledovatel-skie Publikatsii.

[36]Syvorotkin, V. L. DEEP DEGASSING IN POLAR REGIONS OF THE PLANET AND CLIMATE CHANGE. APOG (2018) doi:10.29222/ipng.2078-5712.2018-23.art48
[37]Xia, Y. et al. Significant Contribution of Severe Ozone Loss to the Siberian Arctic Surface Warming in Spring 2020. Geophysical Research Letters 48, e2021GL092509 (2021). https://doi.org/10.1029/2021GL092509
[38]Nikiforova, M.P. Extremely low total ozone values over the northern Ural and Siberia in the end of January 2016. AOO (2017) doi:10.15372/AOO20170102

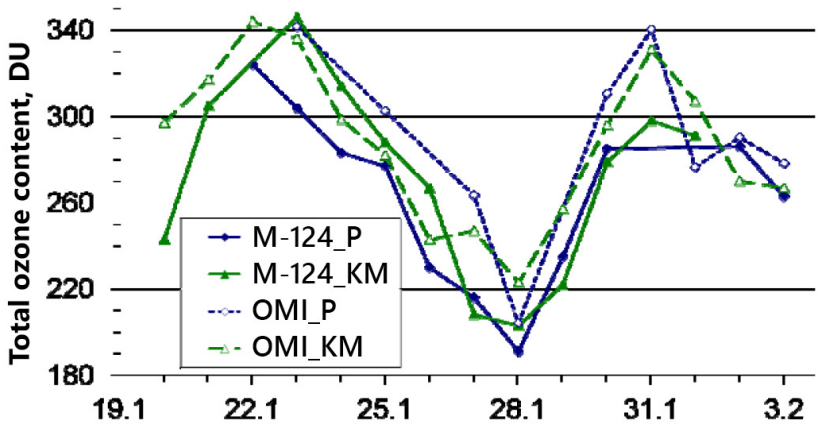


Image 34
Teneur totale en ozone mesurée à l'aide de l'ozonomètre au sol M-124 et de l'instrument OMI sur le satellite Aura (USA) aux stations de Pechora (P) et de Khanty-Mansiysk (KM) du 20 janvier au 3 février 2016.

Source : Nikiforova, M. P., Vargin, P. N., Zvyagintsev, A. M., Ivanova, N. S., Kuznetsova, I. N., & Luk'yanov, A. N. (2016). Ozone mini-hole over the Northern Urals and Siberia. Proceedings of the Hydrometeorological Research Center of the Russian Federation, 360, 168–180. In Proc. of the Hydrometeorological Conf., February 9–10, Vol. 4, 91–96. Voronezh: Nauchno-Issledovatelskie Publikatsii.

Il est important de noter que les variations de la teneur totale en ozone lors des cycles saisonniers à long terme dans les latitudes extratropicales de l'hémisphère Nord, atteignent généralement leur minimum en septembre et leur maximum en mars-avril. Cependant, en 2016, la dégradation de l'ozone est survenue de manière inhabituellement précoce, en janvier, atteignant les niveaux les plus bas jamais enregistrés dans l'histoire des observations instrumentales.

Ainsi, l'appauvrissement de la couche d'ozone dans la région sibérienne peut servir d'indicateur supplémentaire des émissions de gaz à travers les fractures de la croûte, résultant du mouvement ascendant du panache magmatique vers la surface.

La structure, les dimensions possibles et la localisation du panache magmatique sur la base des données publiées et des observations

La structure du panache peut être grossièrement visualisée comme un champignon. Il possède une queue (un pied) qui transporte vers le haut la matière chauffée depuis la limite entre le noyau et le manteau. La partie supérieure d'un panache, qui se dilate au fur et à mesure qu'il s'élève, forme la tête du panache. Lorsqu'un panache atteint la base de la lithosphère, il rencontre une couche réfractaire de roches solidifiées, ce qui fait que la tête s'étale horizontalement sous la lithosphère, comme le chapeau d'un champignon (Image 35).

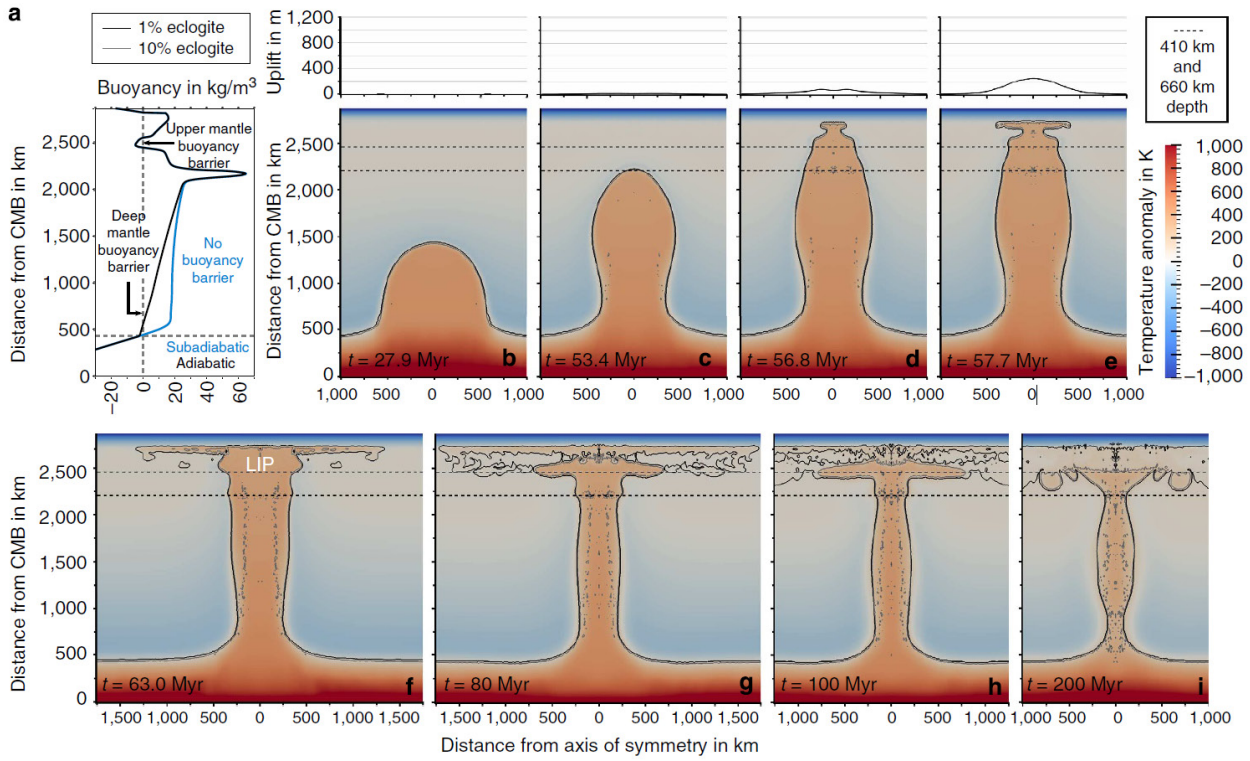


Image 35

Cette illustration représente le modèle d'évolution d'un panache magmatique, similaire à celui qui a formé les Trapps de Sibérie il y a 250 millions d'années.

Le graphique de gauche (a) montre l'ascension du magma à travers les différentes couches du manteau terrestre. La partie principale de l'image (b-i) est une sorte de «frise chronologique» illustrant les étapes de développement du panache. Dans un premier temps, une colonne de magma chaud se forme et s'élève depuis la base du manteau. Progressivement, cette colonne atteint les couches supérieures du manteau, où elle s'élargit et prend la forme d'un «chapeau de champignon». Avec le temps, le panache s'amincit et commence à se fragmenter en plusieurs parties. Les couleurs du schéma représentent les températures : les zones rouges et orangées sont les plus chaudes, tandis que les zones bleues sont plus froides.

Source : Dannberg, J., & Sobolev, S. (2015). Low-buoyancy thermochemical plumes resolve controversy of classical mantle plume concept. Nature Communications, 6, 6960. https://doi.org/10.1038/ncomms7960

Selon les données de recherche, lorsque le panache s'approche de la lithosphère, son rayon double au fur et à mesure qu'il progresse, et sa vitesse d'ascension diminue considérablement[39]. La matière chaude ascendante de la queue du panache exerce une pression et transperce en brûlant la lithosphère, formant ainsi des fissures. Dans les zones fragiles, des panaches secondaires se forment alors - des chambres magmatiques supérieures à l'intérieur de la croûte terrestre. De telles chambres existent, par exemple, sous Yellowstone, Campi Flegrei et d'autres supervolcans. C'est dans ces chambres que peuvent se produire des ruptures de la croûte et des éruptions massives de magma.

Il est important de noter que, selon les modèles existants, la remontée d'un panache vers la surface peut prendre des dizaines de millions d'années. Cependant, ces calculs sont basés sur des hypothèses théoriques, alors que les observations pratiques de l'escalade continue des processus géodynamiques suggèrent le contraire. Les observations en Sibérie indiquent que l'ascension du panache pourrait se produire en quelques décennies.

D'après les données littéraires,[40] un superpanache magmatique similaire, qui a provoqué de nombreuses éruptions basaltiques en Eurasie (en Sibérie) à la limite du Permien-Trias (il y a 250 millions d'années), avait les dimensions suivantes : 4000 km d'ouest en est et 3000 km du nord au sud. On suppose que la tête du panache avait un diamètre de 1000 à 2000 km.

Il est bien établi que la plaque de la Sibérie occidentale est plus jeune et plus mince, avec une épaisseur de 35 à 40 km. A l'inverse, la plaque de la Sibérie orientale, plus ancienne et plus épaisse (40 à 45 km), est également plus froide. Cette dernière est souvent appelée le craton sibérien. Selon les données de tomographie sismique[41], les scientifiques supposent que de petits foyers magmatiques sont actuellement observés sous la plate-forme est-sibérienne. Ces foyers se propagent latéralement sous le craton sibérien (Image 36), en raison de la nature plus froide de la plaque.

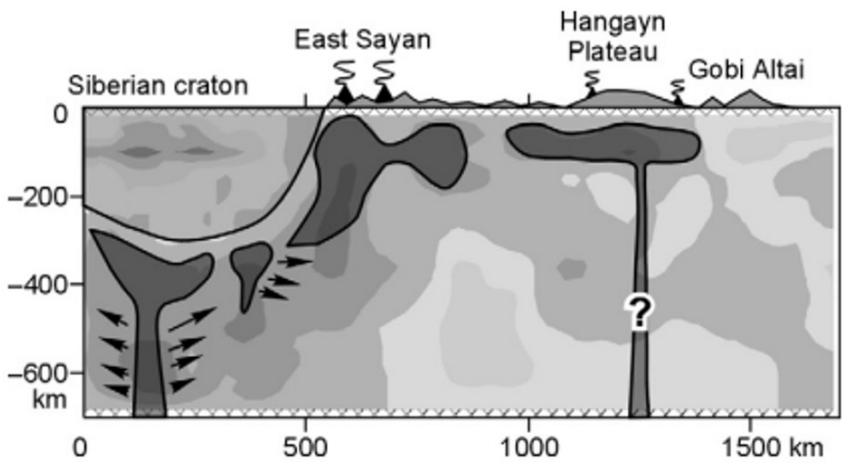


Image 36
Schéma illustrant l'écoulement de petits foyers magmatiques autour du craton sibérien (indiqués par des flèches sur la gauche).

Source : Koulakov, I. Y. (2008). Upper mantle structure beneath Southern Siberia and Mongolia from regional seismic tomography. Russian Geology and Geophysics, 49(3), 187-196. https://doi.org/10.1016/j.rgg.2007.06.012

[39] Ernst, R. E., & Buchan, K. L. (2002). Maximum size and distribution in time and space of mantle plumes: evidence from large igneous provinces. Journal of Geodynamics, 34, 309-342.
[40] Lvova, E. V. (2010). Tectonics of mantle plumes: Evolution of basic concepts. Moscow University Geology Bulletin, 5, 21-29.
[41] Koulakov, I. Y. (2008). Upper mantle structure beneath Southern Siberia and Mongolia from regional seismic tomography. Russian Geology and Geophysics, 49(3), 187-196. https://doi.org/10.1016/j.rgg.2007.06.012

Selon l'hypothèse, le panache sibérien actuel se propage sous la base de la plaque sibérienne orientale et partiellement sous la plaque sibérienne occidentale. Cette propagation se produirait à des profondeurs de 50 à 60 km, la « queue » du panache étant plus clairement observée à des profondeurs d'environ 100 km. Des intrusions secondaires du panache se produiraient probablement déjà à des profondeurs d'environ 40 km.

Certains modèles sismotomographiques révèlent des anomalies de faible vitesse[42] (indicatives d'un environnement plus fondu) à des profondeurs de 110 à 150 km, ce qui correspond à une région de manteau liquide sous les zones situées au sud des péninsules de Gyda et de Taïmyr (Image 37).

Ces anomalies, telles qu'elles apparaissent sur les cartes de vitesse d'une étude d'août 2024, sont supposées correspondre à deux entrées de matière magmatique, appelées « queues » du panache (Image 38). Si ce modèle est exact, le diamètre de chaque queue de panache s'élevant sous le craton de Sibérie orientale est d'environ 600 à 700 km.

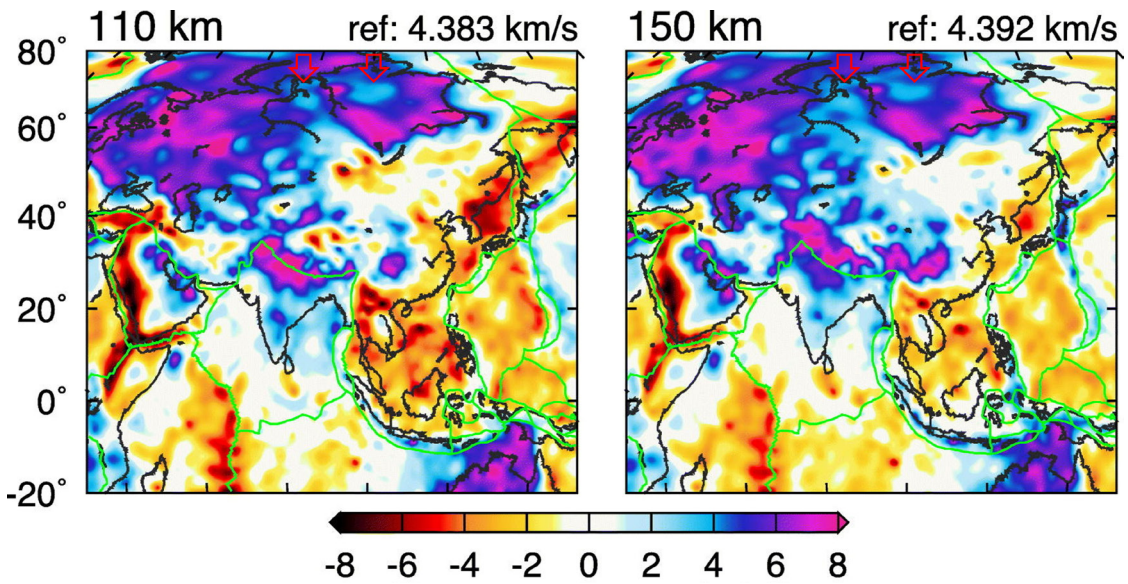


Image 37
La carte indique en violet les zones où la vitesse des ondes acoustiques est élevée (correspondant à des roches rigides) et en bleu celles où la vitesse est plus faible (milieu plus fluide et partiellement fondu). Les anomalies de vitesses sismiques réduites, correspondant aux régions du manteau plus liquide, sont marquées par deux flèches rouges.

Source : Dou, H., Xu, Y., Lebedev, S., Chagas de Melo, B., van der Hilst, R. D., Wang, B., & Wang, W. (2024). The upper mantle beneath Asia from seismic tomography, with inferences for the mechanisms of tectonics, seismicity, and magmatism. Earth-Science Reviews, 255, 104841. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2024.104841

[42] Dou, H., Xu, Y., Lebedev, S., Chagas de Melo, B., van der Hilst, R. D., Wang, B., & Wang, W. (2024). The upper mantle beneath Asia from seismic tomography, with inferences for the mechanisms of tectonics, seismicity, and magmatism. Earth-Science Reviews, 247, 104595. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2023.104595

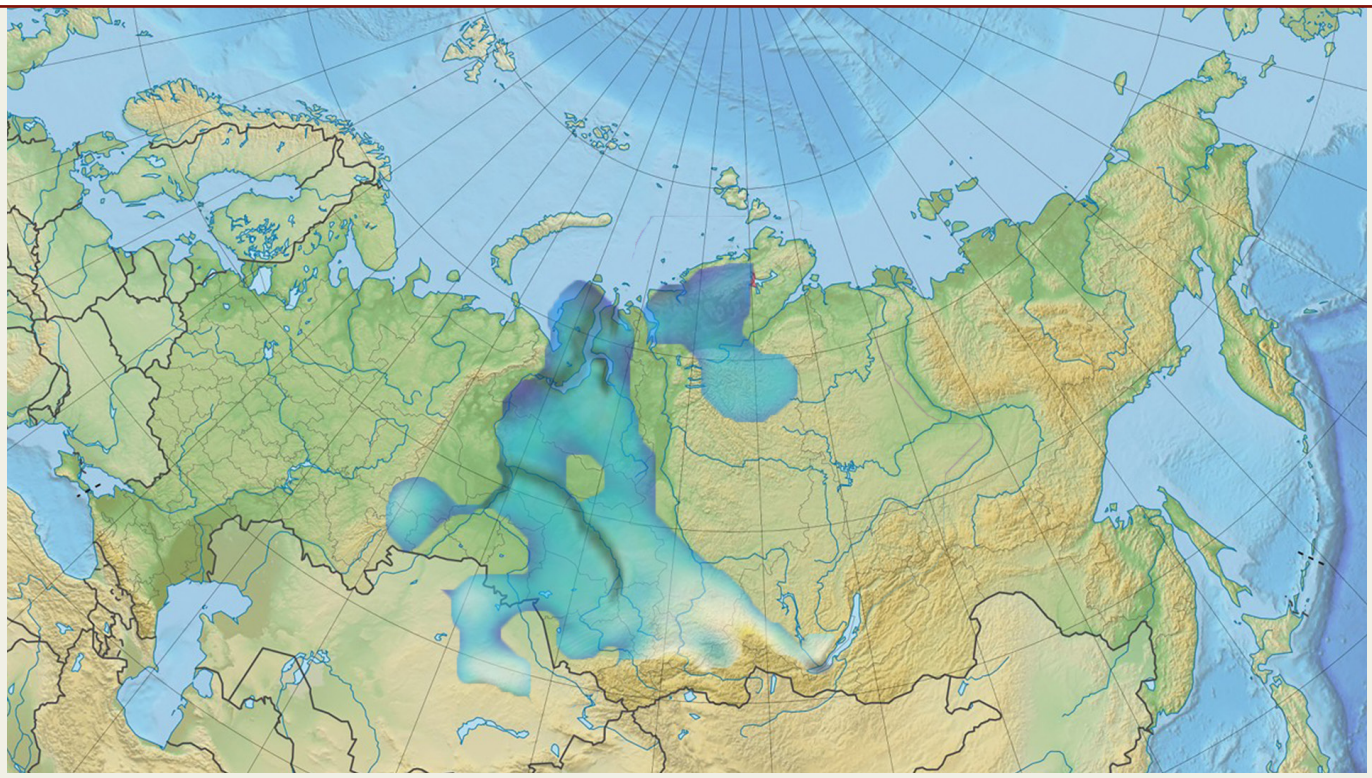


Image 38.
Carte physique de la Russie montrant et adaptant les ondes sismiques à faible vitesse, sur la base des données de Dou et al., 2024.

Cependant, il est important de noter que l'analyse sismotomographique présentée dans l'étude de Dou et al. (2024) pour la Sibérie s'est appuyée sur les données de moins de 10 capteurs sismiques (Image 39), tous positionnés le long des limites des plaques, avec pratiquement aucune couverture en Sibérie occidentale et orientale.

L'analyse a utilisé les données de tous les enregistrements de séismes à large gamme accessibles au public de 1994 au 4 septembre 2023.

À titre de comparaison, les triangles rouges sur la carte indiquent les capteurs utilisés dans l'analyse pour l'Asie, qui se comptent par milliers.

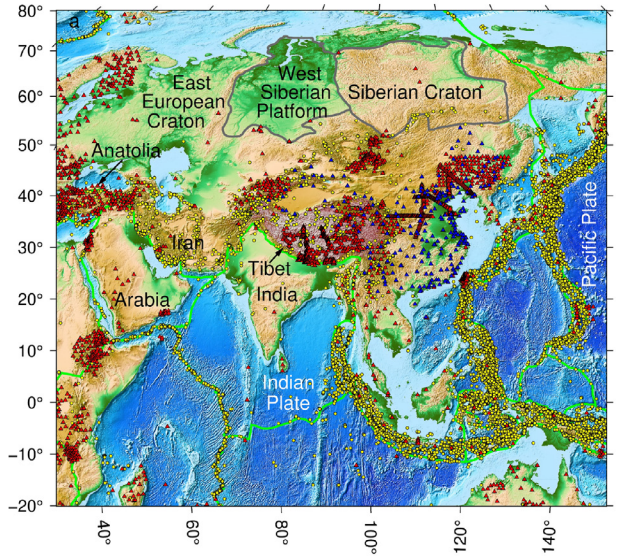


Image 39
Localisation des capteurs (triangles rouges) utilisés dans l'analyse de tomographie sismique.

Source : Dou, H., Xu, Y., Lebedev, S., Chagas de Melo, B., van der Hilst, R. D., Wang, B., & Wang, W. (2024). The upper mantle beneath Asia from seismic tomography, with inferences for the mechanisms of tectonics, seismicity, and magmatism. Earth-Science Reviews, 247, 104595. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2023.104595

Une autre étude, menée par des chercheurs chinois en 2023, confirme que la croûte terrestre sous la Sibérie est en train de fondre et de s'amincir sous l'effet du magma[43] (Image 40). Ce processus est en progression et entraîne une réduction de la résistance de la plaque lithosphérique. Dans cette étude, les auteurs présentent un modèle de conductivité électrique du manteau pour l'Asie du Nord, construit à partir de données géomagnétiques. Ce modèle met en évidence une importante anomalie de haute conductivité électrique, qui était située dans la zone de transition du manteau sous les Trapps de Sibérie à l'époque de leur éruption. Les scientifiques ont interprété cette anomalie comme une irrégularité thermique avec des traces de fonte en lien avec l'anomalie permienne existant dans la région (Image 41).

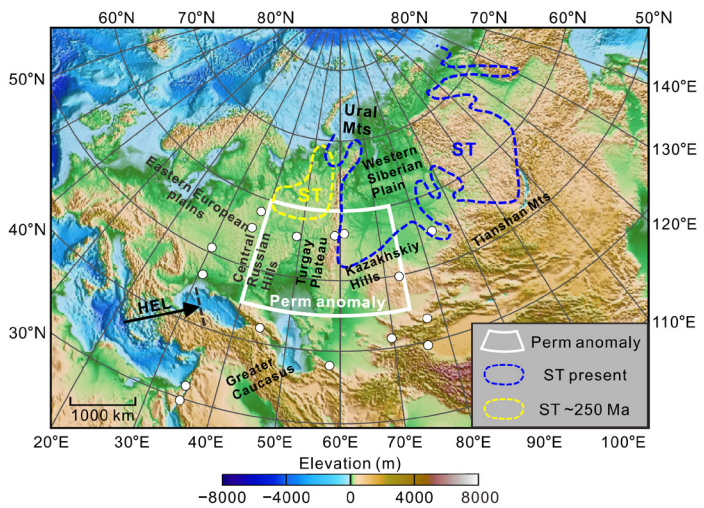
Dans l'ensemble, les modèles sismotomographiques étudiant des profondeurs de 40 à 110 km dans le craton de Sibérie orientale donnent des résultats divergents. Il existe un manque évident de données sismologiques pour la Sibérie, ce qui limite la précision de ces modèles.

Les modèles tomographiques modernes sont basés sur des données sismiques collectées sur une longue période, environ 30 ans. Du point de vue des concepts classiques de l'évolution des panaches mantelliques, qui s'étendent sur des millions d'années, une période de 30 ans est considérée comme extrêmement courte. Cependant, les données existantes indiquent que des changements structurels importants se sont produits dans le panache sibérien au cours de cette période.

Ces observations mettent en évidence la nécessité de réviser les connaissances actuelles sur les taux de développement des panaches mantelliques et les méthodologies utilisées pour les étudier.

Image 40
Les points blancs indiquent les stations dont les C-réponses ont été utilisées dans cette étude. La zone d'anomalie permienne est représentée par une zone délimitée par des lignes blanches. L'emplacement actuel des Trapps de Sibérie est marqué en bleu, tandis que les positions précédentes sont marquées en jaune, avec des lignes pointillées.

Source : Li, S., Li, Y., Zhang, Y., Zhou, Z., Guo, J., & Weng, A. (2023). Remnant of the late Permian superplume that generated the Siberian Traps inferred from geomagnetic data. Nature Communications, 14, 1311. https://doi.org/10.1038/s41467-023-37053-3



[43] Li, S., Li, Y., Zhang, Y., Zhou, Z., Guo, J., & Weng, A. (2023). Remnant of the late Permian superplume that generated the Siberian Traps inferred from geomagnetic data. Nature Communications, 14, 1311. https://doi.org/10.1038/s41467-023-37053-3

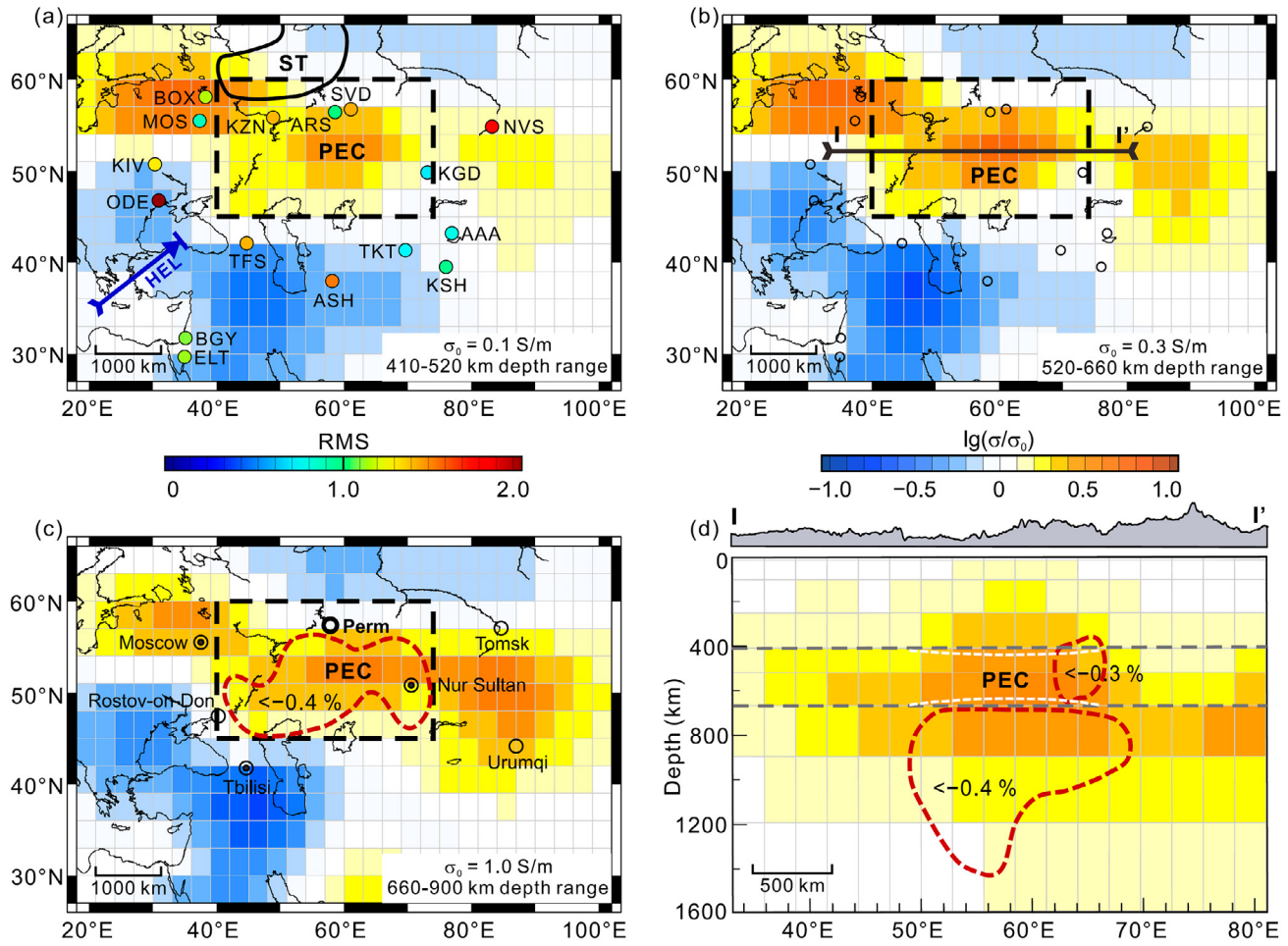


Image 41

Les scientifiques de l'Université de Jilin (Jilin University) et de l'Université Shijiazhuang Tiedao (Shijiazhuang Tiedao University) ont utilisé des données du champ géomagnétique (geomagnetic field data) provenant de 16 stations d'Asie du Nord pour calculer la conductivité électrique du manteau à différentes profondeurs. Ils ont découvert une augmentation notable de la conductivité par rapport à la moyenne mondiale dans la région située sous les Trapps de Sibérie (zones jaune-brun sur les illustrations). Les chercheurs ont établi que ces zones, situées à des profondeurs comprises entre 400 et 900 km, sont en moyenne 250 degrés plus chaudes que le manteau environnant. Une fraction de manteau fondu est présente dans ces régions.

Source : Li, S., Li, Y., Zhang, Y., Zhou, Z., Guo, J., & Weng, A. (2023). Remnant of the late Permian superplume that generated the Siberian Traps inferred from geomagnetic data. Nature Communications, 14, 1311. https://doi.org/10.1038/s41467-023-37053-3

Il est intéressant de noter que des éruptions antérieures, il y a 250 millions d'années, à la limite des périodes Permien-Trias, se sont également produites dans cette région. L'épicentre était situé sous le craton de Sibérie orientale (sous le plateau de Putorana), avec des effusions s'étendant à la fois en Sibérie occidentale et orientale. (Image 42).

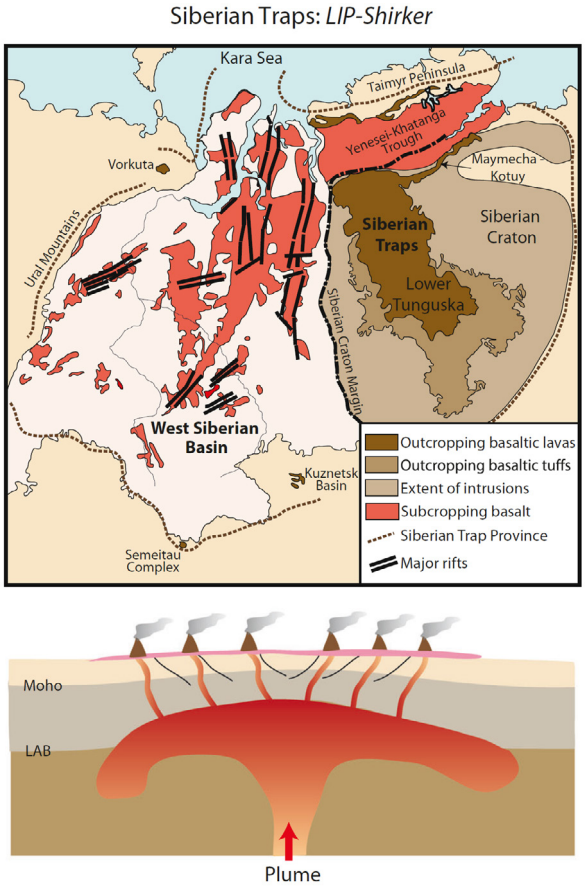


Image 42
Les Trapps de Sibérie comme exemple de grande province magmatique.
La carte montre les éruptions en Sibérie occidentale (en rouge) et les Trapps de Sibérie orientale (en brun), qui se sont produites il y a 250 millions d'années. La matière chaude du panache mantellique s'élève et s'étale sous la limite entre la lithosphère et l'asthénosphère, formant une structure en forme de champignon. Cela a conduit à une activité magmatique à grande échelle sur une superficie d'environ 5 millions de km^2. Sous l'effet du panache, le système de rift de la Sibérie occidentale s'est formé, mais son activité a cessé environ 10 millions d'années plus tard, au milieu du Trias.

Source : Koptev, A., & Cloetingh, S. (2024). Role of Large Igneous Provinces in continental break-up varying from "Shirker" to "Producer." Communications Earth & Environment, 5, 27. https://doi.org/10.1038/s43247-023-01191-9

La localisation du panache magmatique

En synthétisant l'analyse des données sur les anomalies de température du sol, sur la profondeur de dégel du pergélisol, sur les anomalies de température près de la surface et les anomalies d'ondes sismiques à faible vitesse dans le manteau, ainsi que sur les anomalies magnétiques, il est possible d'identifier l'emplacement actuel et les dimensions du panache sibérien (Image 43).

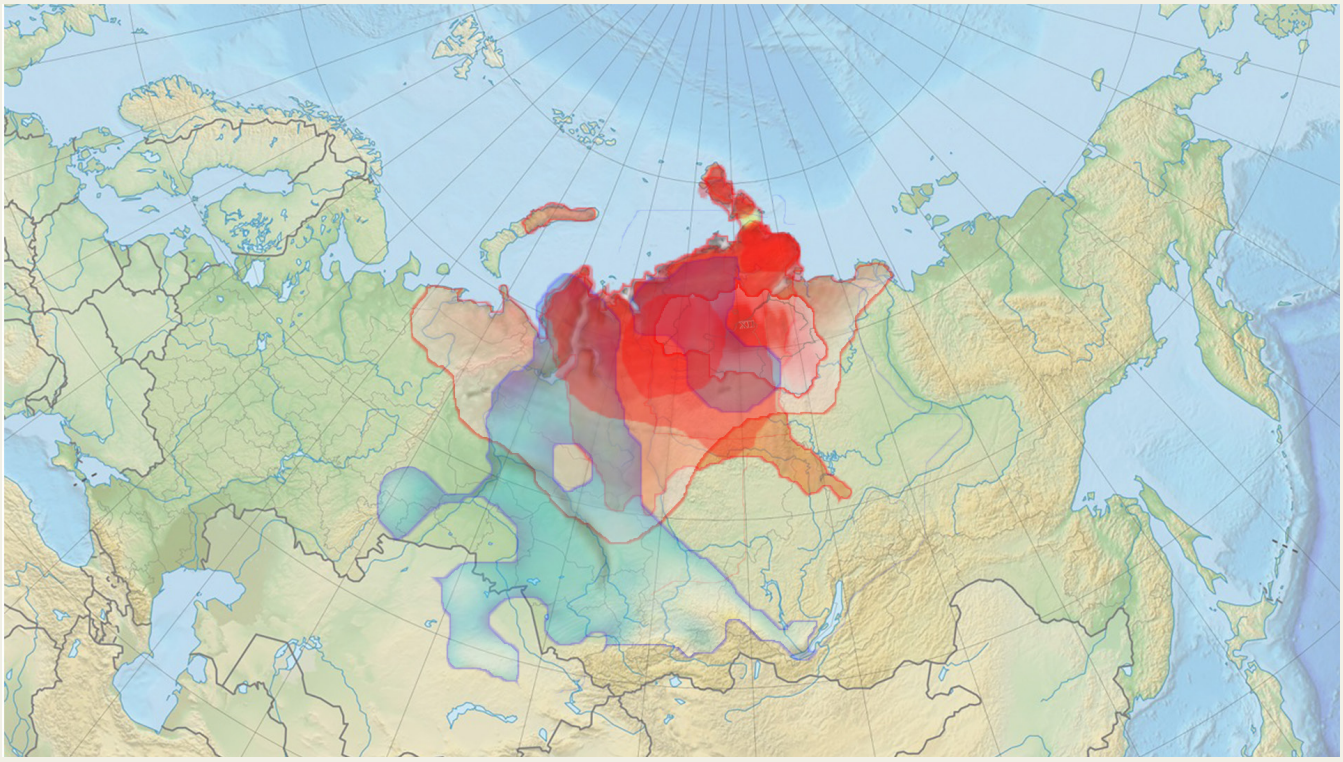
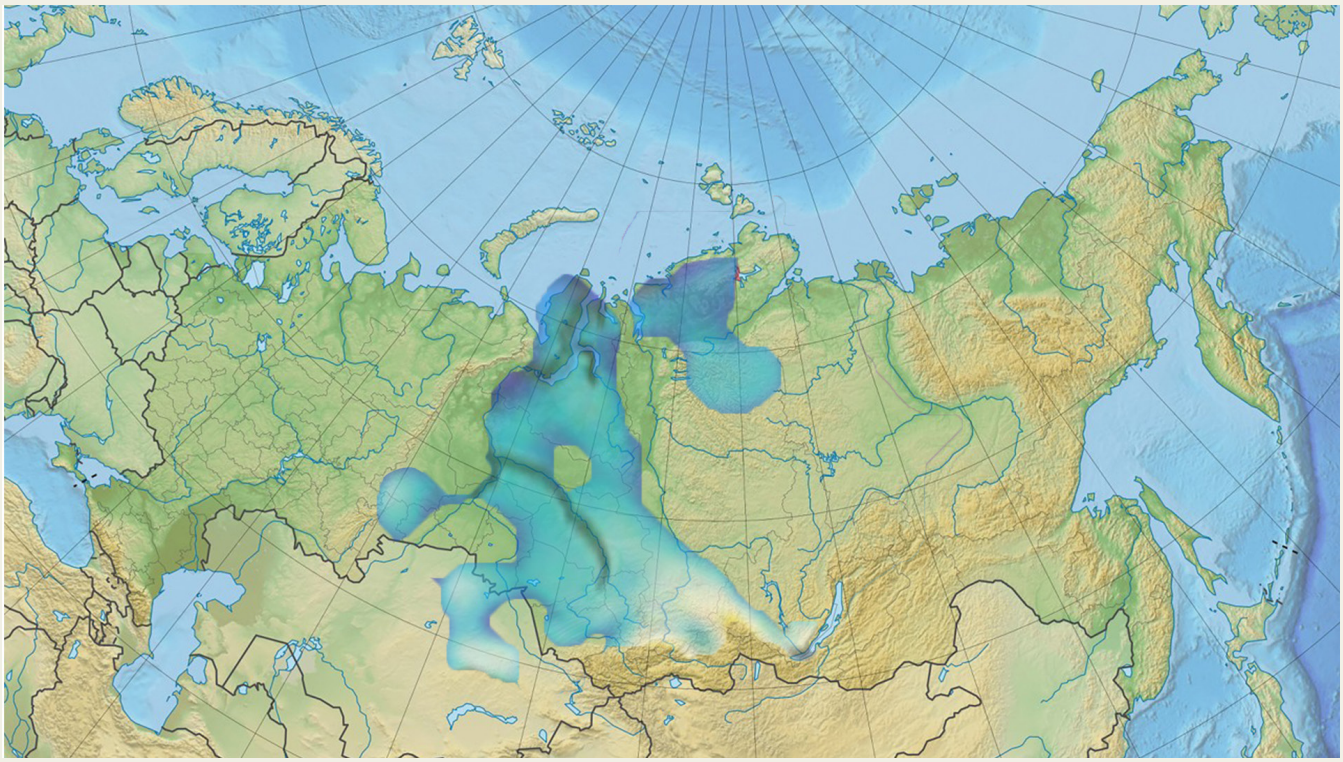


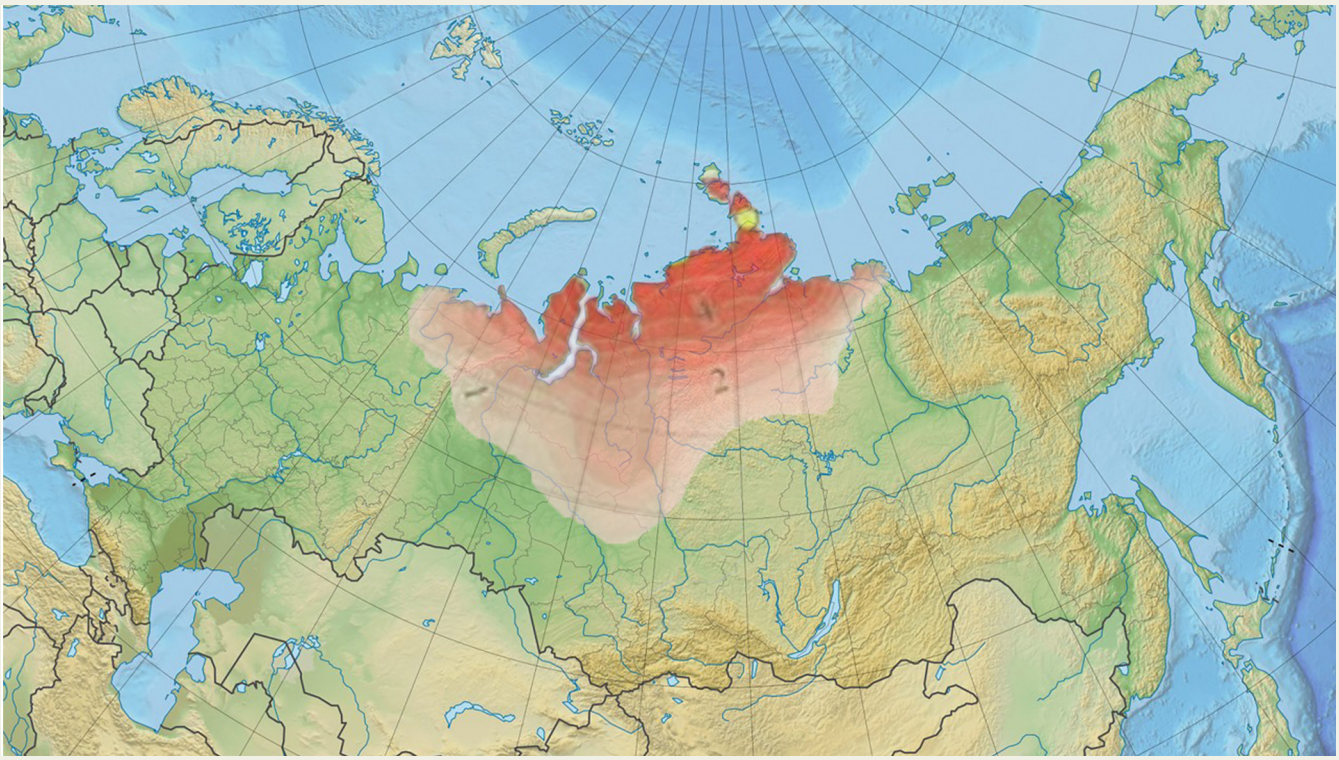
Image 43
A. Carte superposant les principales anomalies selon différents paramètres, détaillés ci-dessous.



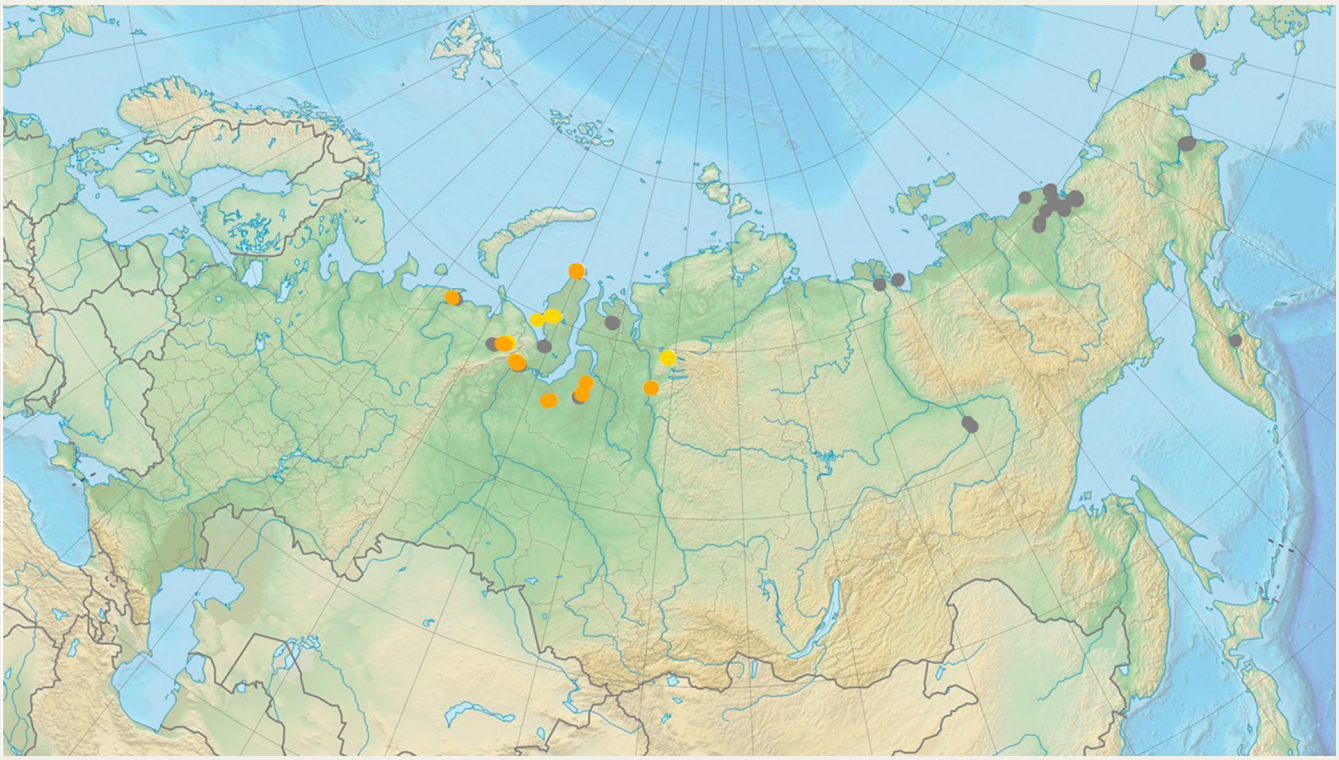
B. Carte des anomalies de vitesses réduites (milieu plus fluide) à une profondeur de 110 km selon l'analyse de tomographie sismique, d'après les données de Li S., Li Y., Zhang Y., Zhou Z., Guo J., & Weng A. (2023).

C. Nouvelle anomalie de réchauffement du sol en comparant les tendances sur les périodes 1976–2021 et 1976–2023, d'après les données de Roshydromet (2021, 2023)

D. Tendance linéaire des températures mensuelles moyennes de l'air pour janvier sur la période 2001–2021, d'après les données de Sherstyukov (2023).



E. Températures moyennes saisonnières de l'air de décembre 2023 à février 2024, d'après les données de Roshydromet (2024).



F. Zones de profondeur croissante du dégel saisonnier dans la couche de pergélisol. Source des données : https://permafrost.su/

Selon cette hypothèse, la section ascendante du panache est située au sud des péninsules de Gyda et de Taïmyr et présente de multiples ramifications. Le diamètre de la tête du panache est estimé entre 1 200 à 1 500 km, tandis que la zone de dispersion du flux magmatique peut atteindre 2 500 à 3 000 km. Cette région englobe les structures de la plaque de la Sibérie occidentale et du craton de la Sibérie orientale.

Actuellement, la tête du panache exerce une influence sur la base du craton de la Sibérie orientale, propageant des flux magmatiques sous son territoire. Ce processus contribue probablement à l'augmentation de l'activité sismique le long des marges de la plaque, y compris dans des régions telles que le lac Baïkal et même l'Oural.

La cause de ces anomalies, spécifiquement dans les parties à la marge des plaques, est la déstabilisation des plaques due au ramollissement de l'asthénosphère sous-jacente et à un léger soulèvement de la partie centrale du bloc sibérien de la croûte terrestre. Ce bloc comprend les structures tectoniques de la plaque de la Sibérie occidentale et du craton de la Sibérie orientale, ainsi que la structure tectonique du système plissé de Verkhoïansk-Tchoukotka.

L'augmentation de l'activité sismique comme indicateur de la déstabilisation des plaques tectoniques

La méthodologie d'analyse de l'activité sismique a consisté à télécharger et à traiter de manière spécifique les données obtenues sur le site Internet du Centre sismologique international (ISC). Les données provenant de différentes sources de différents pays et instituts de recherche, ainsi que de différents types d'amplitudes (Mw, Ms, Mb, ML, MD, etc.), un algorithme de traitement des données a été mis en place pour sélectionner le type d'amplitude approprié à partir de différentes sources (voir annexe 1). Le principe de base de l'algorithme de traitement était de sélectionner la valeur médiane parmi les types de magnitude les plus couramment rapportés pour chaque événement sismique. C'était nécessaire car différentes sources ont fourni des valeurs et des types de magnitude variables à la base de données du CSI. En moyenne, cette méthode de traitement basée sur la médiane entraîne une légère diminution de la magnitude par rapport à la valeur maximale rapportée. Cependant, l'expérience passée a démontré que cette approche s'aligne bien sur la loi de Gutenberg-Richter, suit d'autres modèles sismologiques et est en accord assez étroit avec les données des autres ressources sismiques, telles que l'IRIS et l'USGS.

[44] Federal Research Center, Unified Geophysical Service of the Russian Academy of Sciences http://www.ceme.gsras.ru/zr/contents.html

Les données traitées ont ensuite été filtrées en fonction des types d'événements dans la base de données de l'ISC (voir l'annexe 1) afin d'exclure les événements sismiques causés par des activités humaines, telles que les opérations minières, les explosions, les explosions présumées et les éboulements. Compte tenu de l'importance de l'industrie minière en Russie, la base de données de l'ISC a été recoupée avec les données du Service géophysique unique de l'Académie des sciences de Russie[44] (à la date de janvier 2025). Ce recoupement a permis d'identifier et d'exclure de l'ensemble des données toutes les explosions et tous les éboulements connus liés à l'exploitation minière en Russie. Par conséquent, le jeu de données final ne comprend que des événements sismiques naturels, sans aucune interférence artificielle.

Examinons maintenant les résultats de l'analyse des données dans la région du panache magmatique ascendant et dans les zones périphériques des principaux blocs tectoniques qu'il affecte directement. Le craton sibérien étant considéré comme une plate-forme relativement stable et asismique, même un petit nombre de tremblements de terre à l'intérieur de ses limites serait considéré comme une anomalie.

L'Image 44 illustre la distribution de la densité des tremblements de terre en Russie. Dans la région sibérienne, la plus forte concentration de tremblements de terre est, comme prévu, observée dans les zones plissées, telles que la chaîne de Verkhoyansk à l'est, la crête de Gakkel, les montagnes de l'Oural à l'ouest et la région de l'Altaï-Saïan au sud.

Cependant, des événements sismiques isolés sont également présents en Sibérie elle-même. Plusieurs tremblements de terre d'une magnitude d'environ 4,0 ont été enregistrés au sud de la péninsule de Taïmyr. Examinons de plus près la dynamique des tremblements de terre dans des zones localisées en Sibérie dans la zone du panache sibérien et les régions adjacentes.

Densité des séismes M3+ en Sibérie

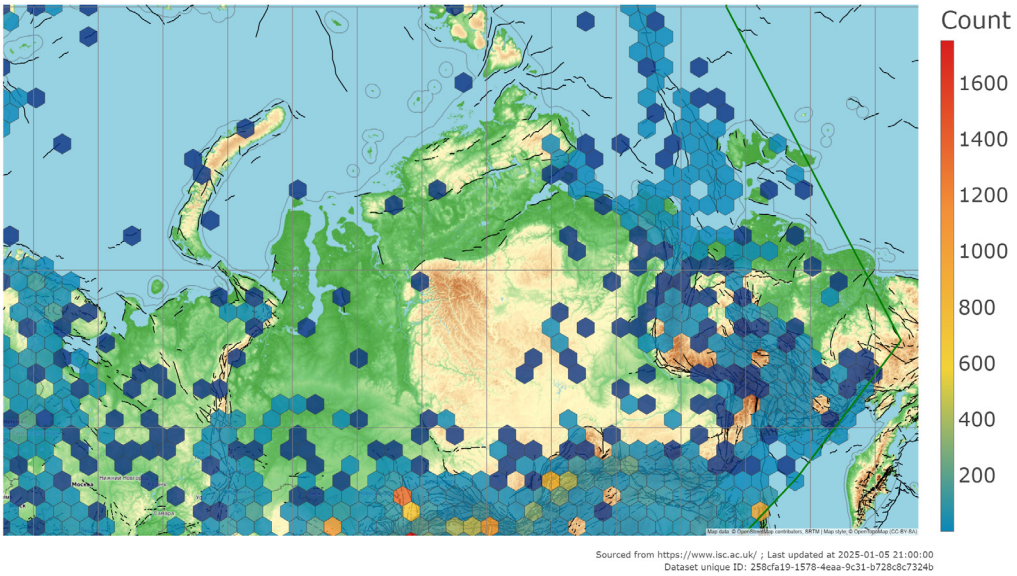


Image 44
Densité des séismes de magnitude supérieure à 3,0 sur le territoire de la Sibérie de 1990 à 2024.

Source : base de données de l'ISC.

Selon les structures géologiques, des zones ont été identifiées où le panache mantellique peut exercer une influence variable (Image 45). Une zone a été sélectionnée directement dans le panache où l'impact pourrait être lié à la pénétration et à la pression du magma ainsi qu'à la phase fluide (gaz magmatiques).

Dans les parties en marge de la plateforme de la Sibérie orientale et de la plaque de la Sibérie occidentale, l'influence du panache sur la sismicité est plus probablement due à la déstabilisation du positionnement des blocs denses de la croûte terrestre.

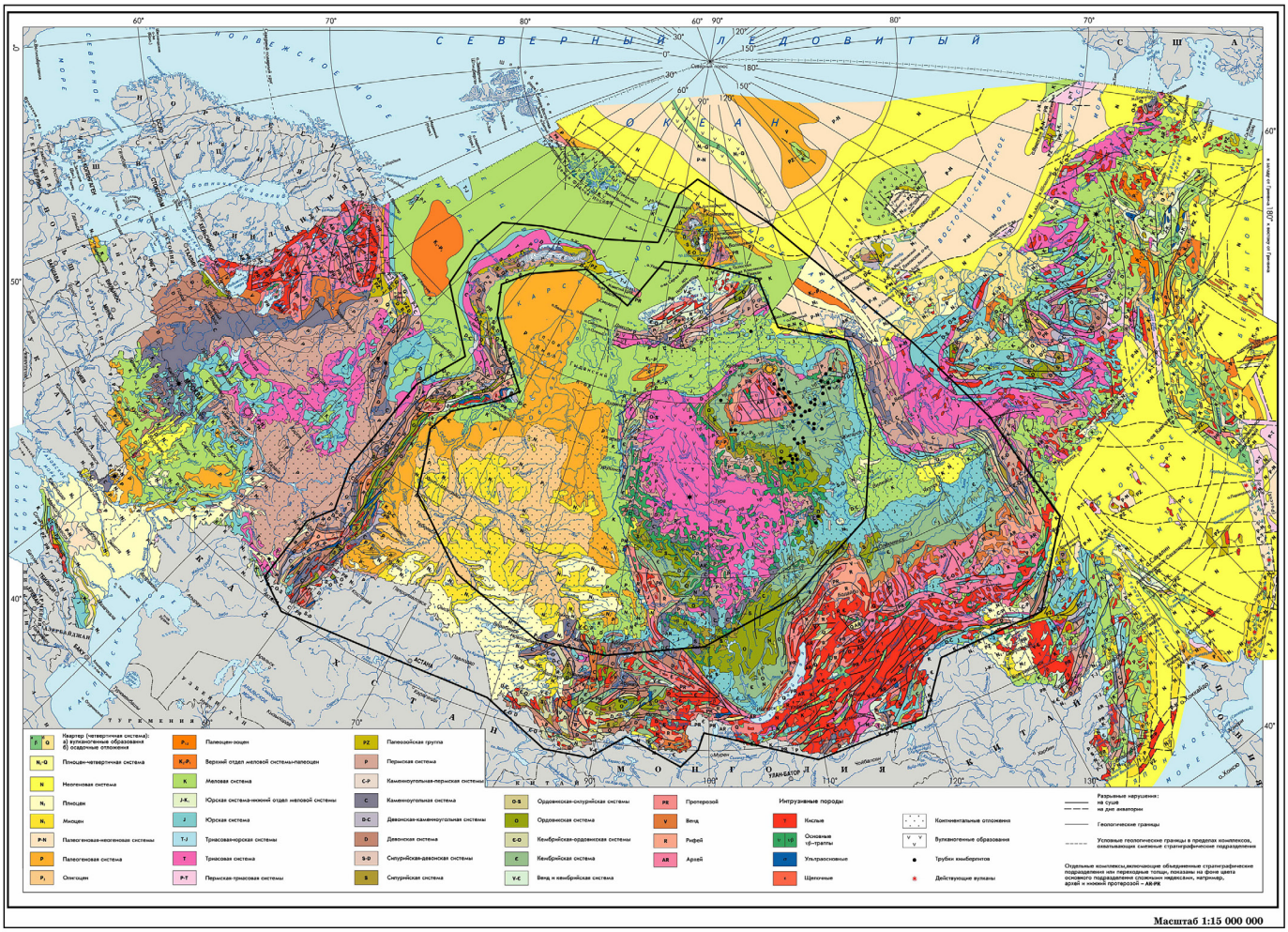


Image 45
Zone délimitée par les structures géologiques dans la zone d'intrusion et d'expansion latérale du panache sibérien (zone noire intérieure) pour l'analyse de la sismicité. La zone noire extérieure correspond à la zone d'effets marginaux de la pression du panache sibérien sur les plaques.

Examinons maintenant les séismes dans la région centrale du panache sibérien. L'Image 46 présente une carte montrant l'emplacement des séismes de magnitude 3,0 et plus. Des séismes ont été enregistrés au sud de la péninsule de Taïmyr.

Un fait particulièrement préoccupant est que deux séismes récents, en août et septembre 2024, se sont produits dans cette région avec des magnitudes de 3,5 et 3,8 respectivement. Des séismes de magnitude similaire ont également été détectés dans la partie sud de la péninsule de Gydan (M 3,5) et sur la péninsule de Yamal (M 3,7 et M 4,2) à une profondeur de 10 km.

Ces séismes ont été enregistrés dans la zone de localisation de la tête du panache sibérien, ce qui représente une tendance inquiétante, qui sera analysée plus en détail par la suite.

Séismes de magnitude M3+ dans la région du panache sibérien

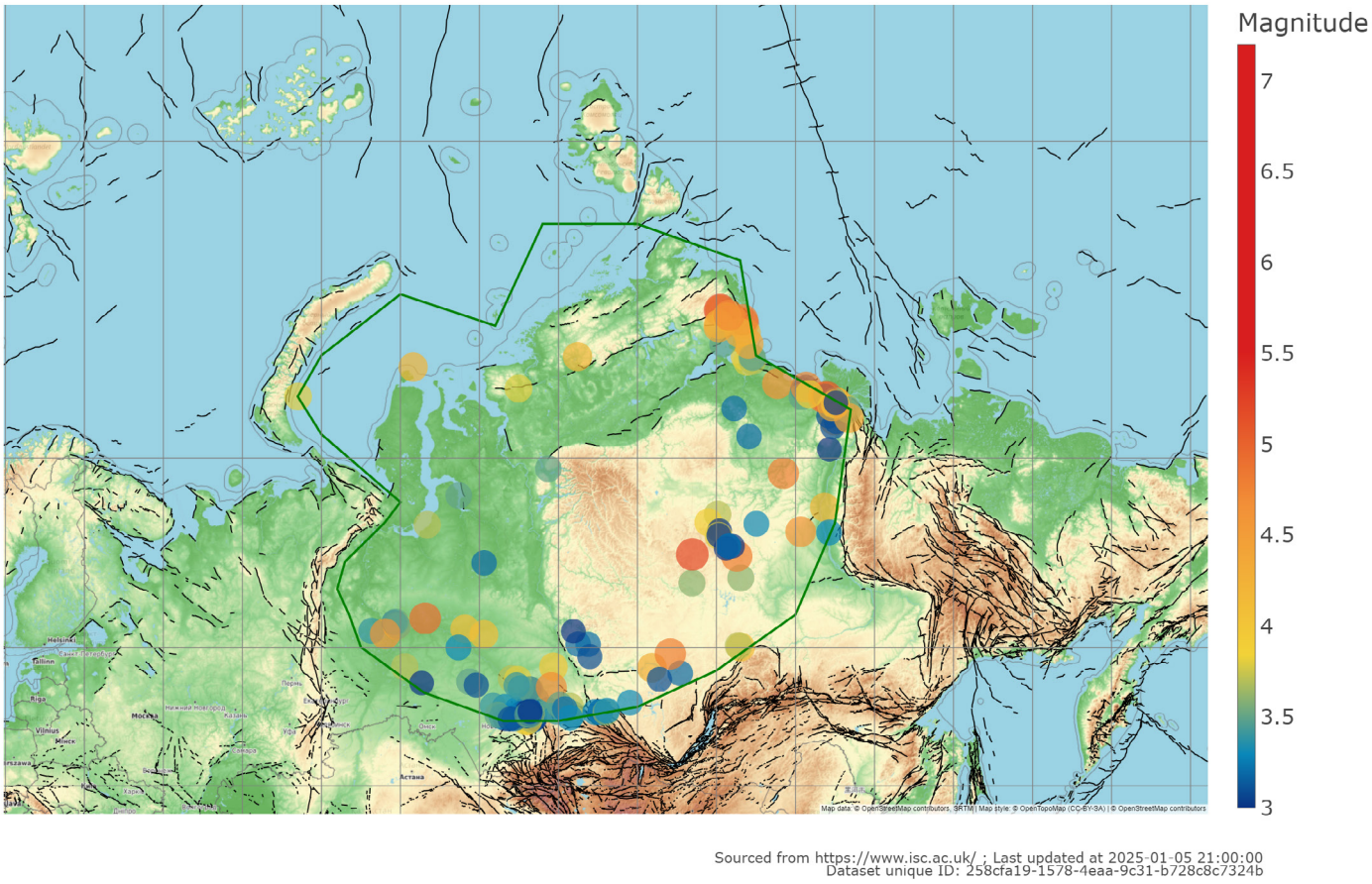


Image 46
Carte des séismes de magnitude 3,0 et plus dans la région du panache sibérien de 1990 à 2024.

Source : base de données de l'ISC.

Dans la zone définie du panache sibérien, un total de 205 séismes de magnitude 3,0 et plus a été enregistré entre 1990 et 2024. En 1995, une augmentation du nombre de séismes a été observée (Image 47), ce qui correspond à la tendance globale de l'augmentation de la sismicité en 1995, associée à une réactivation magmatique. Depuis 2007, un fort accroissement du nombre de séismes a été constaté, suivi d'une diminution progressive de l'activité sismique. Toutefois, depuis 2021, le nombre de séismes a de nouveau fortement augmenté, dépassant les niveaux annuels enregistrés précédemment. Ainsi, la région du panache sibérien présente une augmentation ondulatoire de l'activité sismique, avec une fréquence plus élevée d'événements ces dernières années par rapport aux niveaux typiques de cette zone par le passé.

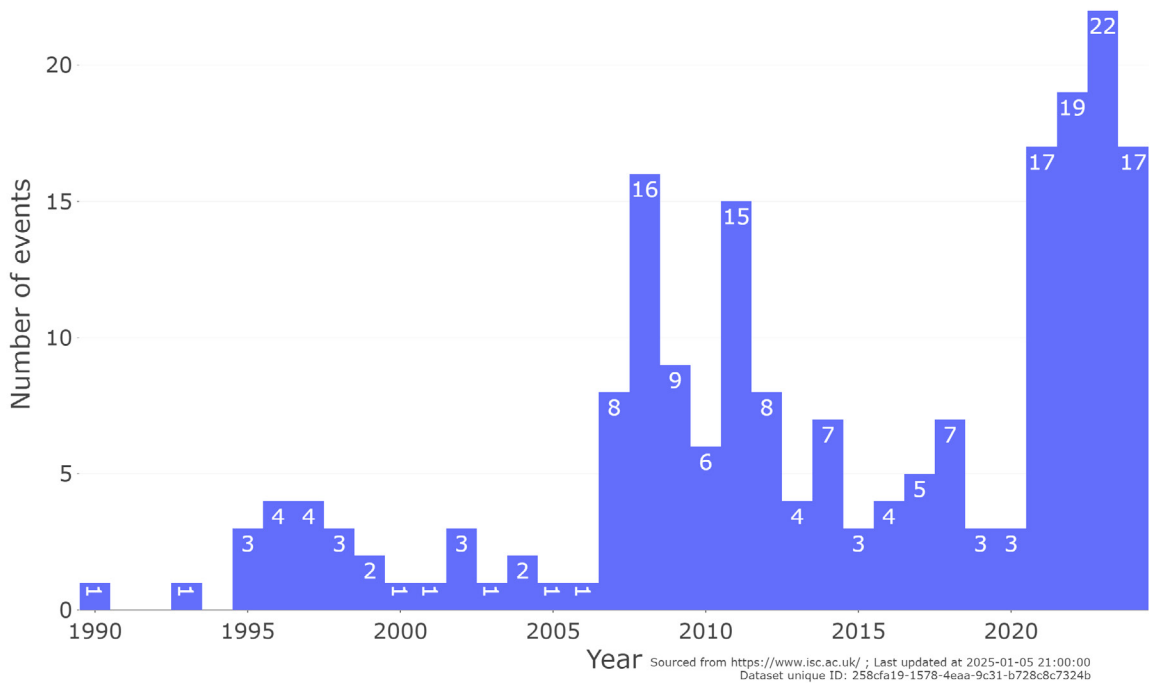


Image 47
Nombre de séismes de magnitude 3,0 et plus dans la région du panache sibérien de 1990 à 2024.

Source : base de données de l'ISC.

Après un séisme de magnitude 5,0 en 1990, une diminution progressive des magnitudes et du nombre de séismes a été observée (Image 48). Entre 1990 et 2007, seuls trois séismes de magnitude supérieure à 4,5 ont été enregistrés.

Depuis 2007, une augmentation progressive des magnitudes des séismes est constatée. Pour la première fois dans l'histoire des observations, des séismes de magnitude 5,1 et 5,2 ont été enregistrés à partir de 2019. Tous les séismes de magnitude 4,5 et plus sont situés en périphérie du panache (Image 49), et certains d'entre eux se trouvent dans des zones stables, où aucune faille connue n'a été identifiée.

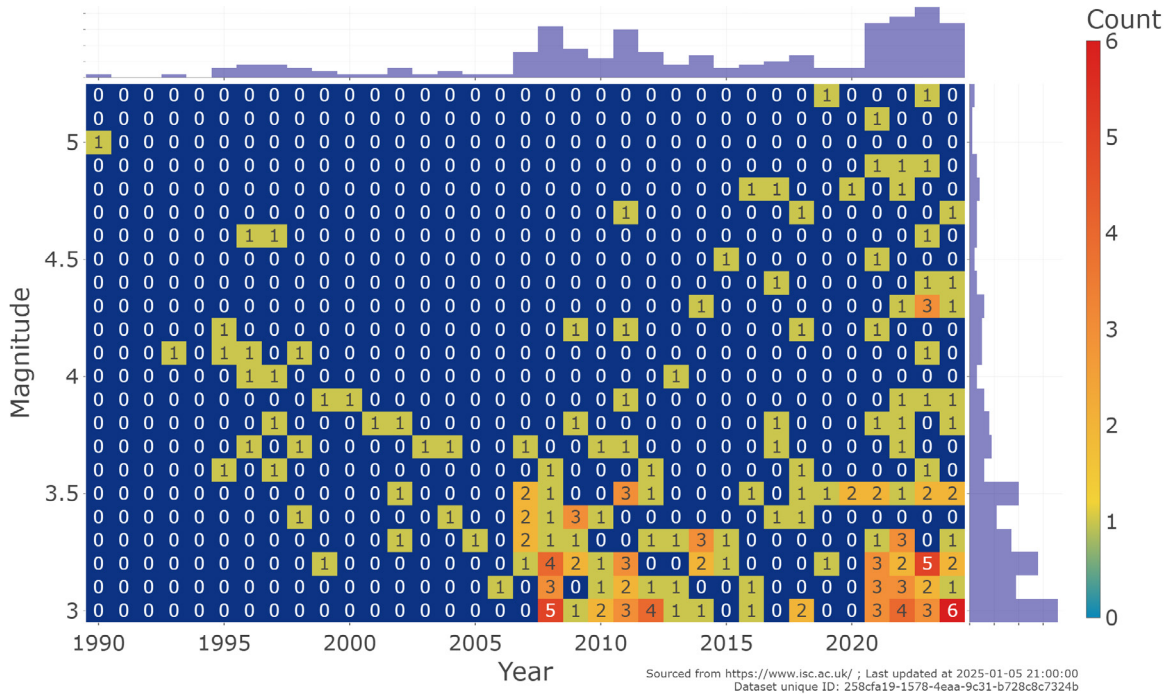


Image 48
Répartition des séismes survenus dans la région du panache sibérien de 1990 à 2024 en fonction de leur magnitude.
Source : base de données de l'ISC.

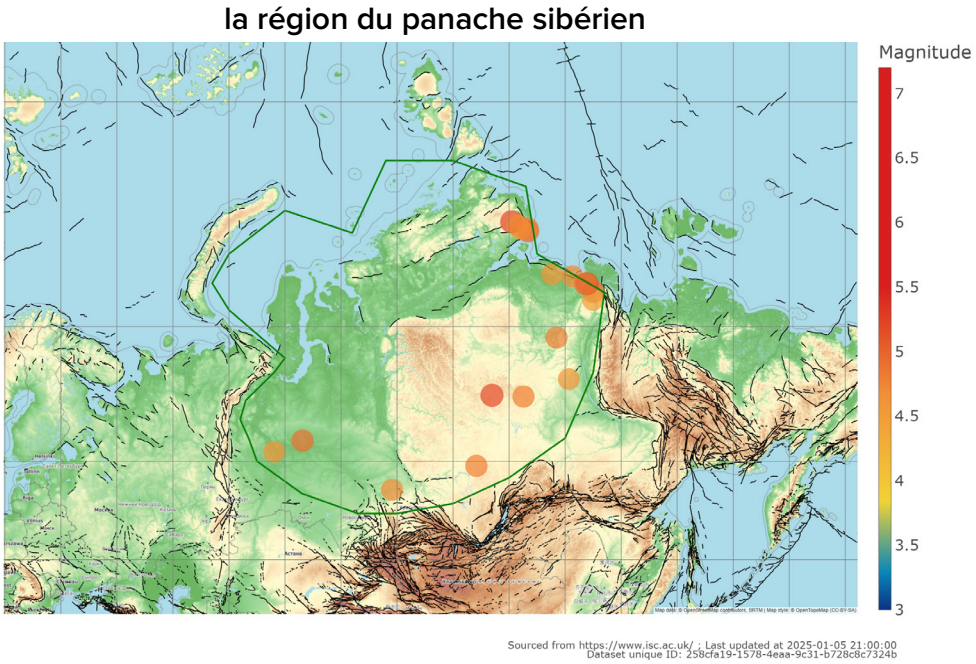


Image 49
Carte des séismes de magnitude 4,5 et plus dans la région du panache sibérien de 1990 à 2024.

Source : base de données de l'ISC.

En 2007, un séisme de magnitude 3,7 a été enregistré pour la première fois à une profondeur de 33 km, à proximité de la discontinuité de Mohorovičić (le Moho) (Image 50).

Après 2014, les séismes situés à la base de la croûte terrestre, entre 30 et 35 km de profondeur, sont devenus significativement plus fréquents, atteignant parfois une magnitude de 5,0. Tous ces événements sismiques sont situés à la périphérie du foyer présumé du panache.

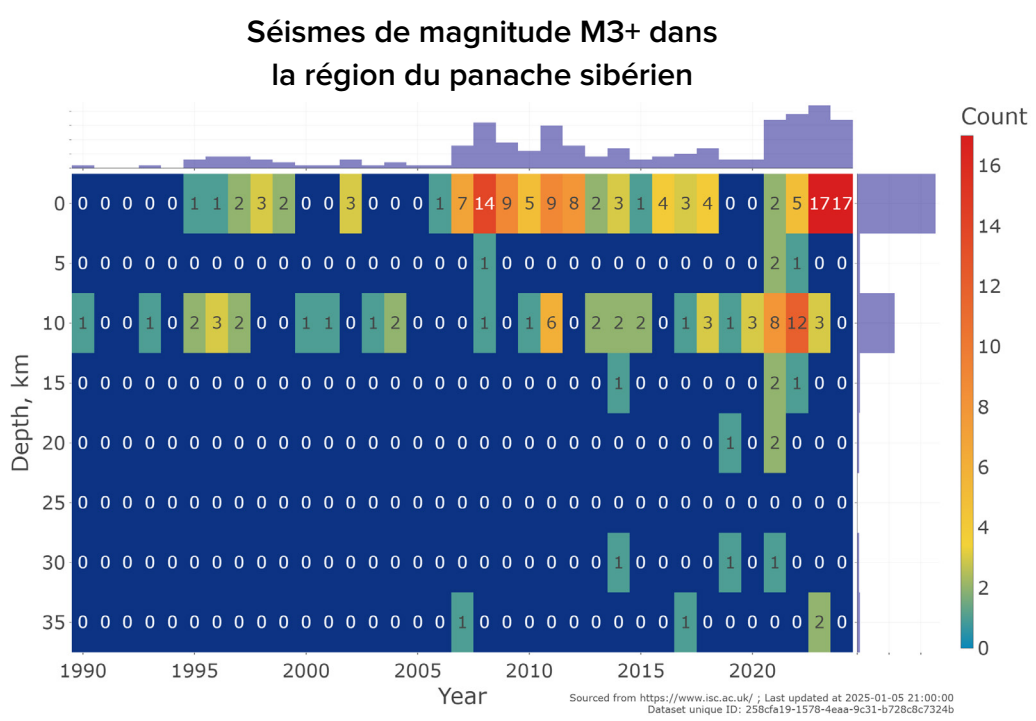


Image 50
Répartition des séismes de magnitude 3,0 et plus survenus dans la région du panache sibérien entre 1990 et 2024 en fonction de leur profondeur.

Source : base de données de l'ISC.

L'analyse des séismes dans la région présumée du panache sibérien met en évidence une augmentation progressive et ondulatoire de la sismicité : le nombre de séismes augmente, leurs magnitudes s'élèvent, et des séismes à de grandes profondeurs sont désormais enregistrés. Ces observations témoignent de processus de déformation de la plaque sous l'effet d'une pression colossale exercée par le magma par en-dessous. La progression de ces phénomènes mènera inévitablement à une éruption du panache sibérien dans un avenir proche, pour les raisons suivantes.

Le socle du craton de la Sibérie orientale est cimenté par des roches magmatiques et métamorphiques, formant une croûte dense et monolithique, issue des éruptions survenues il y a 250 millions d'années. L'apparition de séismes de magnitude 7,0 ou plus dans cette région indiquerait que les structures de la plateforme du craton sibérien subissent des déformations dépassant la résistance des roches.

Pour comprendre comment un craton monolithique pourrait se fracturer sous la pression du panache, on peut le comparer au processus par lequel une vitre se fissure juste avant d'éclater complètement.

Actuellement, pour comprendre la situation réelle de l'avancée du panache et la solidité de la croûte terrestre dans la zone du panache magmatique sibérien, il est d'une importance cruciale d'installer des capteurs sismiques supplémentaires, de préférence dans des forages de plusieurs kilomètres de profondeur. Cela permettra une analyse tomographique sismique détaillée de la croûte et du manteau terrestres et un suivi continu de la position et de l'activité du panache (voir le scénario 3 : « Un dégazage planifié et contrôlé »).

Une attention particulière doit être portée à la répartition des séismes en fonction de leur profondeur dans la région du panache sibérien et de ses zones périphériques (Image 51). Les séismes situés près de la limite de Moho (à plus de 30 km de profondeur), ainsi que ceux qui se produisent directement dans le manteau, sont principalement enregistrés dans des zones plissées. On remarque que ces séismes entourent la zone présumée du panache sibérien.

Séismes de magnitude M3.5+ dans la région du panache sibérien

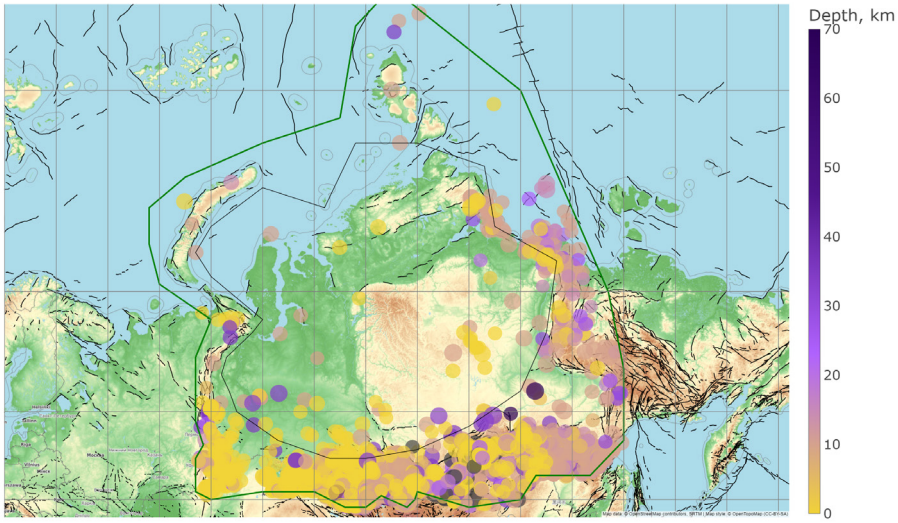


Image 51
Carte des séismes de magnitude 3,5 et plus dans la région du panache sibérien de 1990 à 2024. L'échelle de couleurs indique la profondeur des événements.

Source : base de données de l'ISC.

Examinons maintenant l'activité sismique dans les parties périphériques du panache sibérien. Géologiquement, ces zones font partie des chaînes plissées, qui sont des régions sismiquement actives. La sismicité dans ces secteurs peut être influencée à la fois par des mouvements tectoniques et par l'impact du panache magmatique. Le graphique du nombre de séismes montre une superposition de plusieurs facteurs de sismicité (Image 52). Certaines années présentent des pics significatifs d'activité sismique. Pour mieux comprendre la nature de ces processus, il est nécessaire d'analyser chaque région individuellement.

En examinant la zone les structures plissées de Verkhoyansk et les failles situées au fond de la mer de Laptev (Image 53), on observe que d'importants pics d'activité sismique avec des séismes de magnitude 3,0 et plus ont eu lieu en 2013 et entre 2021 et 2022 (Image 54). Ces pics d'activité sont caractéristiques des phases d'intrusion magmatique, qui provoquent d'importantes ruptures de la croûte terrestre et l'expulsion du contenu fluide à travers les fractures des roches et les failles voisines. Ces manifestations s'accompagnent généralement d'une augmentation du nombre de séismes de faible magnitude, de la formation d'essaims sismiques et parfois même de séries d'essaims de séismes.

Séismes de magnitude M3+ dans les zones périphériques du panache sibérien

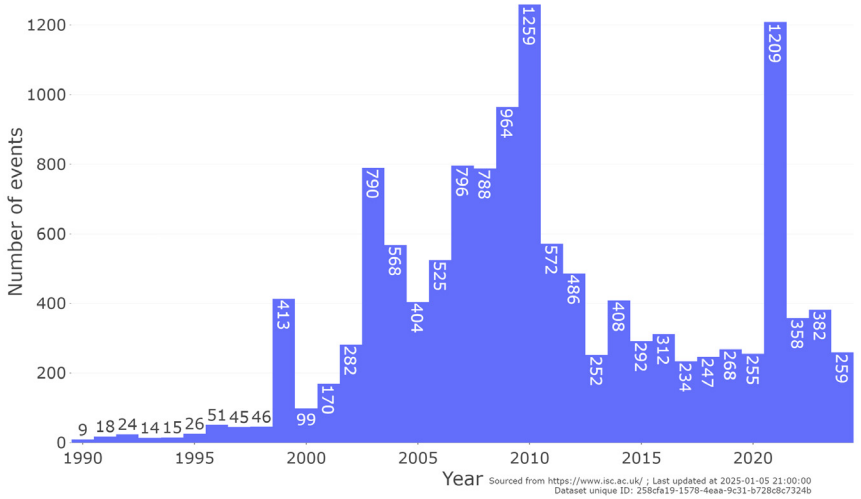


Image 52
Nombre de séismes de magnitude 3,0 et plus dans les zones périphériques du panache sibérien entre 1990 et 2024. Les séismes à l'intérieur du polygone (Image 47) ont été exclus de cette analyse.

Source : base de données de l'ISC.

Densité des séismes de magnitude M3+ dans la partie nord-est

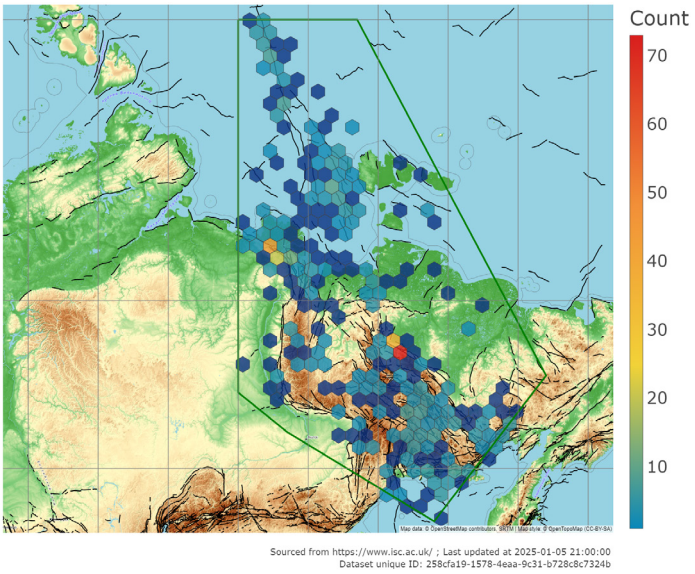


Image 53
Densité des séismes de magnitude 3,0 et plus dans la zone sélectionnée à l'extrémité nord-est du bloc sibérien de 1990 à 2024. Les lignes noires indiquent les failles tectoniques.

Source : base de données de l'ISC.

Densité des séismes de magnitude M3+ dans la partie nord-est

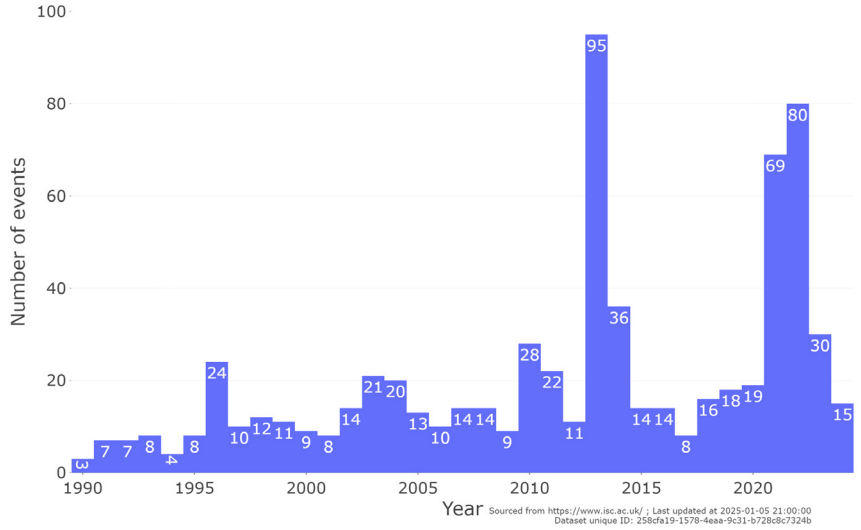


Image 54
Graphique montrant le nombre de séismes de magnitude 3,0 et plus dans la zone sélectionnée à l'extrémité nord-est du bloc sibérien de 1990 à 2024.

Source : base de données de l'ISC.

L'étude des magnitudes des séismes dans cette zone révèle un pic d'activité sismique pour les séismes de magnitude 2,0 à 3,5 en 2010, 2013–2014, ainsi qu'une augmentation significative de leur nombre depuis 2019 (Image 55). Depuis 2019, le nombre de séismes atteignant les profondeurs les plus basses de la croûte terrestre, jusqu'à 35 km, a également fortement augmenté (Image 56). En 2013, un séisme de magnitude 6,7 a été enregistré pour la première fois dans cette région, ce qui indique soit une longue phase d'accumulation de contraintes tectoniques, soit une libération soudaine de fluides magmatiques accumulés.

Examinons séparément le groupe de séismes situé au sud-est de la péninsule de Taïmyr (Image 57).

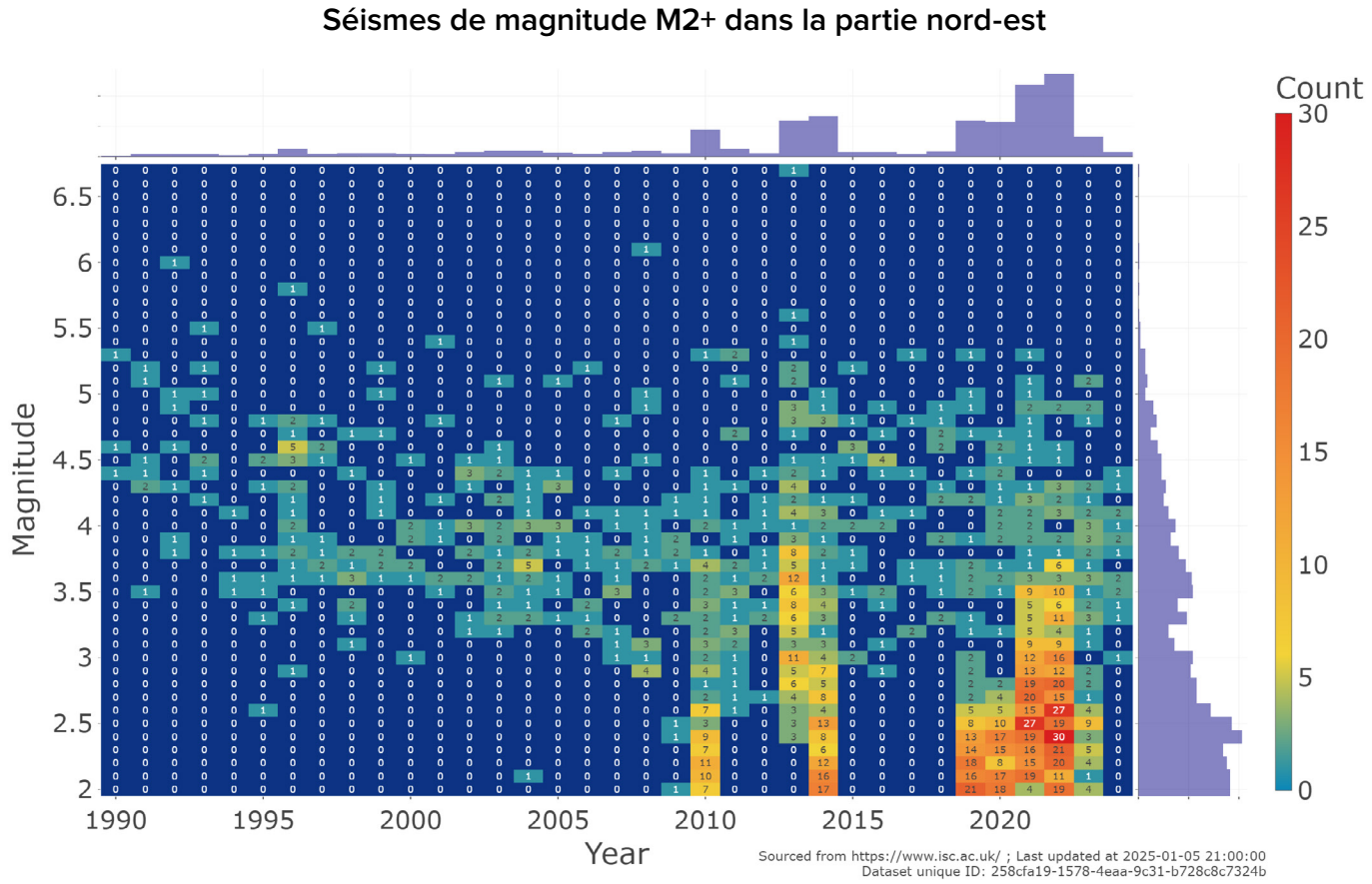


Image 55
Répartition du nombre de séismes par magnitude dans une section sélectionnée à l'extrémité nord-est du bloc sibérien de 1990 à 2024.

Source : base de données de l'ISC.

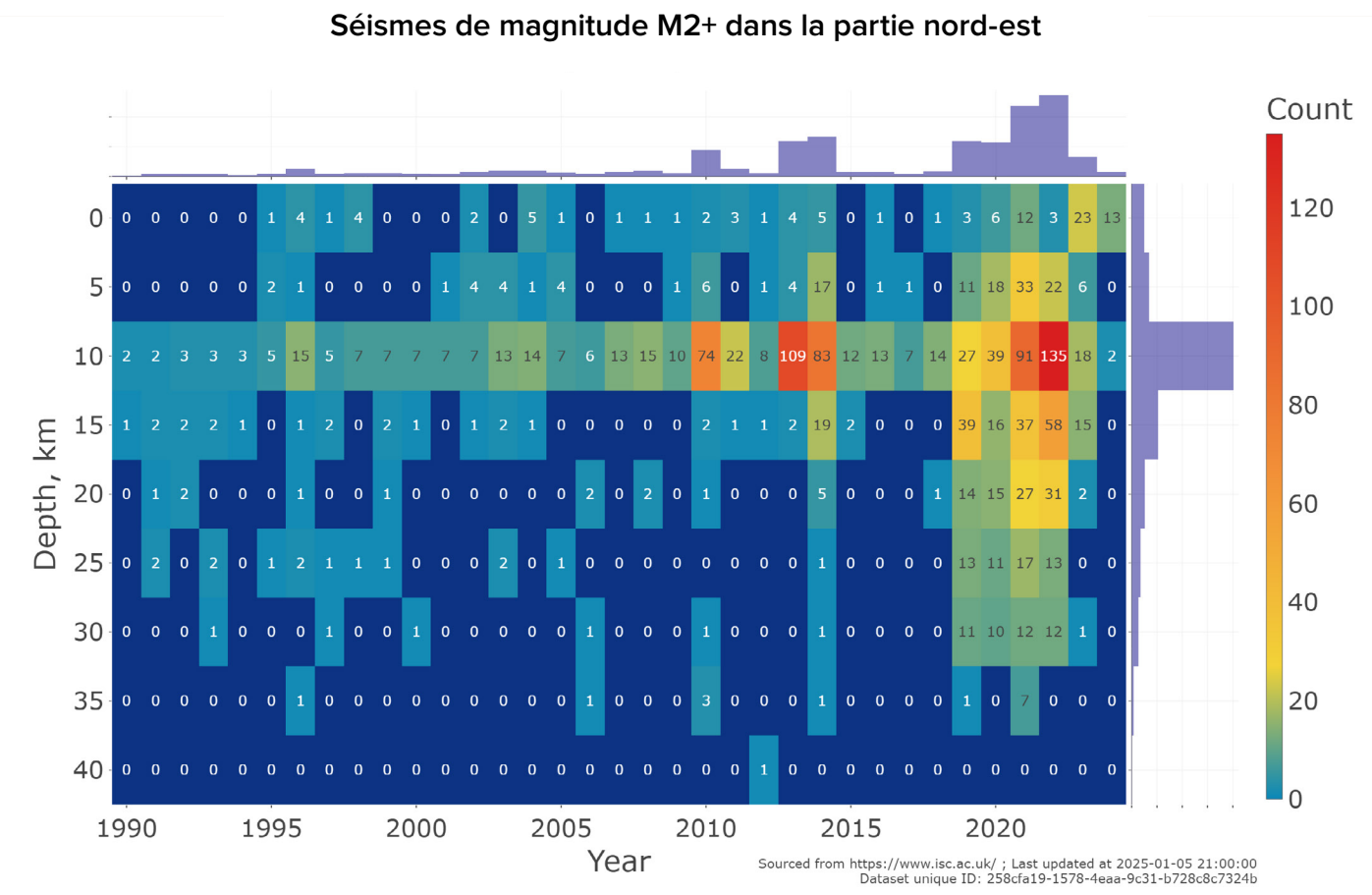


Image 56
Répartition du nombre de séismes de magnitude 2,0 et plus en fonction de la profondeur dans la zone sélectionnée à l'extrémité nord-est du bloc sibérien de 1990 à 2024.

Source: base de données de l'ISC.

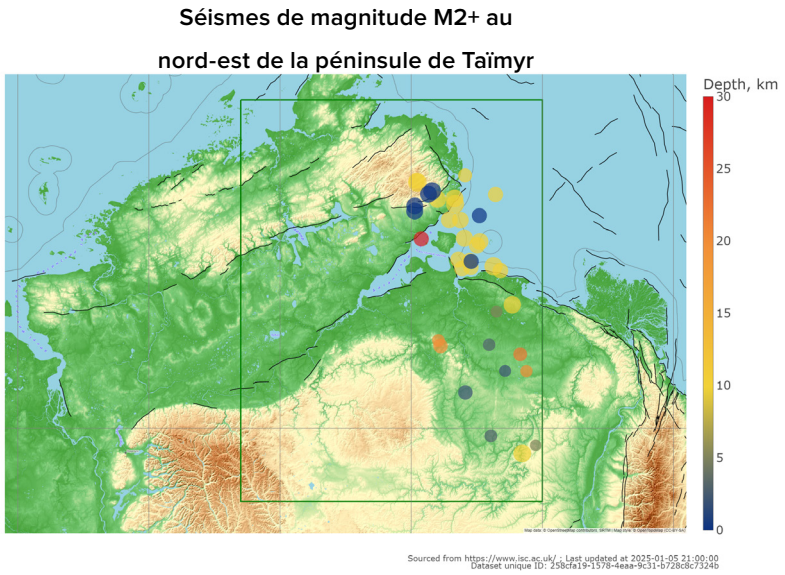


Image 57
Carte de la répartition des séismes de magnitude 2,0 et plus dans la zone sélectionnée au nord-est de la péninsule de Taïmyr, de 1990 à 2024.

Source: base de données de l'ISC.

En 2019–2020, un pic d'activité sismique a également été observé dans cette région, avec une augmentation des séismes de faible et moyenne magnitude (Images 58, 59).

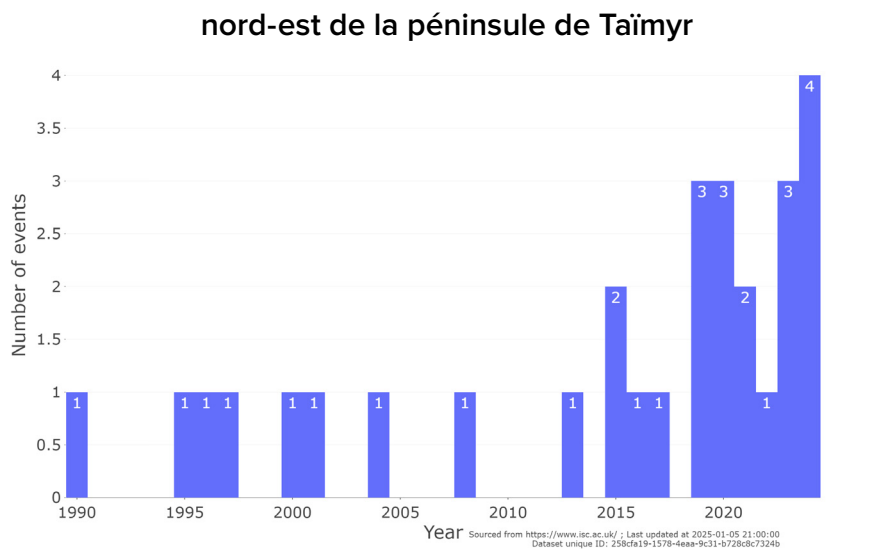


Image 58
Graphique du nombre de séismes de magnitude 3,0 et plus dans la zone sélectionnée au nord-est de la péninsule de Taïmyr.

Source : base de données de l'ISC.

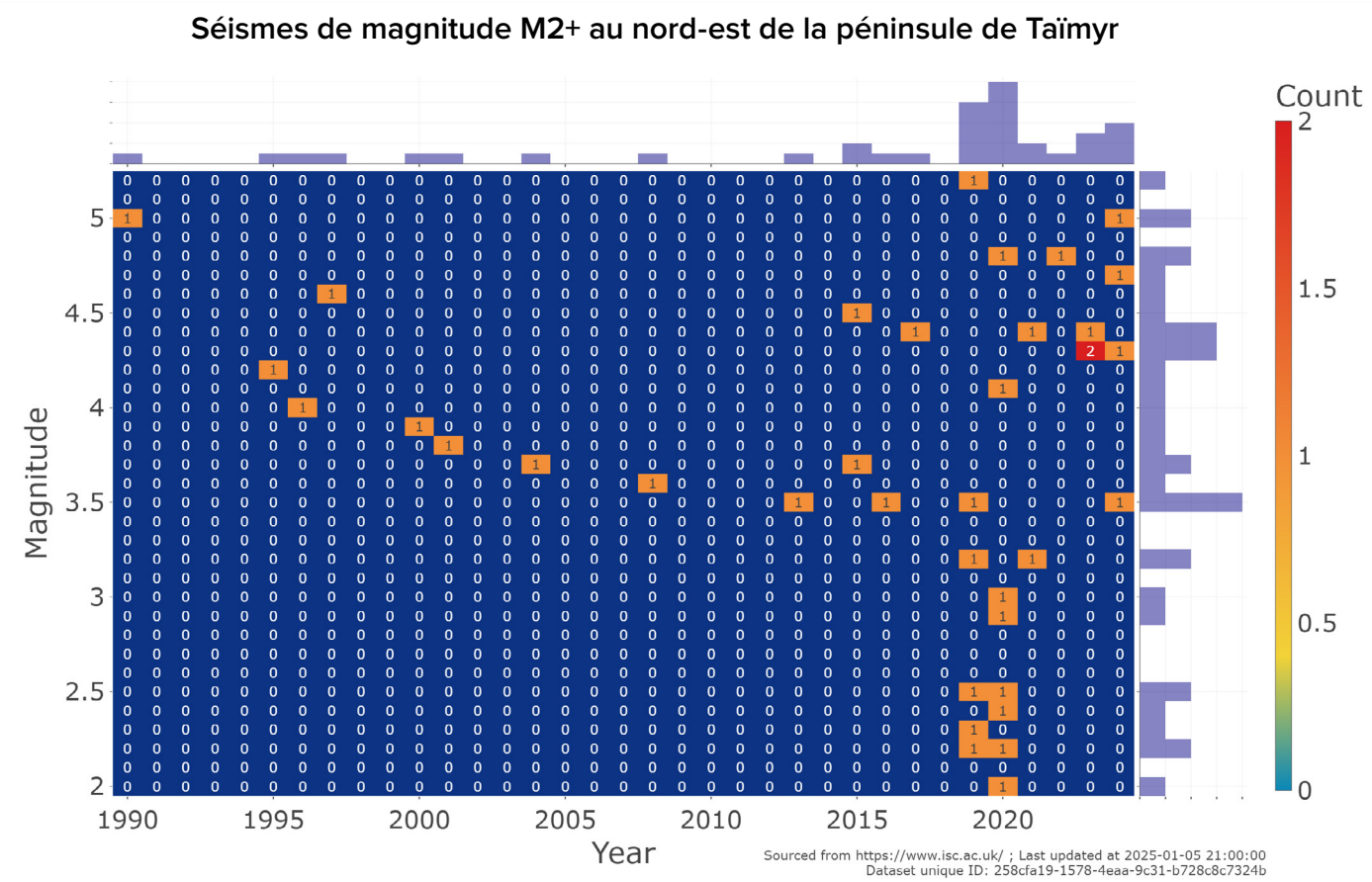


Image 59
Répartition du nombre de séismes par magnitude dans la zone sélectionnée au nord-est de la péninsule de Taïmyr, de 1990 à 2024.

Source: base de données de l'ISC.

En 2019–2020, une augmentation de la profondeur des séismes atteignant la base de la croûte terrestre a été observée (Image 60) au même moment que celle du nombre des séismes dans la région des structures plissées de Verkhoyansk.

Il convient de souligner que cette zone est sous l'influence de la tête du panache sibérien. Malgré le nombre relativement faible de séismes, la région présente une tendance similaire d'augmentation de la profondeur et de la fréquence des séismes que dans les structures plissées de Verkhoyansk, mais à partir de 2019.

La partie sud de la région étudiée comprend la chaîne plissée de l'Altaï-Saïan et la région du Baïkal (Image 61). Ce secteur est tectoniquement actif et sismiquement instable. Un pic d'activité sismique y a été enregistré en 1999 et en 2021 (Image 62). Depuis 2007, la magnitude des séismes y augmente progressivement, atteignant 6,8 en 2021 (Image 63).

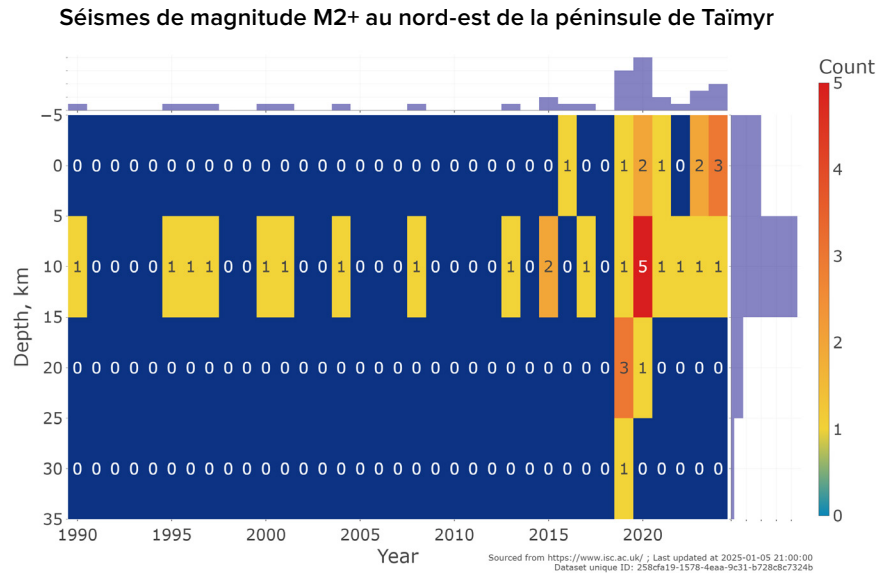


Image 60
Répartition du nombre de séismes de magnitude 2,0 et plus en fonction de la profondeur dans la zone sélectionnée au nord-est de la péninsule de Taïmyr.

Source : base de données de l'ISC.

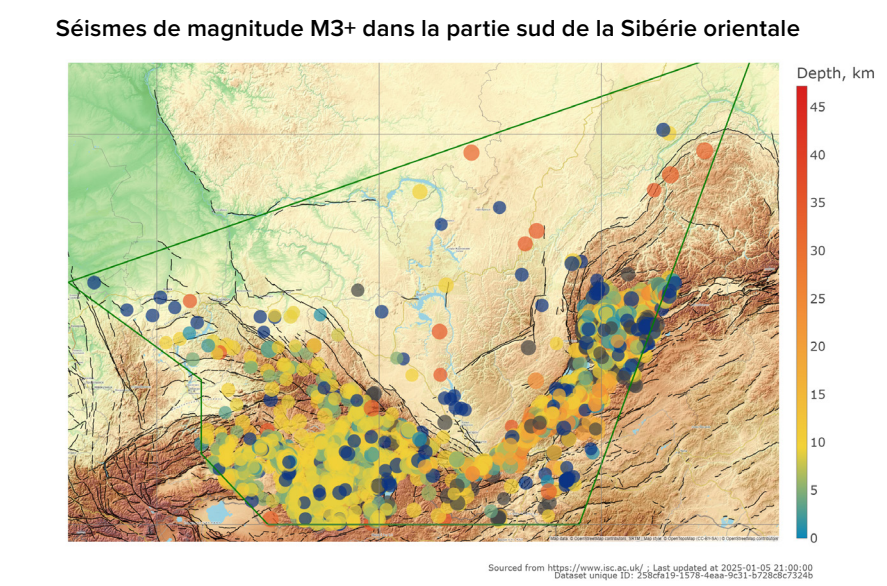


Image 61
Carte des épicentres des séismes de magnitude 3,0 et plus enregistrés entre 1990 et 2024 dans la zone sélectionnée du sud de la Sibérie orientale.

Source: base de données de l'ISC.

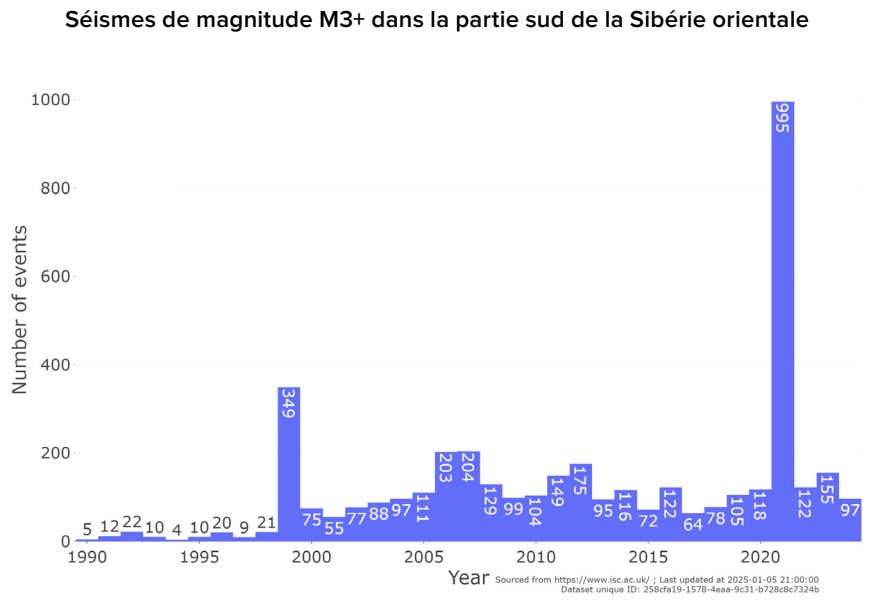


Image 62
Nombre de séismes de magnitude 3,0 et plus enregistrés dans la partie sud de la Sibérie orientale.

Source : base de données de l'ISC.

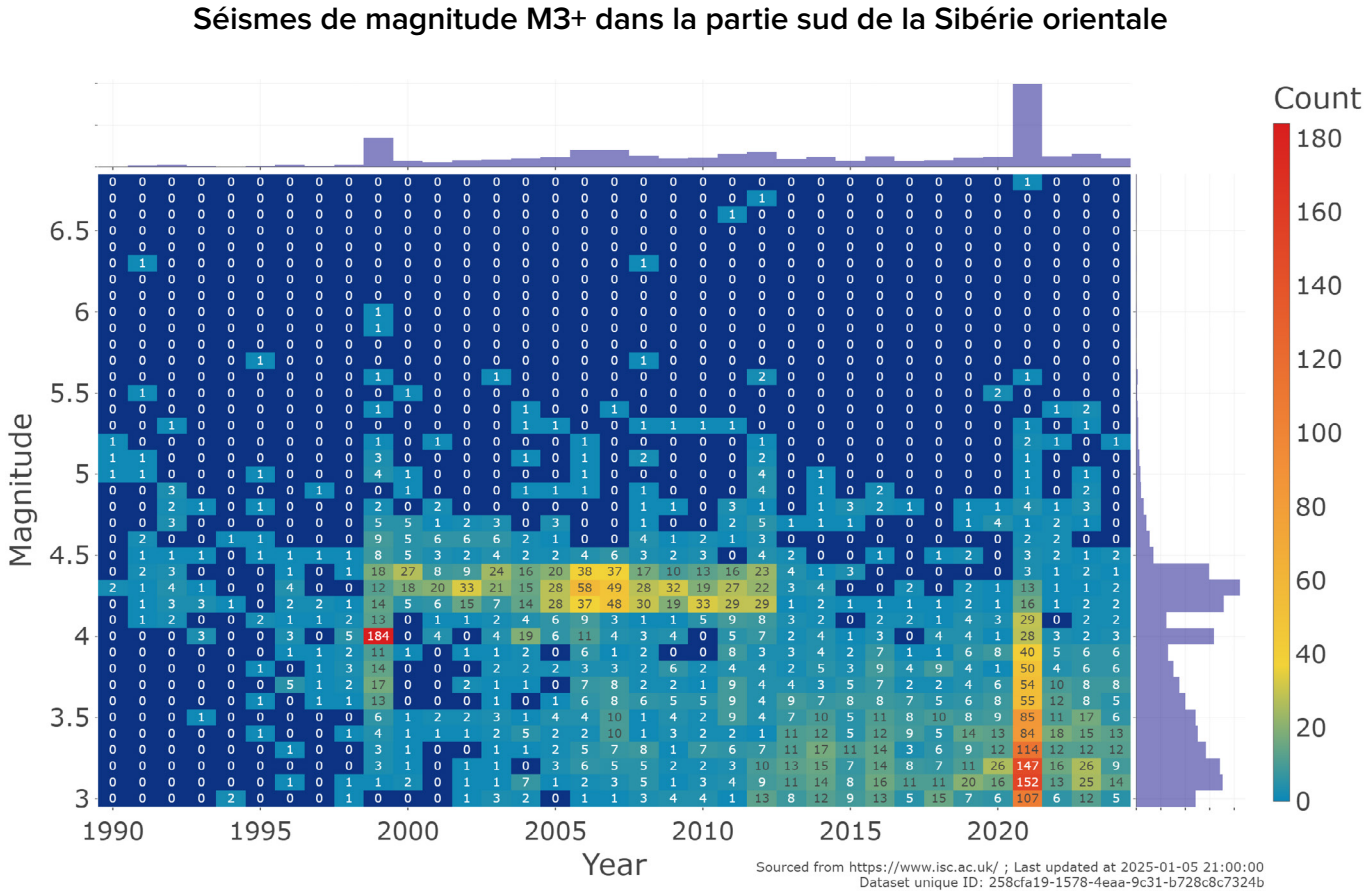


Image 63
Répartition des séismes en fonction de leur magnitude dans la zone sélectionnée du sud de la Sibérie orientale, de 1990 à 2024.

Source : base de données de l'ISC.

Il est important de noter l'apparition de séismes mantelliques sous le craton sibérien. Dès 1998, un séisme de magnitude 3,3 a été enregistré à une profondeur de 211 km dans la région de la synéclise de Vilyuy. C'était un fait surprenant à l'époque, cependant, un événement encore plus unique s'est produit en 2023 dans la même région: un séisme de magnitude 5,1 à une profondeur de 627 km (Image 64).

La survenue d'un séisme à foyer profond sous un bloc cratonique stable est en soi un phénomène exceptionnel. Traditionnellement, les séismes intra-mantelliques sont associés aux zones de subduction, qui sont situées à des milliers de kilomètres de cette région et ne peuvent donc pas être responsables de ces événements.

Les auteurs du rapport avancent l'hypothèse que ces séismes à foyer profond sont dus à des explosions intra-mantelliques de grande puissance. Ces explosions seraient causées par le contact entre des flux de magma relativement chauds et des flux plus froids. Les modèles de tomographie sismique montrent que ces deux séismes profonds se sont produits dans des zones présentant des anomalies de vitesse des ondes sismiques. Ces anomalies indiquent la présence de flux mantelliques de viscosités différentes, ce qui suggère un contraste thermique important.

Ainsi, ces deux séismes mantelliques sont apparus aux zones de contact entre des flux mantelliques relativement chauds et relativement froids (Image 65). Ce mélange de matériaux à différentes températures a généré d'énormes rejets d'énergie, produisant des ondes acoustiques détectées par les capteurs sismiques, et enregistrées comme des séismes.

Cette observation est une preuve directe d'une activité intense des flux mantelliques dans cette région.

Localisation des séismes profonds en Sibérie

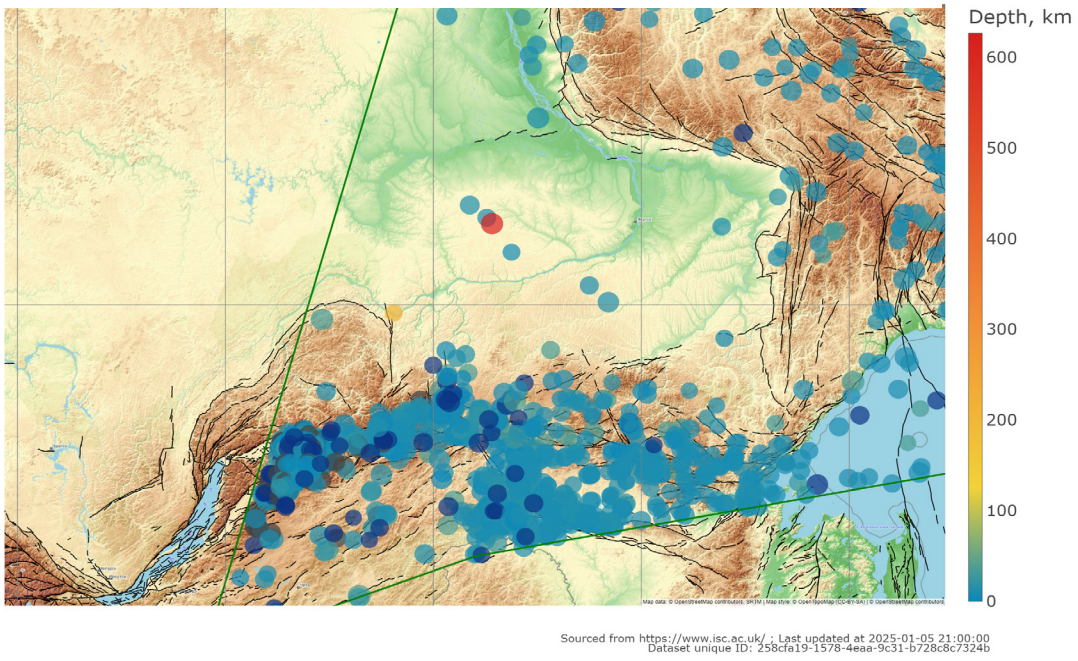


Image 64
La carte indique l'épicentre du séisme à foyer profond de magnitude 5,1 à 627 km de profondeur sous la plateforme sibérienne en 2023 (marqueur rouge) ainsi que l'épicentre du séisme de magnitude 3,3 à 211 km de profondeur en 1998 (marqueur jaune).

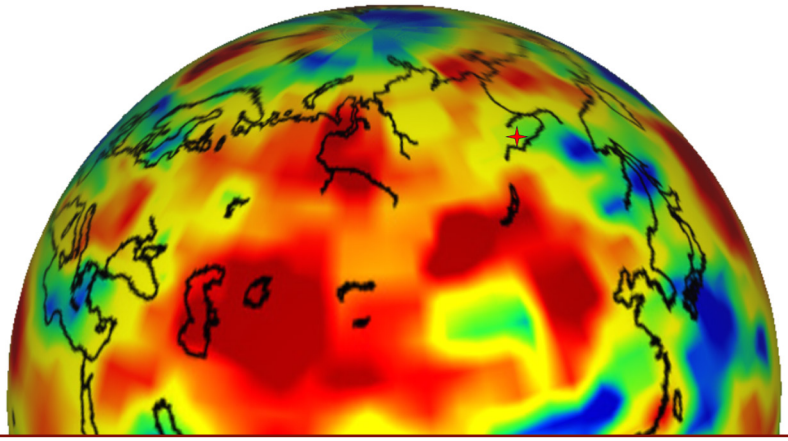


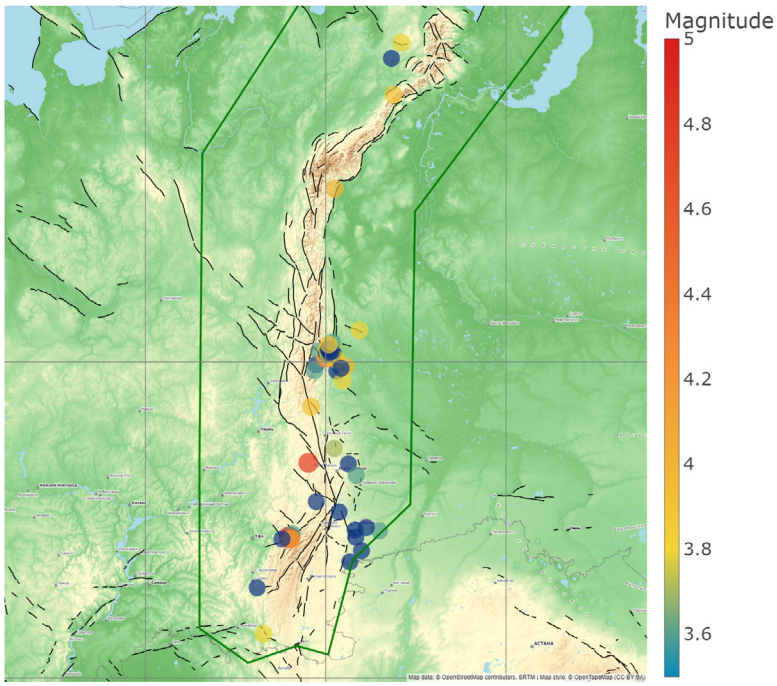
Image 65
Zones de faibles vitesses sismiques dans le manteau à une profondeur d'environ 600 km.
L'hypocentre du séisme de magnitude 5,1 de 2023 est situé dans la zone de contact entre des régions du manteau relativement chaudes et relativement froides.

Source : https://members.elsi.jp/~hiroki.ichikawa/gst/gallery/gallery.html

L'oscillation des parties périphériques du bloc sibérien entraîne une augmentation de l'activité sismique dans la région de l'Oural.

Les données analysées ont été filtrées afin d'exclure les séismes liés à l'exploitation minière. De plus, seules les magnitudes supérieures à 3,5 ont été retenues, garantissant l'exclusion des événements d'origine anthropique (Images 66, 67). Par conséquent, l'augmentation ondulatoire de la sismicité observée reflète bien les processus naturels.

Séismes de magnitude M3,5+ dans l'Oural



Sourced from https://www.isc.ac.uk/ ; Last updated at 2025-01-05 21:00:00
Dataset unique ID: 258cfa19-1578-4eaa-9c31-b728c8c7324b

Image 66
Carte des épicentres des séismes de magnitude 3,5 et plus enregistrés dans la région de l'Oural entre 1990 et 2022.

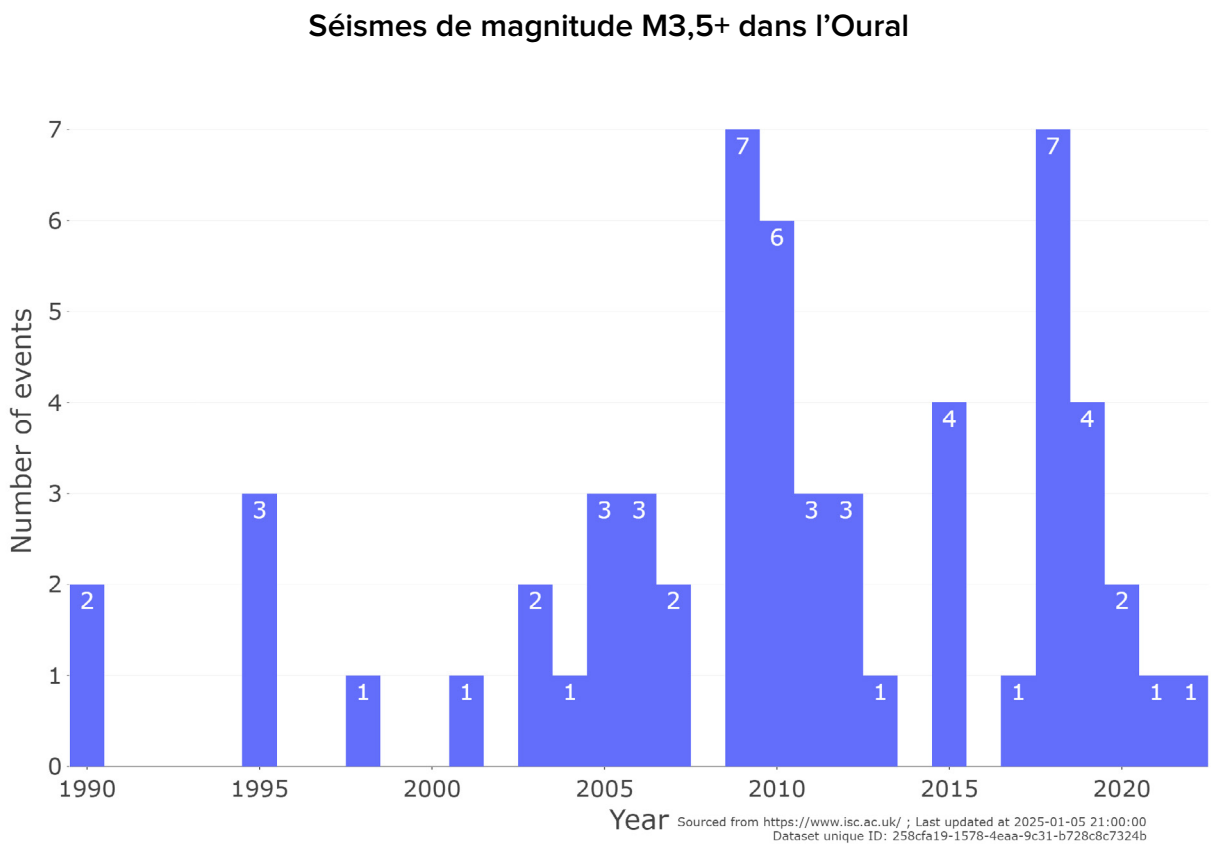


Image 67
Nombre de séismes de magnitude 3,5 et plus enregistrés dans la région de l'Oural entre 1990 et 2022.

En outre, des séismes de magnitude 4,0 à 5,0 ont été enregistrés dans la région, ce qui constitue un indicateur supplémentaire de l'augmentation naturelle de l'activité sismique (Image 68). L'évolution de la sismicité dans la région de l'Oural ne suit pas une tendance linéaire, mais se produit par vagues, ce qui correspond à une dynamique naturelle des processus tectoniques.

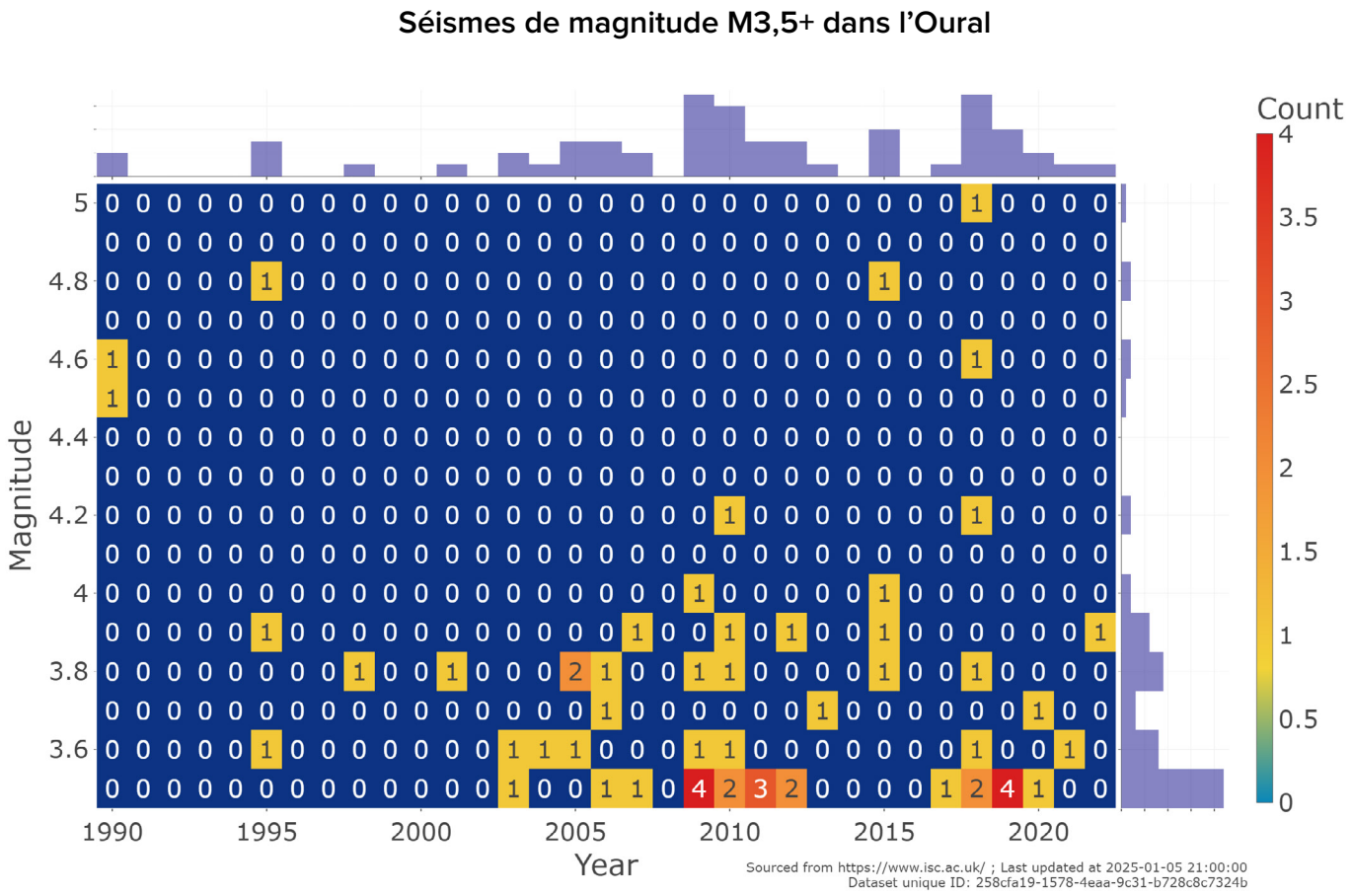


Image 68
Répartition des séismes enregistrés dans la région de l'Oural entre 1990 et 2022, en fonction de leur magnitude.

Source : base de données de l'ISC.

Un graphique a été établi pour comparer les périodes de pics d'activité sismique dans les différentes zones du panache sibérien et de ses régions périphériques, (image 69). En 2021, une augmentation de l'activité sismique est observée dans toutes les régions étudiées, à l'exception de l'Oural. Le graphique montre que la sismicité augmente dans toutes les régions et que cette tendance s'accélère ces dernières années et qu'elle suit un mouvement ondulatoire avec des pics pulsés dans différentes zones. En même temps, on observe une certaine régularité, qui semble suivre un balancement progressif de la plaque lithosphérique dans une direction d'ouest-est au nord-sud.

Une augmentation des surfaces brûlées dans certaines régions indique une intensification des processus souterrains. Les incendies de forêt apparaissent souvent dans les zones de failles, où des gaz inflammables s'échappent du sous-sol. Ces incendies sont difficiles à éteindre et se propagent très rapidement sur de vastes territoires. Dans la région de l'Oural, une forte augmentation des incendies naturels a été constatée depuis 2020 (Image 70). Ce graphique a été établi à partir des données de l'Agence Fédérale des Forêts (Avialesookhrana - surveillance aérienne des forêts).

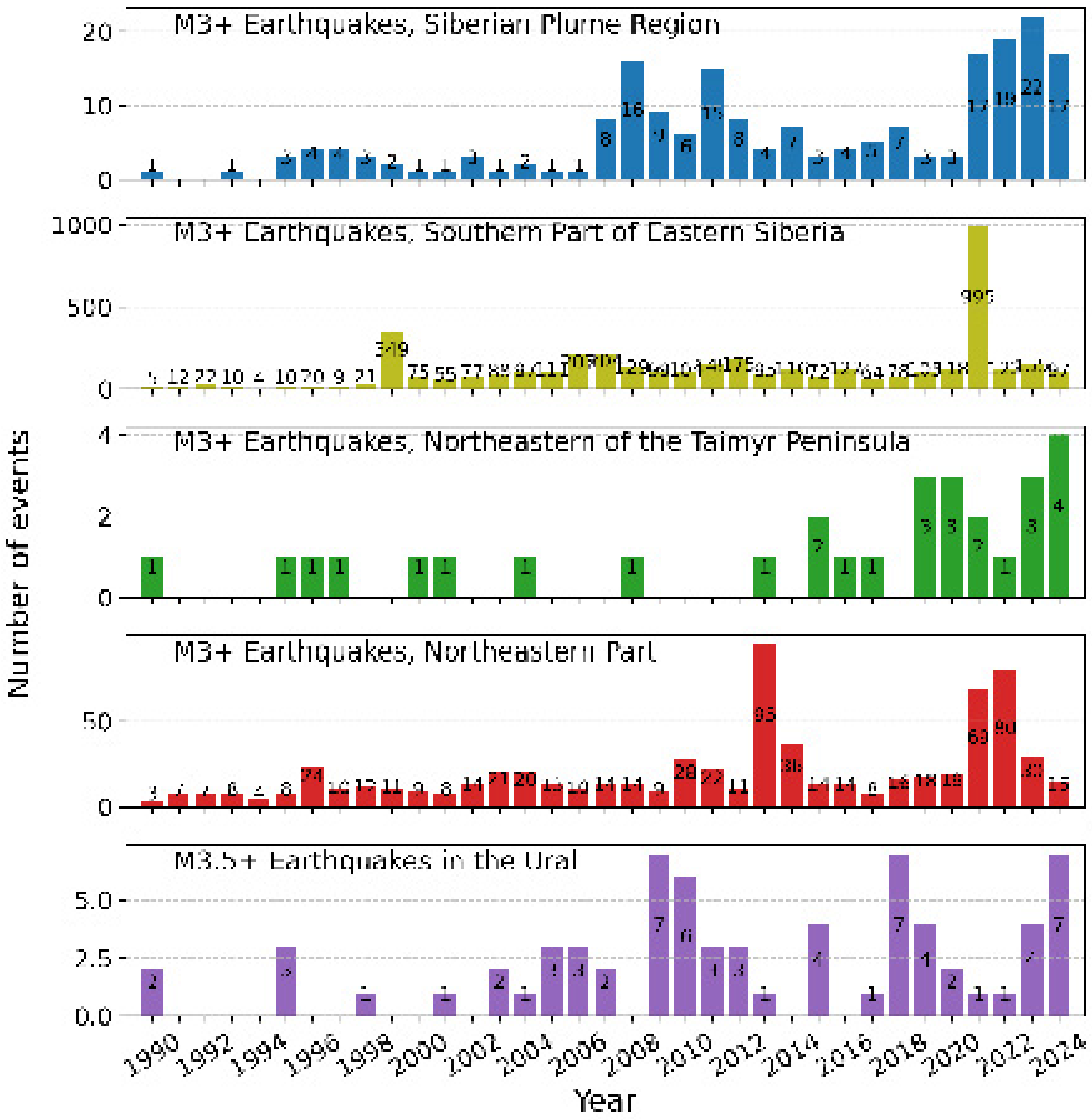


Image 69
Répartition des pics d'activité sismique dans les régions suivantes : Verkhoyansk (à l'est de la plateforme sibérienne) Sud de la Sibérie orientale, l'Oural (à l'ouest de la Sibérie orientale), le Centre de la Sibérie (incluant la plaque de la Sibérie occidentale et la plateforme de la Sibérie orientale). Les données concernent les séismes de magnitude 3,0 et plus.

Source: base de données de l'ISC.

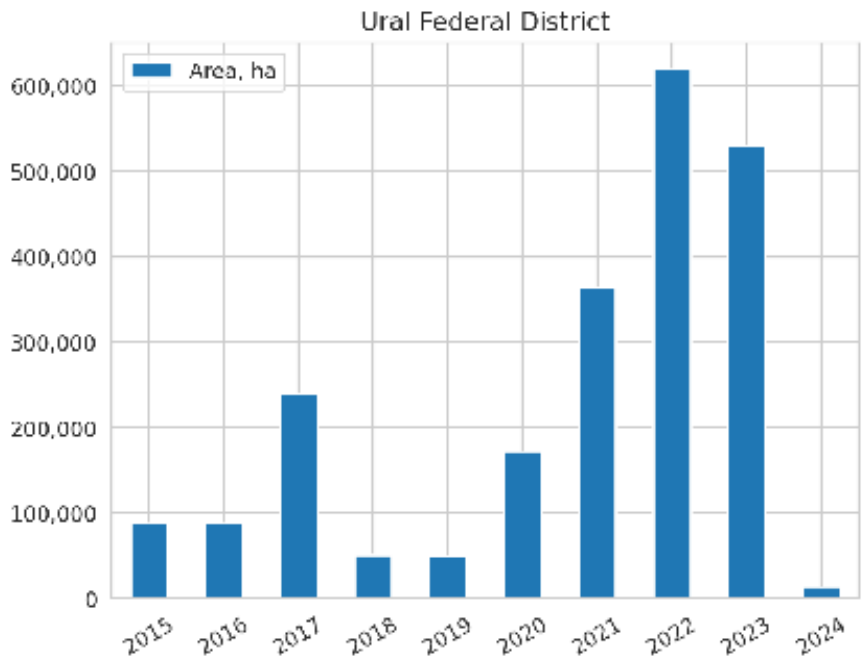


Image 70
Augmentation de la surface brûlée par les incendies dans la région de l'Oural, d'après les données de l'Agence Fédérale des Forêts FBU "Avialesookhrana" (les données pour 2024 sont incomplètes).

La surface des incendies dans l'Extrême-Orient russe connaît également une croissance exponentielle (Image 71).

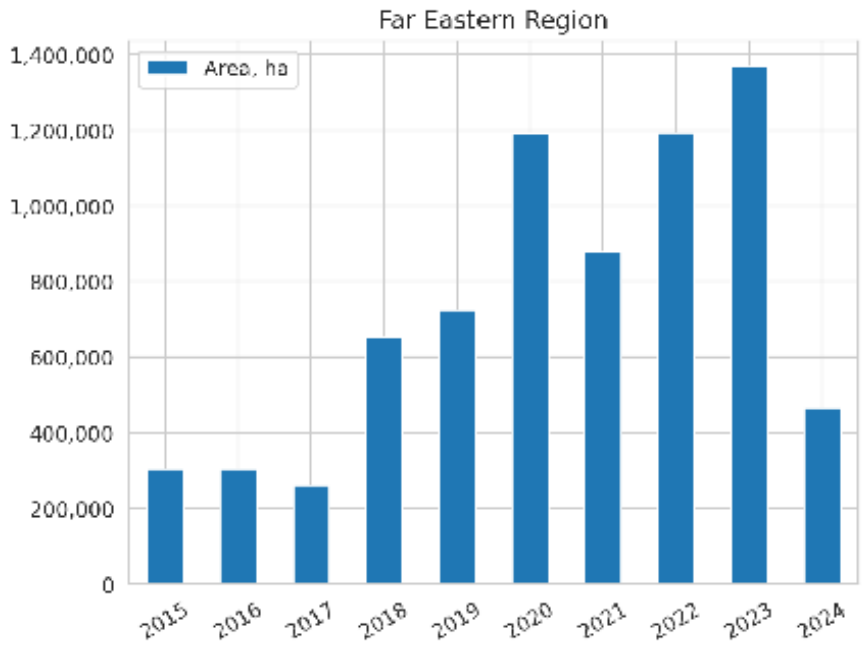


Image 71
La surface brûlée par les incendies en Extrême-Orient russe : le graphique comprend les données pour les régions du Kraï de Khabarovsk, de Kamtchatka, de Magadan, District autonome de Tchoukotka, Oblast de Sakhaline, Kraï de Primorié et autres.

Source : FBU "Avialesookhrana" (les données pour 2024 sont incomplètes).

Ainsi, des tendances similaires à l'augmentation des incendies sont observées sur l'autre bordure du bloc tectonique sibérien et de l'Extrême-Orient, à la limite avec la plaque du Pacifique.

Il est supposé que l'intrusion du panache sibérien pourrait également influencer le région des Kouriles et du Kamtchatka, qui constitue l'extrémité du bloc continental de la croûte terrestre, soumis à la pression du panache. L'analyse des données sismiques dans la région du Kamtchatka et des îles Kouriles montre une augmentation marquée du nombre de séismes de magnitude 4,0 et plus (Images 72, 73). Cette région fait partie de l'Anneau de Feu du Pacifique (Image 74) et montre la tendance à l'intensification de la sismicité propre à cette structure tectonique. Cependant, de nombreux pics d'activité sismique semblent indépendants. Cela pourrait indiquer que le panache sibérien exerce une influence propre sur la région du Kamtchatka et des îles Kouriles.

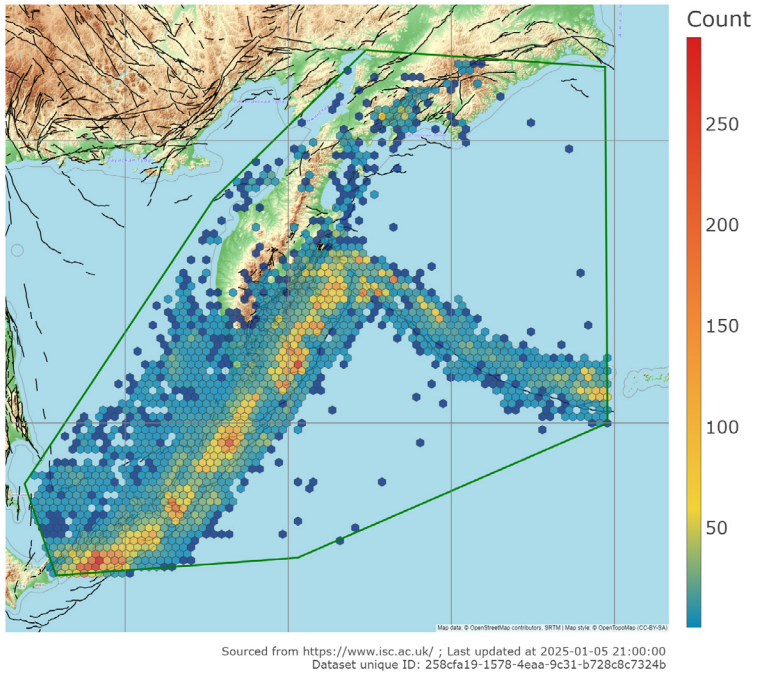


Image 72
Densité des séismes de magnitude 4,0 et plus dans la région de la péninsule du Kamtchatka et des îles Kouriles, de 1979 à 2024.

Source : base de données de l'ISC.

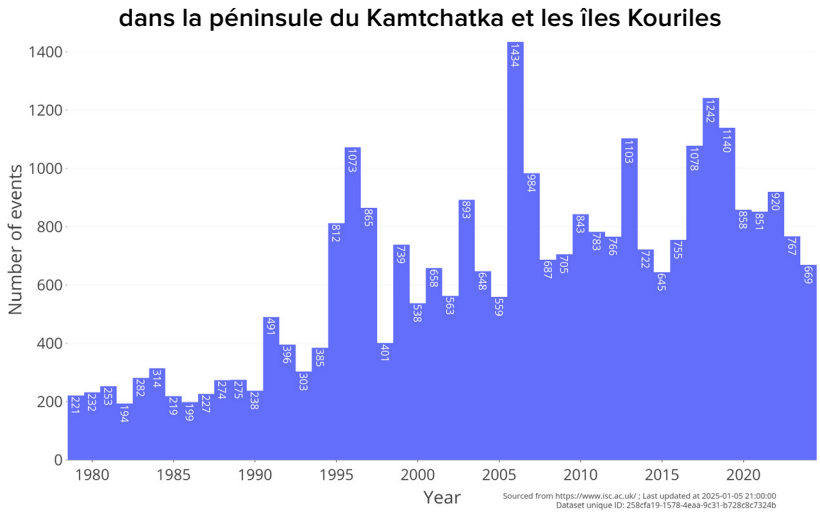


Image 73
Augmentation du nombre de séismes de magnitude 4,0 et plus dans la région de la péninsule du Kamtchatka et des îles Kouriles, de 1979 à 2024.

Source : base de données de l'ISC.

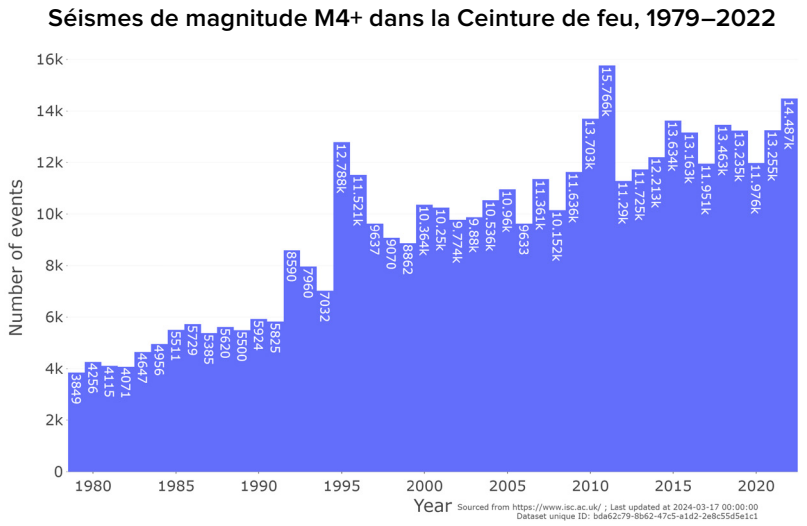


Image 74
La croissance du nombre de séismes de magnitude 4,0 et plus dans la région de l'Anneau de Feu du Pacifique, de 1979 à 2022.

Source : base de données de l'ISC.

Il est important de noter que la profondeur des séismes dans la région du Kamtchatka et des îles Kouriles est également en augmentation (Image 75).

Cela indique que l'interaction des plaques lithosphériques deviendrait de plus en plus dynamique sous l'influence probable du panache magmatique sibérien. On peut s'attendre à une augmentation de l'activité volcanique dans la région des Kouriles et du Kamtchatka, à l'apparition d'anomalies liées à la remontée rapide de magma profond, ainsi qu'à une évolution plus rapide de la composition du magma lors des éruptions volcaniques, avec une transition vers un magma plus mafiques. Un exemple d'une transition similaire rapide vers des sources plus profondes a été observé lors de l'éruption du volcan Bezymianny en 2017[45].

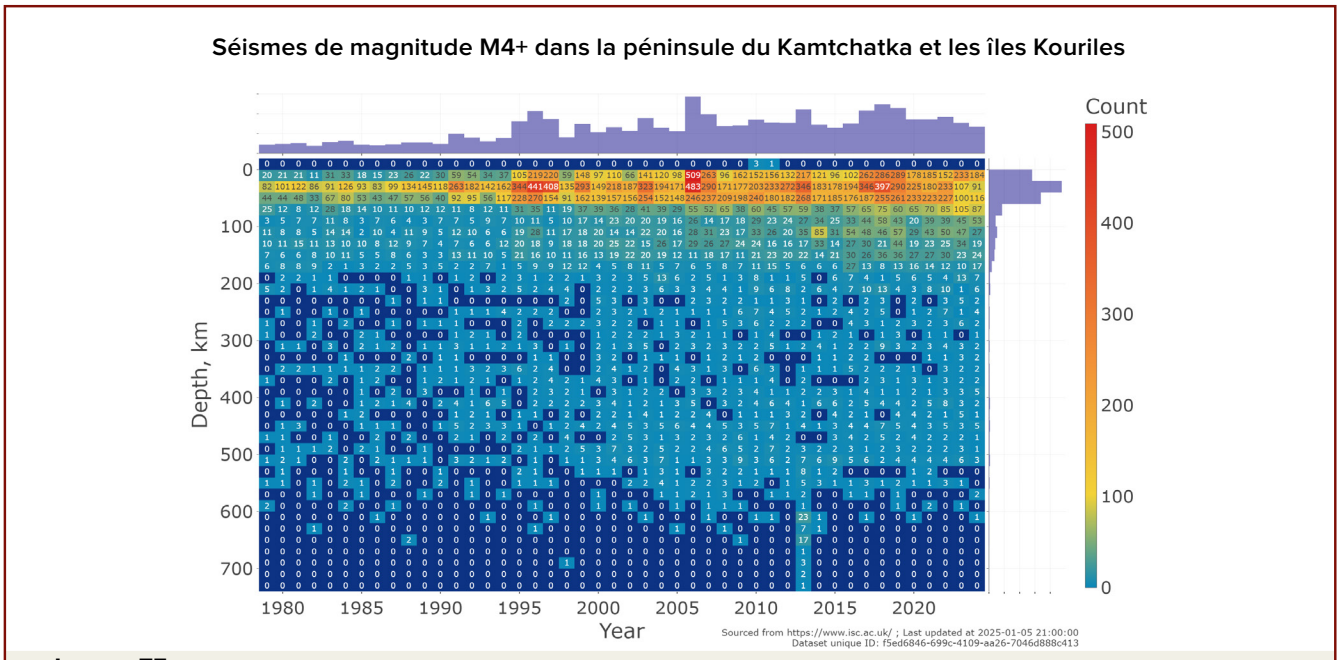


Image 75
Répartition des séismes de magnitude 4,0 et plus enregistrés dans la zone sélectionnée, dans la région du Kamtchatka et des îles Kouriles, entre 1979 et 2024, en fonction de leur profondeur.
Source : base de données de l'ISC

[45] V.O. Davydova, V.D. Shcherbakov, P.Yu. Plechov, I.Yu. Koulakov, Petrological evidence of rapid evolution of the magma plumbing system of Bezymianny volcano in Kamchatka before the December 20th, 2017 eruption, Journal of Volcanology and Geothermal Research, Volume 421, 2022, 107422, ISSN 0377-0273, https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2021.107422

L'augmentation de la sismicité, des incendies de forêt et des anomalies d'activité volcanique constitue des effets secondaires du soulèvement du bloc sibérien de la croûte terrestre qui subit la pression croissante du panache sibérien.

L'accroissement de l'activité sismique, non seulement en Sibérie, mais surtout en périphérie de la plaque de la Sibérie occidentale et du craton de la Sibérie orientale, indique que le soulèvement de la plaque sous la pression du panache magmatique a déjà commencé. Cela démontre un impact massif et significatif du panache sur la plaque lithosphérique.

Les modèles classiques postulaient que les panaches mantelliques entraînaient, au cours de leur montée et du réchauffement du manteau, un soulèvement important de la surface pouvant atteindre 2 km, avant que le magma la perce. Or, les preuves géologiques ne montrent aucun signe d'un tel soulèvement dans la région des Trapps de Sibérie, qui se sont formés il y a 250 millions d'années sous l'influence d'un panache magmatique majeur. Une étude menée par des scientifiques des instituts de Russie, d'Allemagne et de France sur les roches magmatiques des Trapps de Sibérie a permis d'établir[46] un nouveau modèle : au lieu de provoquer un soulèvement en forme de bulle, le panache a progressivement érodé la lithosphère par en dessous (Image 76).

Lorsque cette érosion au niveau du contact entre le matériel en fusion du panache et la lithosphère supérieure a atteint une profondeur de 50 km, des éruptions massives de lave ont alors commencé à la surface.

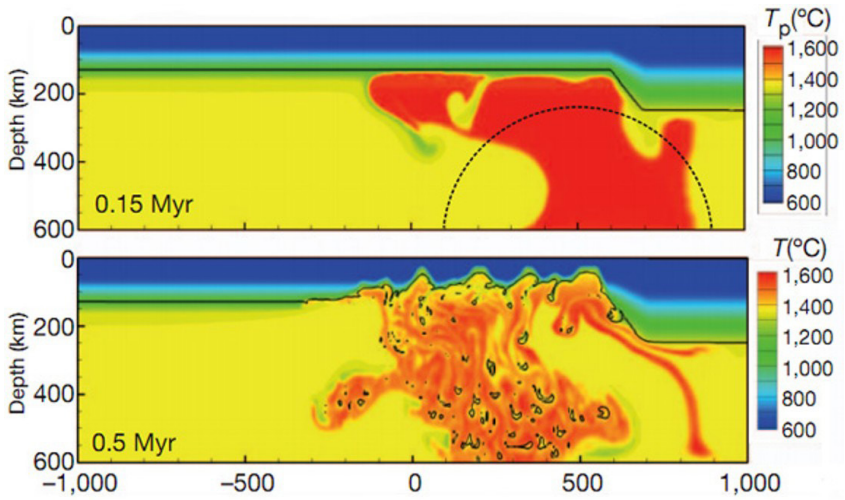


Image 76

Reconstruction des étapes initiales de formation des Trapps de Sibérie.

Sur l'axe vertical – profondeur (km). Les différentes couleurs indiquent la température des roches. La position initiale de la tête du panache mantellique est indiquée par un demi-cercle en pointillé. Le panache atteint la limite inférieure de la lithosphère (ligne noire continue) et se « répand » en dessous.

En bas – la tête du panache, grâce à l'érosion (on voit des fragments de la lithosphère s'enfonçant dans les profondeurs), a tracé son chemin à travers le manteau supérieur jusqu'à la croûte terrestre. Cela correspond au début de la phase principale du magmatisme des Trapps.

Source : Sobolev, S. V., Sobolev, A. V., Kuzmin, D. V., Krivolutskaya, N. A., Petrunin, A. G., Arndt, N. T., Radko, V. A., & Vasiliev, Y. R. (2011). Linking mantle plumes, large igneous provinces and environmental catastrophes. Nature, 477, 312-316.

[46] Sobolev, S. V., Sobolev, A. V., Kuzmin, D. V., Krivolutskaya, N. A., Petrunin, A. G., Arndt, N. T., Radko, V. A., & Vasiliev, Y. R. (2011). Linking mantle plumes, large igneous provinces and environmental catastrophes. Nature, 477, 312-316. DOI: 10.1038/nature10385

L'activité moderne du panache suit probablement le même mécanisme. Par conséquent, un soulèvement localisé important de la surface en un seul point où la tête du panache s'enfonce n'est pas prévu. Cependant, ce mécanisme n'exclut pas un soulèvement régional étendu de l'ensemble de la plate-forme de Sibérie orientale d'une faible ampleur. Selon la modélisation tectonophysique, même un soulèvement aussi mineur suffirait à déclencher des percées de magma, libérant des matières en fusion sous haute pression et provoquant un événement catastrophique.

Le centre présumé de la tête du panache se situe dans la région au nord du plateau de Putorana, à environ 225 km au nord-est de Norilsk. En outre, les percées affecteraient l'ensemble de la mince plaque de Sibérie occidentale, où d'anciennes sutures (des failles et des failles profondes dans la croûte terrestre) sont susceptibles de se rouvrir.

Les preuves de l'inévitabilité de l'éruption du panache sibérien

Le risque élevé de percées de magma du panache sibérien moderne dans la période actuelle est dû aux conditions suivantes :

Au cours des 30 dernières années, la Terre a connu une augmentation progressive des anomalies géophysiques, qui sont la conséquence directe de l'intensification de l'énergie thermique près du noyau de la planète par des forces extérieures. Cependant, la situation actuelle diffère considérablement de la période précédente. **D'ici la fin de 2024, la planète entrera dans une phase d'influence énergétique accrue sur son noyau. Les calculs indiquent que d'ici 2030, nous atteindrons le pic de cette phase.**

Un facteur critique qui aggrave la situation est la pollution mondiale des océans due aux influences anthropiques, notamment par les hydrocarbures, les microplastiques et les nanoplastiques. Cette pollution a considérablement modifié la conductivité thermique de l'eau des océans, altérant sa capacité à dissiper efficacement la chaleur provenant de l'intérieur de la Terre. Historiquement, l'océan a agi comme le principal régulateur thermique de la planète, mais il a maintenant perdu une partie importante de sa capacité de conduction de la chaleur. Il en résulte une accumulation anormale d'énergie thermique dans le manteau, ce qui entraîne sa fonte à un rythme sans précédent dans l'histoire de la Terre.

Les études géophysiques indiquent une augmentation spectaculaire du nombre de séismes de profondeur, qui sont des indicateurs directs de la fusion active du manteau. Le volume croissant de magma en fusion exerce une pression immense sur la croûte terrestre. Ce processus est analogue au gonflement d'un ballon. À terme, la pression dépassera la résistance de la croûte, ce qui entraînera une rupture.

La région sibérienne est particulièrement vulnérable à ces processus en raison de sa structure géologique unique, car un puissant panache mantellique (un flux ascendant de matière en fusion provenant du manteau) s'élève sous la zone. Ce panache a été déclenché par le déplacement du noyau dans cette direction en 1997-1998. Les anomalies de température croissantes en Sibérie indiquent que le volume de magma sous le craton sibérien continue de croître de manière exponentielle. Sur la base des données géologiques et des observations récentes, il est fort probable que le panache sibérien soit entré dans une phase critique de préparation à une éruption.

Ce qui est particulièrement préoccupant, c'est le fait qu'une situation critique se crée simultanément dans la fosse des Mariannes, le point le plus profond du plancher océanique, où la croûte est la plus mince et la plus vulnérable. Cette région connaît également une montée de magma fondu, accompagnée d'une augmentation significative de l'activité sismique. La menace d'une rupture océanique ici pose un scénario réaliste de destruction planétaire.

Deux scénarios potentiels peuvent se dérouler. Le premier implique l'éruption du panache sibérien, qui pourrait se produire à tout moment en raison de la pression croissante du magma. Le second implique une rupture dans la fosse des Mariannes, qui pourrait précéder la catastrophe sibérienne. Le panache sibérien n'entrerait pas en éruption si la rupture de la fosse des Mariannes se produisait en premier.

L'histoire géologique de Mars fournit un exemple frappant des conséquences d'un tel scénario : la vallée de Mariner témoigne silencieusement d'une catastrophe similaire, où l'éruption d'un panache sous un océan a eu des conséquences catastrophiques pour l'ensemble de la planète.

Selon les calculs basés sur les tendances actuelles de l'activité géophysique, le point de rupture critique de la fosse des Mariannes pourrait être atteint d'ici 2036. Cependant, il est important de reconnaître que ce calendrier est conditionnel. La croûte terrestre en Sibérie pourrait succomber à une pression croissante beaucoup plus tôt. Compte tenu de la trajectoire actuelle des événements, une rupture du panache sibérien ou de la fosse des Mariannes semble être une conséquence inévitable des processus qui se produisent dans les profondeurs de la Terre. La seule incertitude réside dans le moment et le lieu exacts de la catastrophe, et non dans la certitude de son approche.

Examinons trois scénarios possibles pour le développement de la situation avec le panache sibérien. Le premier scénario est une percée soudaine et ponctuelle du panache sibérien. Le deuxième scénario implique des éruptions de lave lentes et progressives en Sibérie, similaires à la formation des Trapps de Sibérie. Le troisième scénario se produit si l'humanité prend les mesures nécessaires pour dégazer les points chauds magmatiques secondaires du panache sibérien dans la croûte terrestre.

Scénario 1 :
Une éruption instantanée et ponctuelle du panache sibérien

Une analyse comparative des événements géologiques historiques peut être utilisée pour estimer les dommages potentiels d'une éruption soudaine du panache sibérien. Cependant, il est important de considérer que les conditions actuelles sur Terre (en particulier la convergence du cycle le plus intense de 24 000 ans avec la pollution anthropique du principal système de refroidissement de la planète, les océans) sont sans précédent. C'est pourquoi une percée soudaine du panache sibérien est considérée comme le scénario le plus probable si l'humanité ne prend aucune mesure pour atténuer ses risques.

Pour évaluer l'ampleur des éruptions volcaniques, on utilise le volume de matériau éjecté. Par exemple, lors de l'une des éruptions les plus puissantes du supervolcan de Yellowstone, survenue il y a 2,1 millions d'années, le volume de magma éjecté était d'environ 2 500 km^3, ce qui a été déterminé par les études des dépôts de tuf en Amérique du Nord.[47] Cette éruption a propulsé des cendres et des gaz jusqu'à une altitude de 50 kilomètres, atteignant la limite supérieure de la stratosphère. Une échelle similaire a été observée lors de l'éruption du supervolcan Toba, sur l'île de Sumatra, qui s'est produite il y a environ 72 000 à 74 000 ans et qui fut la plus puissante des 25 derniers millions d'années.

[47] Swallow, E. J., Wilson, C. J. N., Charlier, B. L. A., & Gamble, J. A. (2019). The Huckleberry Ridge Tuff, Yellowstone: evacuation of multiple magmatic systems in a complex episodic eruption. Journal of Petrology, 60, 1371-1426. https://doi.org/10.1093/petrology/egz034

Selon diverses estimations, le volume du matériau éjecté lors de l'éruption des Trapps de Sibérie il y a environ 250 millions d'années variait entre 3 et 4 millions de km^3 de lave et de tufs[48] (Image 77). Cela signifie que l'éruption des Trapps de Sibérie était 1 000 fois plus importante en termes de matériau éjecté que les éruptions les plus puissantes connues de la caldeira de Yellowstone ou du supervolcan Toba.

Compte tenu du caractère soudain d'une éventuelle éruption du panache sibérien, son activation pourrait entraîner un événement d'une ampleur 1 000 fois supérieure à ces éruptions historiques, telles que celles de la caldeira de Yellowstone ou du supervolcan Toba.

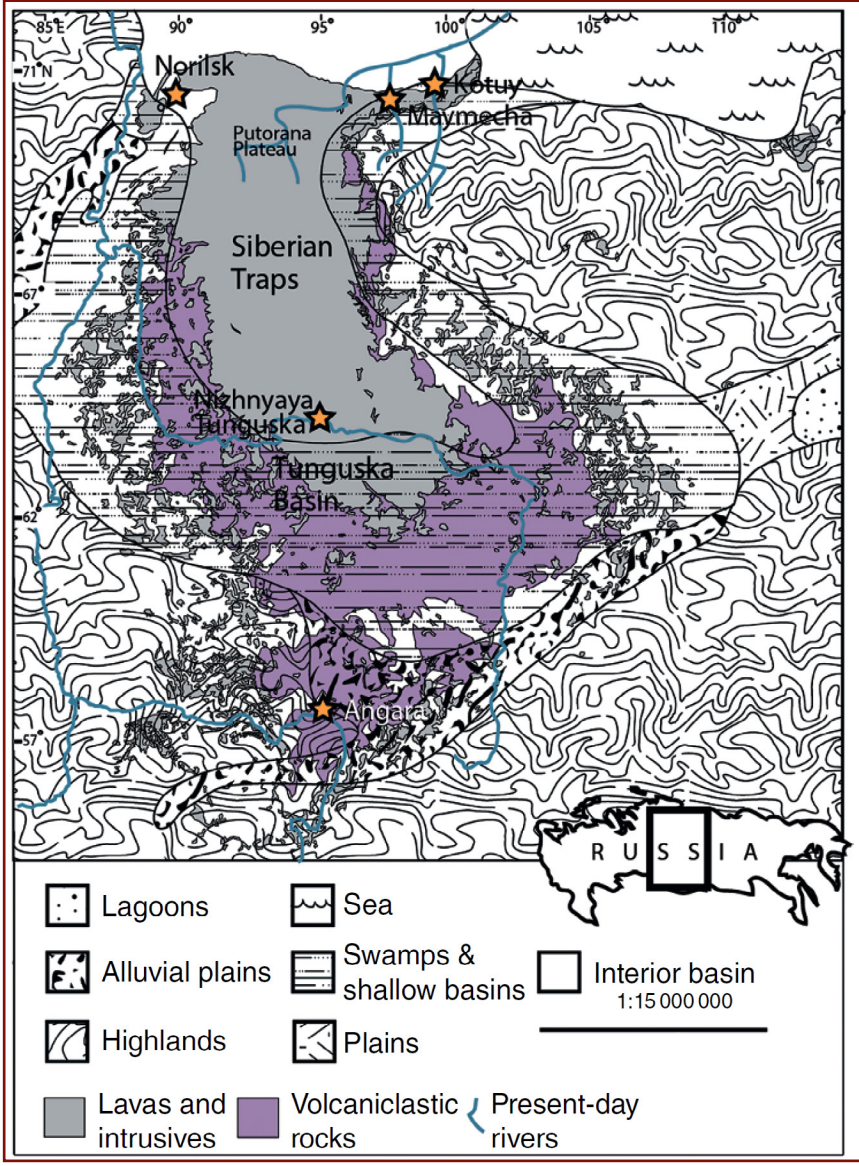


Image 77
Carte paléogéographique des Trapps de Sibérie illustrant l'ampleur des principaux écoulements volcanoclastiques et des régions associées aux Trapps de Sibérie. Elle est basée sur les données de Malich et al. (1974), Polozov et al. (2010) et Black et al. (2015), avec une paléogéographie simplifiée du Permien supérieur adaptée de Czamanske et al. (1998).

Source : Black, B., Mittal, T., Lingo, F., Walowski, K., & Hernandez, A. (2021). Assessing the Environmental Consequences of the Generation and Alteration of Mafic Volcaniclastic Deposits During Large Igneous Province Emplacement. In R. E. Ernst, A. J. Dickson, & A. Bekker (Eds.), Geophysical Monograph Series (pp. 117-131). Wiley. https://doi.org/10.1002/9781119507444.ch5

[48]Black, B., Mittal, T., Lingo, F., Walowski, K., & Hernandez, A. (2021). Assessing the Environmental Consequences of the Generation and Alteration of Mafic Volcaniclastic Deposits During Large Igneous Province Emplacement. In R. E. Ernst, A. J. Dickson, & A. Bekker (Eds.), Geophysical Monograph Series (pp. 117-131). Wiley. https://doi.org/10.1002/9781119507444.ch5

L'hypothèse est qu'une percée soudaine du panache sibérien entraînerait une éruption explosive, formant une caldeira unique. Selon cette hypothèse, la caldeira créée par la percée du panache sibérien couvrirait une superficie d'environ 75 000 km^2, avec un rayon d'environ 150 km ou des dimensions de 380 km sur 250 km. Lors de l'éruption des Trapps sibériens il y a 250 millions d'années, la zone inondée par la lave, telle que documentée dans la littérature,[49] s'étendait de 4 à 7 millions de km^2[50]. Une couverture terrestre d'une ampleur similaire pourrait être affectée dans cet événement.

L'idée selon laquelle les coulées de lave sont les phénomènes volcaniques les plus dangereux est une idée fausse. En réalité, les cendres deviennent souvent la principale cause de conséquences fatales. Dans le cas des supervolcans caractérisés par une forte explosivité, une partie importante du magma ne se transforme pas en lave. Au lieu de cela, il se fragmente lors de l'explosion, produisant d'énormes quantités de cendres volcaniques fines, des fragments brûlants de particules rocheuses acérées et irrégulières qui se dispersent dans l'atmosphère. L'inhalation de ces cendres forme un mélange semblable à du ciment dans les poumons humains, entraînant une mort inévitable.

Il est estimé que lors d'une éruption du panache sibérien, le rayon de dispersion de ces cendres brûlantes atteindrait environ 9 000 km, couvrant une superficie d'environ 255 millions de km^2. Étant donné que la superficie totale de la Terre est légèrement supérieure à 510 millions de km^2, la zone affectée par les cendres, où la respiration deviendrait impossible, engloberait environ la moitié de la planète, soit environ 50 % de la surface terrestre.

Ainsi, une percée soudaine du panache sibérien devrait générer trois zones impactées potentiellement mortelles.

La **première zone impactée (zone centrale)** est une région d'un rayon de 150 km, centrée dans la partie nord-ouest du plateau de Putorana, où la caldeira devrait se former (Image 78). Cette zone englobe les villes de Norilsk, Dudinka et Talnakh dans le Kraï de Krasnoïarsk. Dans cette zone, l'activation du panache entraînerait la destruction instantanée de toutes les structures en raison de l'onde de choc et des flux pyroclastiques brûlants pendant la phase initiale de l'éruption.

La **deuxième zone impactée**, qui s'étend jusqu'à 1 500 km dans un rayon autour du centre, est la zone affectée par les coulées de lave et les matériaux volcaniques lourds (Image 79). Cette zone couvrirait de vastes régions du nord de la Sibérie, notamment le district autonome de Yamalo-Nenets, la péninsule de Taïmyr, certaines parties du district autonome de Khanty-Mansi, le nord du Kraï de Krasnoïarsk, l'ouest de la Yakoutie et la partie nord-est européenne de la Russie. Les principales villes situées dans ce rayon sont Igarka, Novy Ourengoï, Nadym, Salekhard, Vorkouta, Naryan-Mar, Mirny, Kogalym, Lesosibirsk, Sourgout, Krasnoïarsk, Khanty-Mansïïsk, Tomsk et Nijnevartovsk.

Dans les premières heures de l'éruption, ce territoire serait soumis à des flux rapides de gaz brûlant, de cendres et de lave se déplaçant à des vitesses pouvant atteindre 700 km/h. Ces flux anéantiraient toute vie et toute infrastructure, ensevelissant la région sous une épaisse couche de matériaux volcaniques et consumant les ressources naturelles.

[49] Fedorenko, V. A., Lightfoot, P. C., Naldrett, A. J., Czamanske, G. K., Hawkesworth, C. J., Wooden, J. L., & Ebel, D. S. (1996). Petrogenesis of the Flood-Basalt Sequence at Noril'sk, North Central Siberia. International Geology Review, 38(2), 99-135. https://doi.org/10.1080/00206819709465327

[50] Ivanov, A.V., He, H., Yan, L., Ryabov, V.V., Shevko, A.Y., Palesskii, S.V., Nikolaeva, I.V., 2013. Siberian Traps large igneous province: Evidence for two flood basalt pulses around the Permo-Triassic boundary and in the Middle Triassic, and contemporaneous granitic magmatism. Earth-Science Reviews, 122, pp.58–76. Available at: https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.04.001

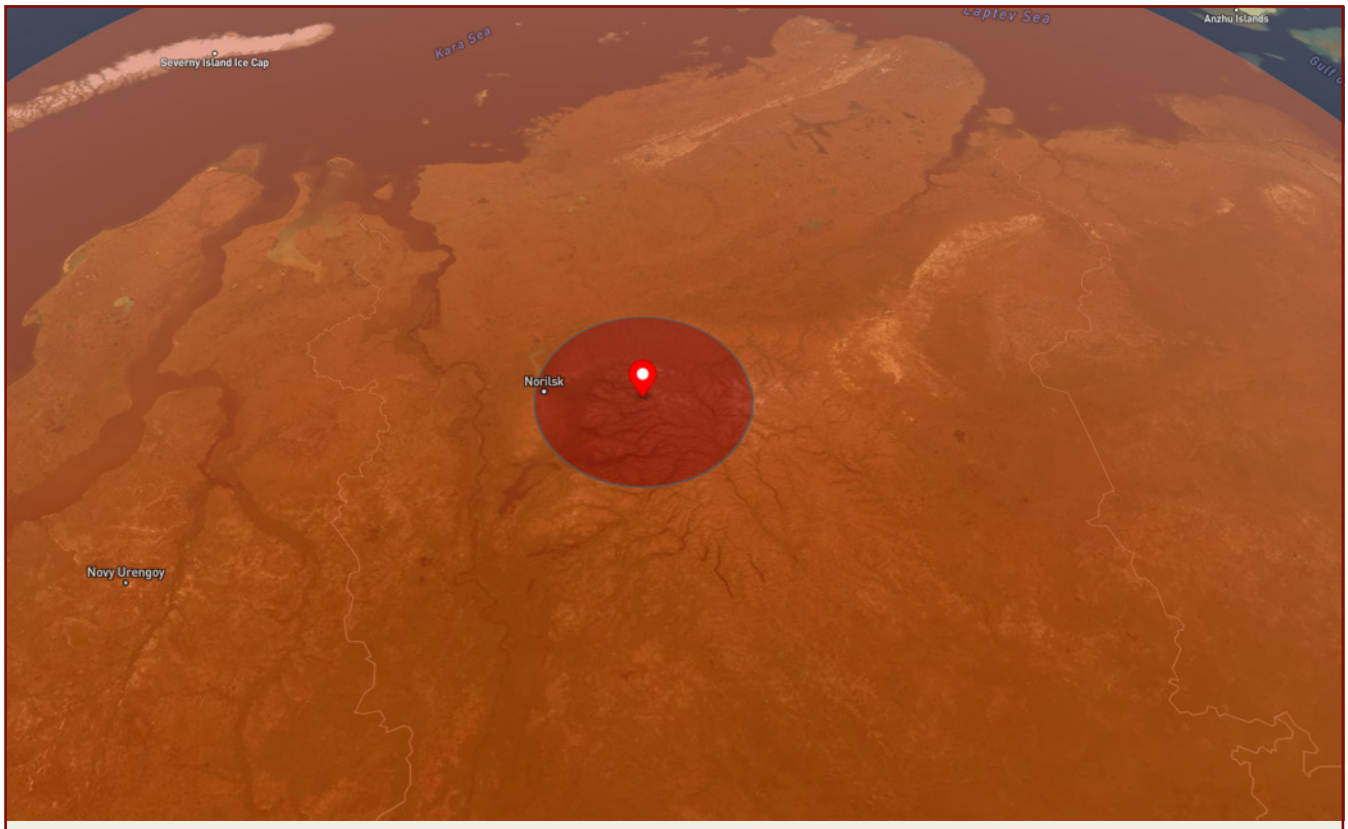


Image 78
La zone de la formation de la caldeira est indiquée en rouge, avec un rayon approximatif de 150 km.

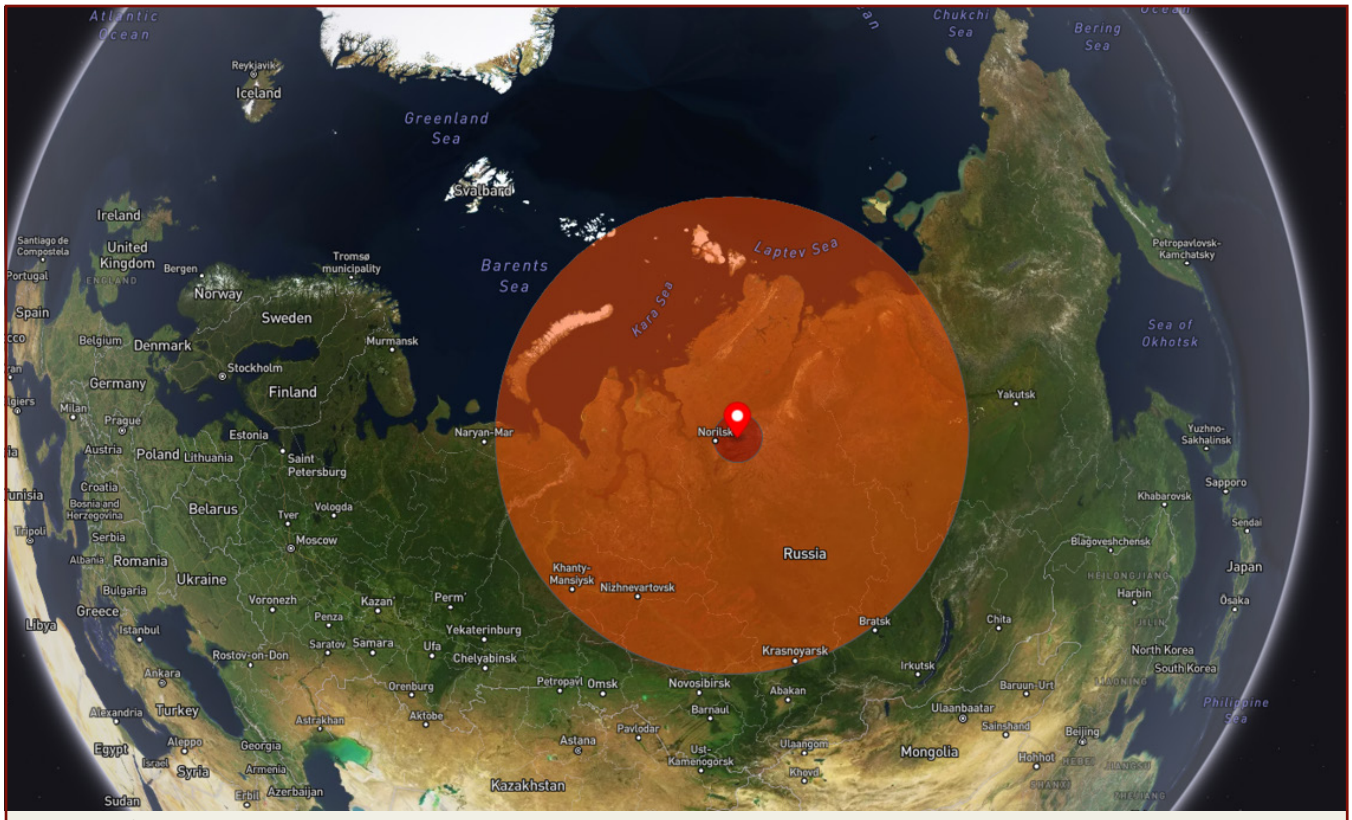


Image 79
La zone des coulées de lave et des retombées pyroclastiques lourdes est indiquée en orange, avec un rayon approximatif de 1 500 km.

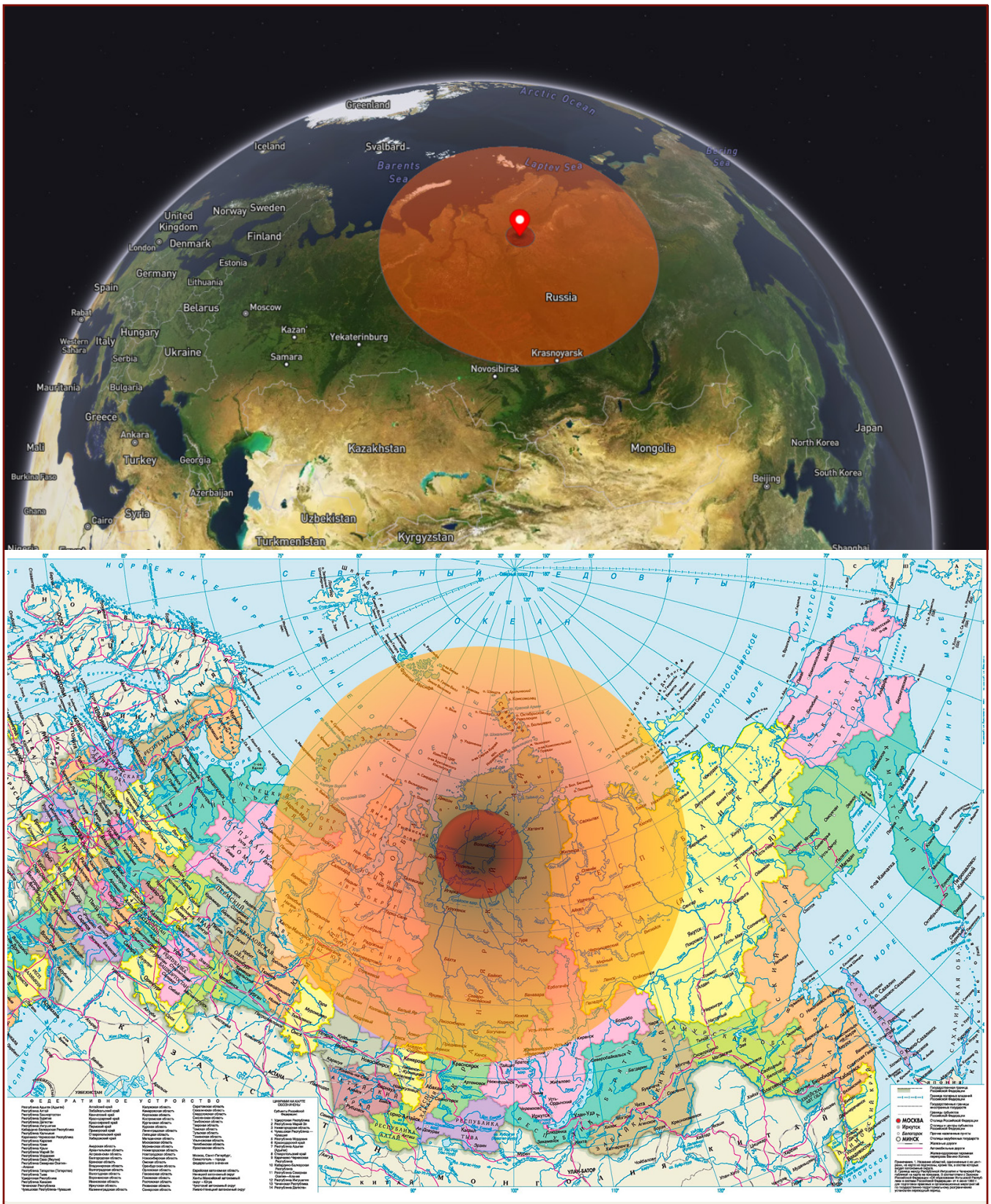


Image 79
La zone des coulées de lave et des retombées pyroclastiques lourdes est indiquée en orange, avec un rayon approximatif de 1 500 km.

La **troisième zone impactée**, d'un rayon d'environ 9 000 km, englobe la zone de dispersion des matériaux pyroclastiques fins et des cendres volcaniques, couvrant environ 50 % de la surface de la Terre (Image 80).

Au cours de la phase initiale (les premières 24 heures après l'éruption), les retombées de cendres affecteront principalement les territoires de la Fédération de Russie, de l'Asie continentale, de l'Europe, de la péninsule arabique, de la partie nord du continent africain et de l'Amérique du Nord. Au cours des 7 à 10 jours suivants, les masses de cendres devraient s'étendre au continent australien, à l'Amérique du Sud et à l'Antarctique.

Image 80
La zone de dispersion des cendres volcaniques fines est indiquée en jaune, avec un rayon approximatif de 9 000 km.

Image 80
La zone de dispersion des cendres volcaniques fines est indiquée en jaune, avec un rayon approximatif de 9 000 km.

Les recherches sur les processus géologiques indiquent que l'activation du panache sibérien déclencherait une série de phénomènes catastrophiques supplémentaires. Il s'agit notamment de la génération d'une puissante onde de choc, de la survenue de puissants tremblements de terre (d'une magnitude d'environ 10), de la formation de tsunamis destructeurs et de l'éveil potentiel d'autres systèmes volcaniques majeurs sur Terre. L'énergie libérée lors de l'éruption pourrait déclencher une réaction en chaîne, activant des supervolcans et de vastes régions volcaniques à travers la planète. Ces conclusions sont basées sur des calculs mathématiques des processus énergétiques et de leur impact sur la croûte terrestre.

Ensuite, nous examinerons les facteurs de risque supplémentaires menaçant l'humanité en raison de la percée soudaine du panache sibérien.

L'onde de choc

Selon les données accessibles au public, une éruption du supervolcan de Yellowstone pourrait libérer une énergie équivalente à environ 900 000 mégatonnes et déclencher un séisme de magnitude 11,2. Étant donné que l'échelle de magnitude est logarithmique (chaque augmentation d'une unité correspond à une multiplication par 32 de l'énergie libérée), une éruption du panache sibérien, estimée 1 000 fois plus puissante que celle de Yellowstone, pourrait provoquer un séisme de magnitude 13,2. Cela représenterait une puissance 350 000 fois supérieure au plus fort séisme jamais enregistré – le Grand séisme du Chili (magnitude 9,5 en 1960) – et rivaliserait avec l'impact d'une collision avec un grand astéroïde.

L'énergie libérée, de l'ordre de 10^{24} Joules, générerait une onde de choc d'une puissance extrême à l'échelle mondiale. Au centre de l'éruption, la pression atteindrait des niveaux si extrêmes que les roches se vaporiseraient instantanément et seraient projetées dans la haute atmosphère. Une onde de choc supersonique dévasterait des zones situées à des milliers de kilomètres en quelques minutes, à l'image de l'impact de la météorite de Toungouska, mais avec une puissance bien supérieure.

Des incendies massifs ravageraient la taïga sibérienne, ensevelissant de vastes régions sous une épaisse couche de cendres volcaniques. Le pergélisol (permafrost) fondrait rapidement sur des milliers de kilomètres, libérant d'importantes quantités de gaz à effet de serre. Le paysage subirait une destruction massive avec l'activation des failles tectoniques. Les ondes sismiques se propageraient à travers toute la planète, déclenchant d'autres séismes de magnitude supérieure à 10. Dans l'océan Arctique, d'énormes tsunamis de plusieurs centaines de mètres de haut se formeraient, menaçant les côtes de la Russie, du Canada, du Groenland et de la Scandinavie. Des tsunamis secondaires frapperaient les rivages de l'Indonésie, du Japon, de l'Australie ainsi que ceux de l'Amérique du Nord et du Sud. Des perturbations atmosphériques mondiales entraîneraient la formation d'ouragans et de tempêtes d'une intensité exceptionnelle.

L'activation des supervolcans et des systèmes volcaniques

Les ondes sismiques issues de l'éruption du panache sibérien se propageraient non seulement à travers l'atmosphère et la surface terrestre, mais aussi en profondeur dans le manteau. Étant donné que tous les supervolcans sont interconnectés par les couches de magma du manteau, des ondes sismiques d'une telle ampleur devraient déclencher une réaction d'éruptions en chaîne dans les premières 24 heures (Image 81). Les plus grands systèmes volcaniques susceptibles de s'activer incluent les caldeiras de Yellowstone et de Long Valley (Amérique du Nord), les Champs Phlégréens (péninsule des Apennins), Toba (archipel de la Sonde), la caldeira d'Aira (îles japonaises), le complexe volcanique de Taupo (Nouvelle-Zélande).

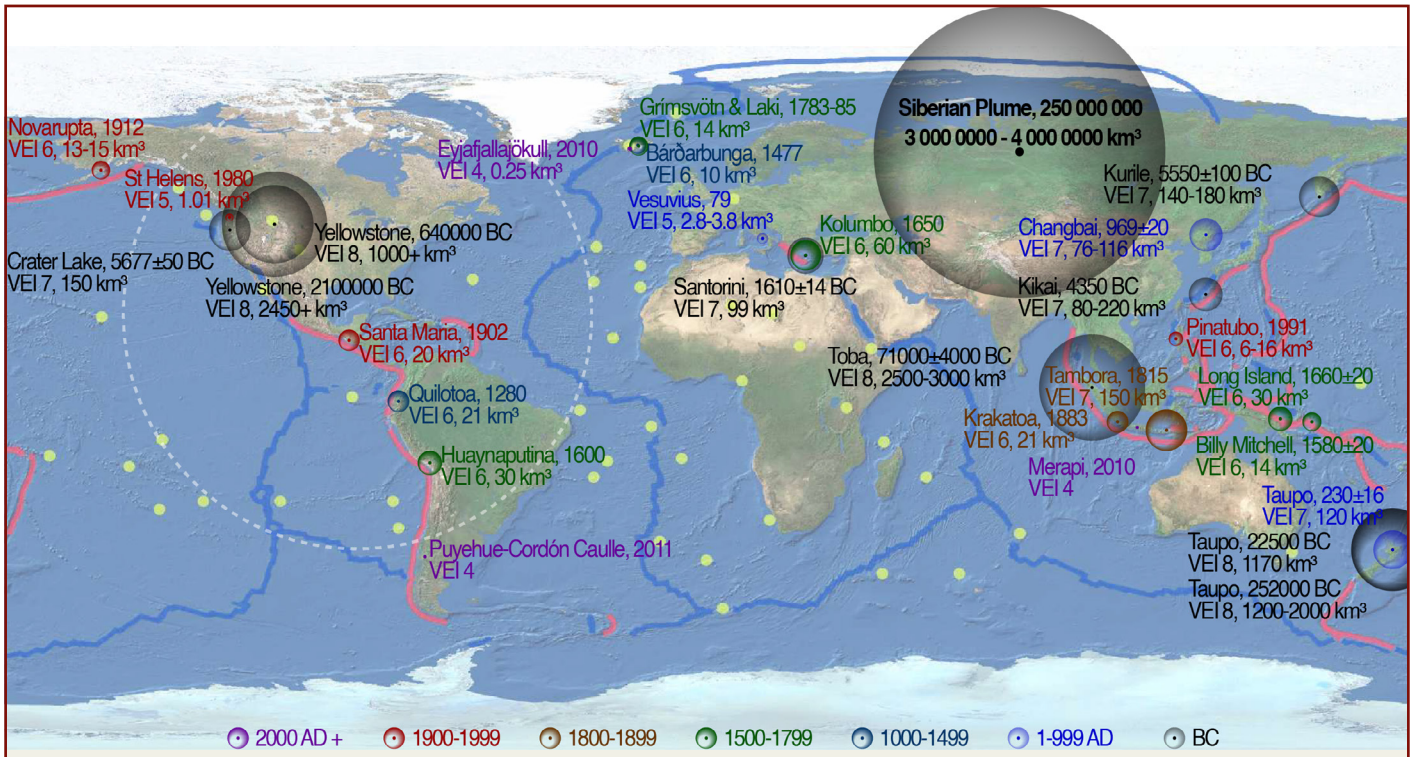


Image 81

La carte montre la répartition mondiale des principales éruptions volcaniques, classées par périodes géologiques du Précambrien à nos jours.

La taille des symboles est proportionnelle au volume de matériau éjecté (en km^3). La carte met en évidence la séquence chronologique des éruptions ayant un Indice d'Explosivité Volcanique (VEI) ≥4, en soulignant des événements tels que Toba (71000 ± 4 000 av. J.-C., 2500–3000 km^3), Yellowstone (640000 av. J.-C., >1000 km^3) et Tambora (1815 apr. J.-C., 150 km^3). Des éruptions comparables sont attendues en cas d'activation du panache sibérien, avec un volume estimé entre 3 et 4 millions de km^3. Les lignes rouges indiquent les limites des plaques tectoniques, illustrant la corrélation spatiale avec l'emplacement des principales éruptions.

En plus des supervolcans, des éruptions pourraient se déclencher dans de nombreux volcans situés le long de la Ceinture de Feu du Pacifique et d'autres zones à sismicité active. Il existe une forte probabilité de réactivation des volcans tels que : le mont Fuji (Japon), le Krakatoa et le Merapi (Indonésie), le Vésuve et l'Etna (Italie), le Popocatépetl (Mexique), les groupes volcaniques du Kamtchatka, des Andes et des ceintures volcaniques d'Alaska, les systèmes volcaniques sous-glaciaires de l'Antarctique occidental.

Des structures volcaniques dormantes pourraient également être réactivées, notamment : le mont Ararat (plateau anatolien), le Kilimandjaro et le Nyiragongo (Rift est-africain), le massif volcanique de l'Elbrouz (Caucase), le volcan Laacher See (Europe centrale), ainsi que des systèmes volcaniques de la péninsule Arabique

Les pluies acides

Le rejet catastrophique de cendres volcaniques et de dioxyde de soufre lors de l'éruption provoquerait des précipitations acides à l'échelle mondiale. Pour illustrer l'ampleur des émissions, on peut se référer à l'éruption du supervolcan Yellowstone il y a 630000 ans, qui a libéré environ 500 mégatonnes de dioxyde de soufre dans l'atmosphère. En extrapolant ce chiffre à une éventuelle éruption du panache sibérien, les émissions pourraient atteindre environ 1 500 000 mégatonnes ($1,5 \times 10^{12}$ tonnes) de SO_2, soit environ un million de fois les émissions du Tambora en 1815, qui avait provoqué "l'Année sans été". Il est important de noter que cette estimation ne prend pas en compte les émissions des autres volcans qui pourraient être activés en réaction en chaîne.

Une telle concentration de dioxyde de soufre entraînerait la formation de particules d'aérosols dans la stratosphère, qui seraient progressivement éliminées sur plusieurs décennies sous forme de pluies acides. La période principale des précipitations acides devrait durer de 3 à 10 ans, en fonction des processus climatiques et de la circulation atmosphérique. Les régions proches de l'épicentre, comme la Sibérie contemporaine, subiraient des précipitations avec un pH inférieur à 1,5, comparable à celui de l'acide sulfurique dilué.

Les effets incluraient une destruction de la végétation (racines, feuilles, branches), un lessivage des minéraux du sol qui le rendrait impropre à toute vie, et une acidification sévère des écosystèmes aquatiques, transformant les plans d'eau en lacs acides toxiques avec un pH de 2 à 3 - des conditions mortelles pour la plupart des formes de vie.

De plus, une infiltration d'acide dans les systèmes d'approvisionnement en eau rendrait l'eau potable impropre à la consommation sans systèmes de filtration avancés. Les infrastructures en ciment, marbre et métaux subiraient une corrosion accélérée en raison des composés sulfatés.

Bien que l'intensité maximale des pluies acides se produise dans les premiers mois suivant l'éruption, les précipitations se localiseraient progressivement à certaines régions spécifiques. Avec l'installation de l'hiver volcanique, une grande partie des précipitations se transformerait en neige, réduisant ainsi l'impact immédiat de l'acidité sur les écosystèmes. Cependant, à ce stade, la destruction mondiale de la flore et de la faune causée par les pluies acides serait déjà irréversible.

Les dégâts infligés aux écosystèmes auraient des conséquences profondes sur les processus naturels et humains bien avant le début du refroidissement climatique global.

L'hiver volcanique

L'éruption du panache sibérien, amplifiée par la réactivation simultanée de nombreux volcans, provoquerait une altération catastrophique du climat et des conditions écologiques mondiales. Les émissions massives de cendres volcaniques, de gaz (principalement SO_2) et d'aérosols formeraient une barrière impénétrable aux radiations solaires pendant des décennies.

La forte concentration d'aérosols sulfatés dans la stratosphère réfléchirait la plus grande partie du rayonnement solaire, perturbant l'équilibre énergétique de la planète. Cela entraînerait une réduction brutale de l'apport thermique qui provoquerait un refroidissement climatique extrême et un état qu'on pourrait appeler "hiver hyper-volcanique". En conséquence de ces processus, la Terre se transformerait en une "boule de glace" où les zones habitables seraient limitées à certaines régions proches de l'équateur.

Ces projections des impacts potentiels sont basées sur des données historiques sur les éruptions significatives. Par exemple, lors de l'éruption maximale du Yellowstone il y a 2,1 millions d'années, les températures mondiales ont diminué en moyenne de 3 à 5°C. Pour l'éruption du panache sibérien, dont la magnitude dépasserait largement cet événement, il est estimé que la température moyenne de la Terre pourrait chuter d'environ 24 à 31°C.

Dans les régions polaires, une réduction de température pourrait atteindre 28 à 36°C ou plus, entraînant le gel complet des grands plans d'eau, y compris de l'Atlantique Nord et de grandes parties de l'océan Pacifique. Les températures dans les latitudes moyennes chuteraient de 24 à 31°C, éradiquant toute végétation et provoquant une extinction massive des organismes.

Les écosystèmes océaniques subiraient une destruction catastrophique. Le gel commencerait à la surface et le long des zones côtières, entraînant l'extinction du biote marin à l'échelle mondiale. Dans les régions équatoriales, les températures devraient chuter de 20 à 27°C, rendant même les zones tropicales trop froides pour soutenir la vie.

Pratiquement toutes les surfaces terrestres deviendraient stériles en raison du froid global, de l'obscurité et de l'arrêt de la photosynthèse. Les chaînes alimentaires s'effondreraient, entraînant l'effondrement de l'agriculture et l'extinction massive de la flore, de la faune et d'une portion significative de l'humanité. Seuls des écosystèmes microbiens isolés, adaptés aux conditions extrêmes, resteraient viables

Les aérosols de sulfate persistants dans la stratosphère continueraient de bloquer la lumière du soleil pendant des décennies. Cependant, les conséquences d'un hiver hyper-volcanique se feraient sentir bien plus longtemps. Même après que les cendres et les aérosols se soient déposés, étant donné les océans gelés, l'expansion des glaciers et les transformations radicales dans la biosphère, la Terre mettrait des centaines voire des milliers d'années à restaurer son climat naturel et son équilibre écologique.

Conclusions sur le scénario 1 : Une éruption instantanée du panache sibérien.

Une éruption instantanée du panache sibérien constituerait un événement géologique et climatique catastrophique, déclenchant des changements dans l'atmosphère, l'hydrosphère et la biosphère à l'échelle globale. Une explosion massive sur le plateau de Putorana anéantirait instantanément tout dans un rayon de 150 km, formant une gigantesque caldeira. Les coulées pyroclastiques et la lave s'étendraient sur un rayon de 1500 km, transformant la Sibérie en un désert brûlé. La moitié de la surface terrestre serait couverte de cendres.

Un séisme allant jusqu'à la magnitude 13,2 causé par l'explosion du panache, générerait des ondes sismiques destructrices, et se propagerait à travers la planète, activant les failles, provoquant des tremblements de terre secondaires et des mégatsunamis de plusieurs centaines de mètres de hauteur, submergeant les zones côtières des continents.

Le rejet de 1,5 million de mégatonnes de dioxyde de soufre (SO_2) entraînerait des pluies acides avec un pH inférieur à 1,5, détruisant les sols, la végétation et les écosystèmes aquatiques. Les plans d'eau deviendraient inhabitables, et la terre perdrait rapidement sa fertilité. L'effondrement de la photosynthèse et des chaînes alimentaires entraînerait l'extinction massive de la flore, de la faune et de la civilisation humaine.

L'activation massive des supervolcans, y compris Yellowstone, Campi Flegrei et Toba, exacerberait les changements climatiques mondiaux en augmentant les émissions de cendres volcaniques, de dioxyde de soufre (SO_2) et d'aérosols. Leur accumulation dans la stratosphère bloquerait la lumière du soleil, provoquant un refroidissement planétaire ("un hiver hyper-volcanique") et une chute des températures de plusieurs dizaines de degrés. Dans les régions polaires, les températures chuteraient de plus de 28 à 36°C; dans les zones tempérées, de 24 à 31°C; et dans les tropiques, de 20 à 27°C. Cela entraînerait le gel des océans, un arrêt de la circulation océanique, l'effondrement des écosystèmes et la formation de glaciers massifs sur la terre ferme.

Les effets d'un hiver hyper-volcanique rendraient la Terre pratiquement inhabitable, avec des conditions naturelles nécessitant des milliers, voire des millions d'années pour se rétablir. Un tel événement marquerait la plus grande extinction de l'histoire géologique de la planète.

Scénario 2 :
Une éruption progressive du panache sibérien

Le deuxième scénario envisage une série progressive d'éruptions et de coulées de lave à travers des fractures et des zones affaiblies de la croûte terrestre, plutôt qu'un seul événement explosif. Ce processus est comparable à la formation des Trapps de Sibérie dans la même région à la fin de la période permienne, il y a 250 millions d'années.

La formation de la province des Trapps de Sibérie est devenue la plus grande manifestation du volcanisme terrestre. À cette époque, la Terre a connu la plus grande catastrophe environnementale de son histoire : l'extinction de masse du Permien–Trias, au cours de laquelle jusqu'à 90 % des espèces marines et 70 % des espèces terrestres ont disparu (Images 82, 83).

Les preuves géologiques[51] Les preuves géologiques 51 indiquent que les éruptions sibériennes ont pu être exceptionnellement explosives (Campbell et al., 1992), avec des dépôts pyroclastiques atteignant des épaisseurs allant jusqu'à 800 mètres (0,5 miles) (Khain, 1985). La nature fortement explosive des éruptions a expulsé des roches sédimentaires provenant de profondeurs atteignant 10 km (6,2 miles).

Image 82 Représentation artistique des éruptions en Sibérie pendant l'événement d'extinction du Permien-Trias.

Illustration : Image de Tigran Nshanyan.

Image 83 Représentation artistique de listrosaures, survivants de l'extinction de masse, dominant un paysage désolé, illustrant les changements de l'écosystème après la crise du Permien-Trias.

Illustration : Julio Lacerda.

[51] Beerling, D.J., Harfoot, M., Lomax, B. & Pyle, J.A., 2007. The stability of the stratospheric ozone layer during the end-Permian eruption of the Siberian Traps. Philosophical Transactions of the Royal Society A, 365, pp.1843–1866. Available at: http://doi.org/10.1098/rsta.2007.2046

L'activité volcanique dans la région s'est manifestée en plusieurs étapes, modifiant radicalement le paysage géologique. Initialement, le magma s'est introduit dans les couches sédimentaires, formant divers corps intrusifs, tels que des filons-couches. Plus tard, le type d'éruption a évolué vers un mode explosif, entraînant la libération de quantités massives de matériaux pyroclastiques et la formation de dépôts volcaniques épais. L'aboutissement de ce processus a été l'éruption de volumes colossaux de lave basaltique, mesurés en centaines de milliers de kilomètres cubes. Le volume total des roches volcaniques, y compris les intrusions, les dépôts pyroclastiques et les coulées de lave, est estimé à environ 3 millions de kilomètres cubes. Il est important de noter que ce chiffre ne reflète que les roches qui ont survécu jusqu'à nos jours, et on peut affirmer avec certitude que l'ampleur initiale des éruptions était bien plus importante, mais qu'elle a été érodée depuis.

La formation des Trapps de Sibérie a entraîné des émissions colossales de dioxyde de carbone (CO_2), de dioxyde de soufre (SO_2), de chlore (HCl) et d'autres composés volatils. Ces gaz ont intensifié de manière significative l'effet de serre, provoquant un réchauffement rapide après un hiver volcanique. Les concentrations de CO_2 dans l'atmosphère ont atteint 8000 ppm, soit 20 fois plus élevées que les niveaux actuels.

En conséquence, la température des mers tropicales est passée de 22–25°C à 30°C, et les océans ont commencé à s'acidifier, tuant les organismes à squelettes carbonatés.

L'émission totale de soufre s'est élevée à jusqu'à 7800 gigatonnes, de chlore jusqu'à 8700 gigatonnes et de fluor jusqu'à 13 600 gigatonnes.[52]

Les cendres volcaniques et les aérosols ont bloqué la lumière du soleil, perturbé la photosynthèse et provoqué une déforestation massive ainsi que l'effondrement des chaînes alimentaires, aggravant l'extinction des espèces végétales et animales.

La crise écologique de cette époque souligne l'ampleur potentielle des conséquences même avec une éruption graduelle du panache sibérien.

Les recherches indiquent que la période des éruptions a été provoquée il y a 250 millions d'années par la montée d'un panache mantellique – un flot massif de magma ascendant provenant des profondeurs de la Terre sous le plateau actuel de Putorana. Un scénario similaire aujourd'hui entraînerait la formation de vastes plateaux de lave, parmi les plus grandes formations géologiques de la planète, anéantissant presque toute vie dans un rayon de milliers de kilomètres, couvrant la Sibérie et les régions voisines. Les archives géologiques révèlent que de telles catastrophes, marquées par le déversement de champs basalts énormes,[53] ont eu lieu à plusieurs reprises, à chaque fois entraînant des extinctions massives étendues (Image 84).

[52] Benjamin A. Black, Linda T. Elkins-Tanton, Michael C. Rowe, Ingrid Ukstins Peate, Magnitude and consequences of volatile release from the Siberian Traps, Earth and Planetary Science Letters, Volumes 317–318, 2012, Pages 363-373, ISSN 0012-821X, https://doi.org/10.1016/j.epsl.2011.12.001

[53] Witze, A. (2017). Earth's lost history of planet-altering eruptions revealed. Nature, 543, 295-296. https://doi.org/10.1038/543295a

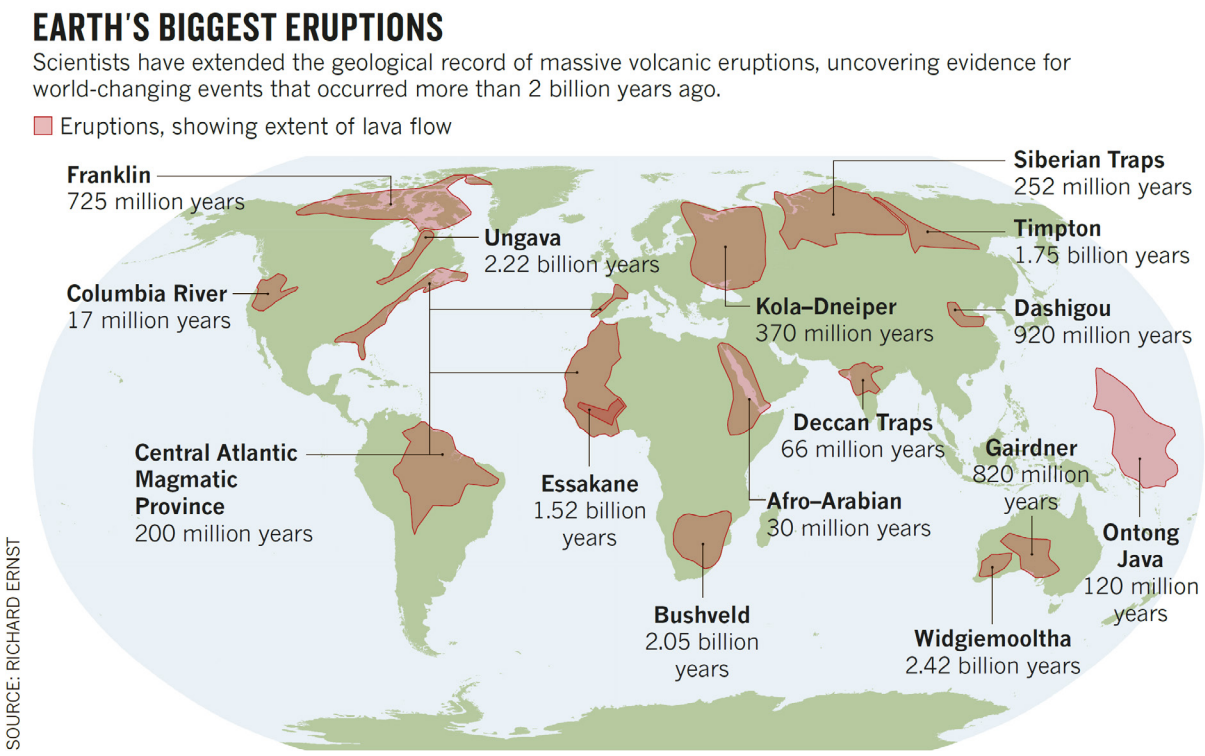


Image 84
La carte montre les localisations géographiques et les âges des plus grandes éruptions volcaniques de l'histoire de la Terre, ainsi que les plateaux de lave associés formés par ces événements.
Illustration : Richard Ernst.
Source : Witze, A. (2017). Earth's lost history of planet-altering eruptions revealed. Nature, 543, 295-296. https://doi.org/10.1038/543295a

Comme dans les époques géologiques précédentes, le magma monterait du manteau, pénétrant dans les fractures de la croûte terrestre, à l'instar d'une substance molle s'infiltrant à travers un filtre dense. Ce processus entraînerait une surchauffe de la surface, la formation de nombreuses intrusions magmatiques intra crustales et la fonte de la lithosphère.

L'image 85 illustre la répartition des roches effusives en Sibérie : les coulées de lave montrées sont en violet, et les corps magmatiques qui se sont solidifiés dans la croûte terrestre sont marqués en vert. Les zones vertes sur la carte mettent en évidence comment le magma a érodé la croûte terrestre, créant des fractures et avançant le long de ces zones affaiblies. Une telle pression accrue du magma pourrait à nouveau initier un processus similaire avec des résultats potentiellement catastrophiques.

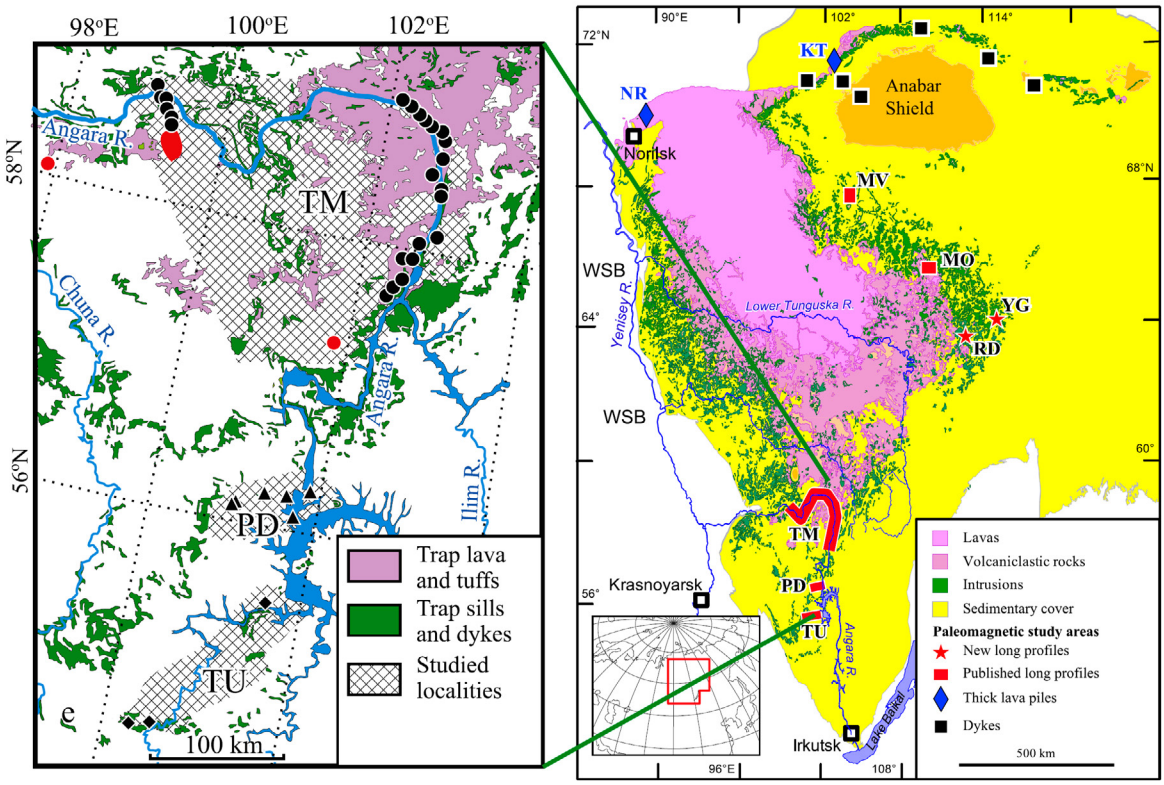


Image 85
La carte à droite offre un aperçu de la province des Trapps de Sibérie (simplifiée et modifiée d'après Svensen et al., 2009), avec des structures géologiques clés marquées par différentes couleurs : rose pour les coulées de lave, vert pour les corps intrusifs et jaune pour le couvert sédimentaire. La carte détaillée à gauche illustre la distribution du magmatisme des Trapps: le violet représente les laves et les tufs, et le vert désigne les sills et les dykes.

Source : Konstantinov, K. M., Bazhenov, M. L., Fetisova, A. M., & Khutorskoy, M. D. (2014). Paleomagnetism of trap intrusions, East Siberia: Implications to flood basalt emplacement and the Permo–Triassic crisis of biosphere. Earth and Planetary Science Letters, 394, 242–253.

Le scénario d'éruption graduelle est comparable à l'explosion soudaine du panache sibérien, mais s'étendant sur une période plus longue. On peut l'envisager comme une séquence de volcans entrant en éruption chaque semaine, accompagnée de fissures soudaines libérant des coulées de lave basaltique à travers la Sibérie occidentale.

L'image 86 illustre ces processus, avec les régions de coulées de lave marquées en violet. La lave s'est étendue sur de vastes zones dans la région de la croûte plus dense et plus stable de la Plateforme de la Sibérie orientale. En revanche, dans la Sibérie occidentale – caractérisée par une croûte plus fine, plus jeune et hétérogène – les éruptions se sont produites le long de dépressions allongées ou de failles. La carte met en évidence les zones de tufs, représentées en rouge, composées de fragments pyroclastiques cimentés et de cendres.

Les éruptions en Sibérie orientale et occidentale seraient très différentes. Sous la Sibérie orientale, le magma rencontre le craton archéen dense, créant une barrière importante. En remontant, le magma « creuse » dans les roches hôtes, se refroidit et s'enrichit en composants volatils. Cela conduit à des éruptions explosives avec des émissions de cendres élevées et la formation potentielle de magma acide et visqueux.

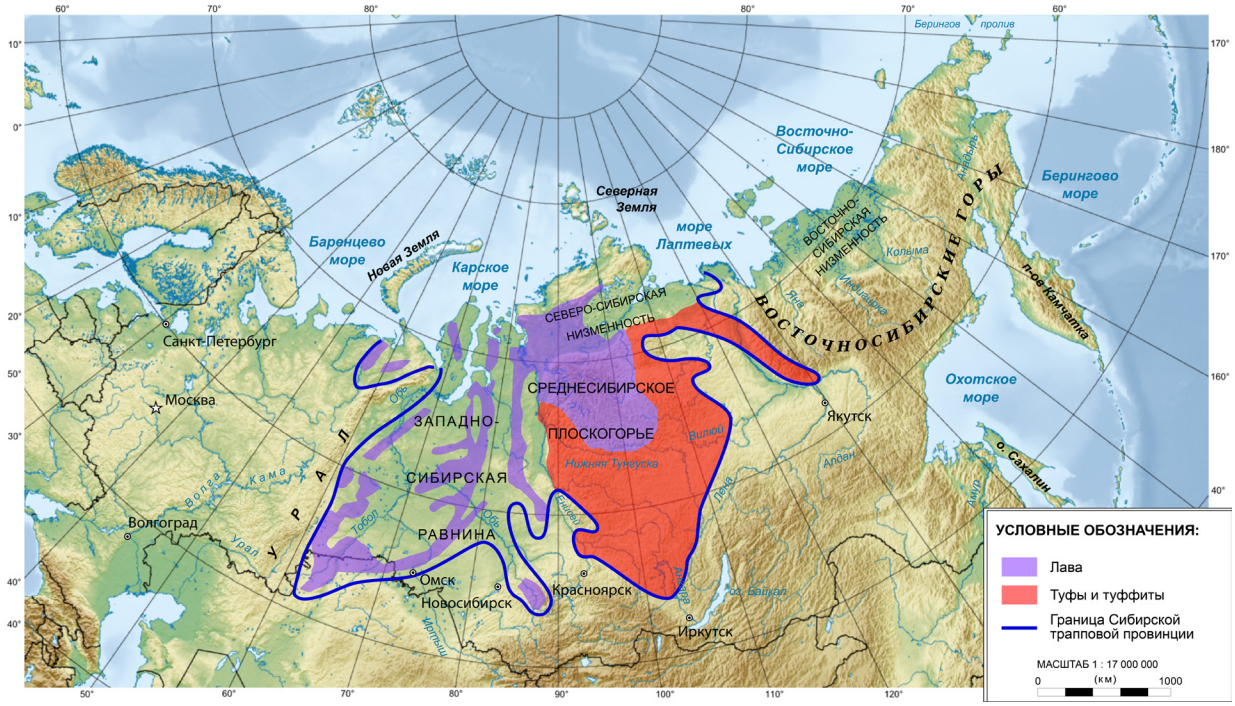


Image 86
La carte de la province des Trapps de Sibérie, montrant les principales structures géologiques, y compris les zones de coulées de lave (violet) et de tufs avec tuffites (rouge). Les lignes bleues indiquent les limites de la province des Trapps de Sibérie.
Source : wikipedia.org, basée sur les données de Masaitis, 1983.

En Sibérie occidentale, avec sa croûte mince et jeune, les éruptions devraient se caractériser principalement par l'écoulement de lave basaltique fluide.

La zone qui devrait être recouverte par les coulées de lave et les tufs s'étend sur environ 7 millions de km^2 à travers la Sibérie occidentale et orientale, soit une superficie comparable à celle de l'Australie actuelle. Cependant, les régions sujettes à la dégradation devraient dépasser des dizaines de millions de kilomètres carrés. Ces territoires connaîtraient des incendies de forêt massifs, une érosion causée par les pluies acides, des chutes de cendres, des glissements de terrain et des lahars transportant des dépôts volcaniques. L'intégralité du pergélisol de Sibérie sera menacée de destruction.

Il est à noter que la péninsule de Taïmyr, à l'ouest du plateau de Putorana, abrite les plus grands gisements mondiaux de nickel, de cuivre et des métaux du groupe du platine, exploités par la société Norilsk Nickel. Ces gisements sont d'origine magmatique et se sont formés il y a environ 250 millions d'années lors des éruptions de la province magmatique des Trapps de Sibérie, ce qui a facilité la création de nœuds de minerai uniques. La forte concentration de nickel dans les magmas de cette époque est probablement liée au transport de matériaux depuis le noyau terrestre vers la surface.

L'ascension du panache de magma sibérien se poursuit, son accélération étant attribuée au déplacement du noyau vers la péninsule de Taïmyr en 1998, comme l'a déterminé le Dr Yuri Barkin. Dans un avenir proche, il existe un risque important de percée du panache sibérien près de la ville de Norilsk, à l'endroit même où un événement similaire s'est produit il y a 250 millions d'années.

Les conséquences de la percée progressive du panache sibérien pour la Russie

Les recherches ont permis de cartographier précisément les emplacements des lentilles fondues asthénosphériques dans la lithosphère du sud de la Sibérie, attribuées à la croûte mince de la région. Cependant, la partie nord de la Sibérie reste sur les cartes sismiques largement inexplorée, représentant une « zone blanche » dans les recherches sur la croûte inférieure et le manteau. Cette absence de données rend impossible la prédiction des lieux des premières percées de lave et des éruptions de magma riche en gaz, d'autant plus que la surveillance souterraine dans la zone du panache sibérien est insuffisante.

Les premiers signes d'un cataclysme imminent incluraient une activité sismique accrue et des émissions de gaz localisées. À mesure que le magma avancerait vers la surface, la fonte rapide du pergélisol commencerait, entraînant la déstabilisation des infrastructures construites sur des sols de permafrost. Le réchauffement du sol pourrait également déclencher des explosions d'hydrates de gaz (méthane piégé dans des structures de glace), provoquant la formation de cratères massifs et la destruction de localités habitées.

Les incendies de forêt massifs, alimentés par la libération de méthane, le réchauffement du sol et l'émission de gaz volcaniques, deviendraient inévitables. Les gisements d'hydrocarbures en Sibérie et les bassins charbonniers comme le Kuzbass pourraient s'enflammer, comme cela s'est produit pendant la période du Permien-Trias,[54] lorsque des gisements de charbon ont été chauffés thermiquement à 600°C.

Les éruptions commenceraient soudainement, affectant plusieurs points à travers un vaste territoire. Des tremblements de terre de magnitudes 7 à 8, combinés à des fissures et des failles, entraîneraient des coulées de lave couvrant des centaines de milliers de kilomètres carrés. Autour des percées de lave, des émissions toxiques provoqueraient des décès massifs parmi les plantes, les animaux et les humains, formant un "cocktail" mortel dans l'atmosphère.

Dans les premiers jours, des millions de personnes périraient. Les cendres volcaniques détruiraient les réseaux de transport, s'accumulant sur les routes et les voies ferrées, réduisant la visibilité et dévastant l'infrastructure. L'aviation cesserait complètement en raison du danger que les cendres représentent pour les moteurs d'avion.

La fonte du pergélisol aggraverait encore la crise : les routes de transport, les pipelines, les bâtiments et l'infrastructure commenceraient à s'effondrer. De nombreuses villes perdraient l'accès à l'eau, à la nourriture et à l'électricité, déclenchant une crise humanitaire. L'évacuation massive serait impossible dans une grande partie de la zone d'éruption, car la lave, les gaz, les incendies et les pluies acides rendraient les routes de transport inutilisables. La panique envahirait des millions de personnes, et les efforts pour relocaliser la population de Sibérie mèneraient à une instabilité sociale et à des troubles généralisés.

[54] Elkins-Tanton, L. T., Grasby, S. E., Black, B. A., Veselovskiy, R. V., Ardakani, O. H., & Goodarzi, F. (2020). Field evidence for coal combustion links the 252 Ma Siberian Traps with global carbon disruption. Geology, 48(10), 986-991. https://doi.org/10.1130/G47365.1

L'économie du pays subirait des pertes catastrophiques. La production de pétrole, de gaz, de charbon, de diamants et de métaux cesserait en raison de la destruction physique de l'infrastructure, interrompant les opérations industrielles et créant des pénuries de matières premières et d'énergie. L'activité volcanique dévasterait les ressources naturelles de la région, y compris les réserves de pétrole et de charbon, éliminant des actifs économiques cruciaux pour le pays.

Des décennies après l'éruption, la Sibérie resterait une zone de catastrophe écologique. La catastrophe altérerait de manière irréversible la géographie, l'économie et la société de la Russie. Seuls 25 % du territoire du pays resteraient habitables, mais ils seraient confrontés à une pression immense en raison des crises environnementales et sociales.

Les positions économiques, les sites historiques et une grande partie des richesses naturelles de la nation seraient perdus, rendant la Sibérie inhabitable pour la civilisation moderne.

Les conséquences mondiales de la percée progressive du panache sibérien

Les conséquences mondiales de l'éruption du panache sibérien affecteront le monde entier et se dérouleront en plusieurs étapes.

Dans les premiers jours, les transports entre l'Europe et l'Asie via la Sibérie cesseront et les voyages aériens seront interrompus en raison des cendres volcaniques dans l'atmosphère. Ces perturbations paralyseront la logistique mondiale, déclenchant une crise alimentaire à grande échelle, car la Russie, l'un des principaux exportateurs de blé et d'autres produits, arrêtera les expéditions. L'arrêt des exportations de pétrole, de gaz et d'autres ressources de la Russie entraînerait une flambée des prix, une crise énergétique et une instabilité économique dans de nombreux pays. Une réaction en chaîne de bouleversements financiers et sociaux se répercuterait sur l'économie mondiale.

Les nuages de cendres et les aérosols de soufre créeraient un effet d'obscurcissement global, réduisant le rayonnement solaire et provoquant un "hiver volcanique" avec une baisse de température de 2 à 3°C. Les pluies acides et la contamination des sols dévasteraient l'agriculture non seulement en Russie, mais dans le monde entier. La famine généralisée, les pénuries d'eau, l'air toxique et l'effondrement des systèmes climatiques entraîneraient la disparition progressive de milliards d'humains et d'animaux. En quelques années, les systèmes sociaux s'effondreraient.

Avec le temps, les cendres volcaniques commenceraient à se déposer, mais des changements climatiques brusques se produiraient. La libération de méthane et de dioxyde de carbone provenant du pergélisol en dégel amplifierait l'effet de serre. Les températures augmenteraient progressivement de 5 à 10 °C, entraînant un climat instable caractérisé par de fortes fluctuations de température. La destruction de la couche d'ozone entraînerait une augmentation des niveaux de rayonnement ultraviolet dans l'hémisphère Nord, exacerbant les conséquences des éruptions.

Malgré sa distance par rapport à la Sibérie, l'Europe ferait face à de graves conséquences de l'éruption du panache sibérien. Les cendres recouvriraient l'Europe du Nord et de l'Est, entraînant des maladies respiratoires généralisées. Les pluies acides détruiraient les forêts, les infrastructures urbaines et les terres agricoles. Après une phase de refroidissement temporaire, une tendance au réchauffement brusque s'ensuivrait, apportant des sécheresses au sud et des inondations en Europe centrale et du Nord.

La migration de masse en provenance de Russie, d'Asie et du Moyen-Orient déclencherait une crise démographique et une concurrence accrue pour les ressources. Les pays européens lutteraient contre des défis écologiques, économiques et sociaux persistants.

L'Asie supporterait le fardeau des effets de l'éruption, étant la plus proche de son épicentre. La pollution de l'air causée par la poussière et les cendres provoquerait des difficultés respiratoires généralisées et des pluies acides, en particulier en Chine, en Mongolie et au Kazakhstan. La réduction de la lumière solaire et la détérioration de la qualité des sols dévasteraient également la région agricole clé du nord de la Chine, un centre majeur de production alimentaire.

Les fluctuations de température causeraient des ravages dans les infrastructures et les systèmes agricoles à travers le continent. Le réchauffement progressif des océans entraînerait une désoxygénation, anéantissant les écosystèmes marins et provoquant la disparition des ressources halieutiques.

Au fil du temps, les éruptions en cours exacerberaient la destruction mondiale. Les crises climatiques et écologiques s'intensifieraient, effaçant une grande partie des progrès technologiques et intellectuels de l'humanité et entraînant la civilisation dans une profonde régression. L'humanité serait au bord de l'effondrement de la société total.

Les conséquences à long terme de la percée progressive du panache sibérien pour la planète

Une éruption progressive du panache sibérien entraînerait des impacts profonds et de grande envergure, transformant la planète pendant des millions d'années. L'atmosphère serait inondée de substances toxiques, entraînant des pluies acides mondiales et la destruction de la couche d'ozone. Cela amplifierait le rayonnement ultraviolet et déstabiliserait davantage les systèmes climatiques mondiaux.

Les océans subiraient une acidification critique, entraînant l'extinction massive de la vie marine. Cela provoquerait l'effondrement des écosystèmes marins, perturberait les chaînes alimentaires mondiales et entraînerait la perte de pratiquement toute la biodiversité marine.

Sur terre, les retombées des émissions toxiques, la destruction des écosystèmes des sols et la perte de la plupart des espèces végétales entraîneraient une extinction de masse. Sans pollinisateurs, les écosystèmes terrestres s'effondreraient, et il est estimé que 75 à 95 % des espèces existantes disparaîtraient.

En conséquence de l'éruption, une crise climatique, biologique et géologique globale se déploierait, transformant complètement la biosphère de la Terre. Ce processus entraînerait l'effondrement de la civilisation humaine, la mort de milliards de personnes et une régression des groupes humains survivants vers un niveau de développement de l'âge de pierre.

L'ampleur de cette catastrophe serait comparable aux plus grandes extinctions de masse de l'histoire de la Terre, marquant le début d'une nouvelle phase évolutive pour la biosphère qui prendra au moins des millions d'années à se remettre en place.

Scénario 3 :
Un dégazage planifié et contrôlé

Les méthodes existantes de géo-ingénierie volcanique

Étant donné la pression croissante sous la plaque de la Sibérie occidentale et le craton sibérien oriental, causée par l'ascension du panache sibérien, une action immédiate est nécessaire pour minimiser les conséquences potentielles. L'une de ces solutions est un relâchement contrôlé de la pression, de la lave et des gaz approchant de la surface à partir de chambres secondaires, c'est-à-dire **un dégazage planifié.**

Les études scientifiques contemporaines considèrent le dégazage des chambres magmatiques comme une méthode viable pour prévenir les éruptions à grande échelle. Cette approche pose les bases pour une application des technologies de géo-ingénierie volcanique non seulement aux volcans ou supervolcans, mais aussi pour gérer l'activité des panaches mantelliques. De nombreuses publications scientifiques et brevets développés par des experts de divers pays explorent le concept de dégazage contrôlé.

Les bases théoriques de la géo-ingénierie volcanique ont été établies au XXe siècle, avec des expériences pratiques menées tout le long du siècle dernier. Les méthodes d'intervention volcanique ont inclus le forage des cratères, le drainage des lacs volcaniques, la création de canaux pour détourner les flux de lave, le refroidissement des coulées de lave avec de l'eau de mer, le bombardement des flux de lave et l'extraction de gaz à effet de serre tels que le dioxyde de carbone et le méthane (Image 87).

Depuis les années 1960, l'US Geological Survey (USGS) a mené des opérations de forage dans les régions des lacs de lave sur le volcan Kilauea à Hawaii pour détourner les coulées de lave. Des initiatives similaires ont été mises en place au Japon, en Islande et en Italie. Par exemple, le Japon a testé des technologies pour réduire la pression dans les chambres magmatiques. L'Islande a redirigé avec succès des coulées de lave, comme sur l'île de Heimaey, où la lave a été refroidie à l'aide de canons à eau. En Italie, des systèmes d'alerte précoce et des méthodes de contrôle des coulées de lave ont été développés, notamment la destruction explosive des barrières de lave sur le mont Etna en 1983.

Aujourd'hui, des conférences et des symposiums scientifiques internationaux sur le forage en profondeur dans les zones d'activité volcanique et géothermique sont organisés, qui élargissent les applications potentielles de la géo-ingénierie volcanique pour prévenir les éruptions et atténuer leurs conséquences mondiales.

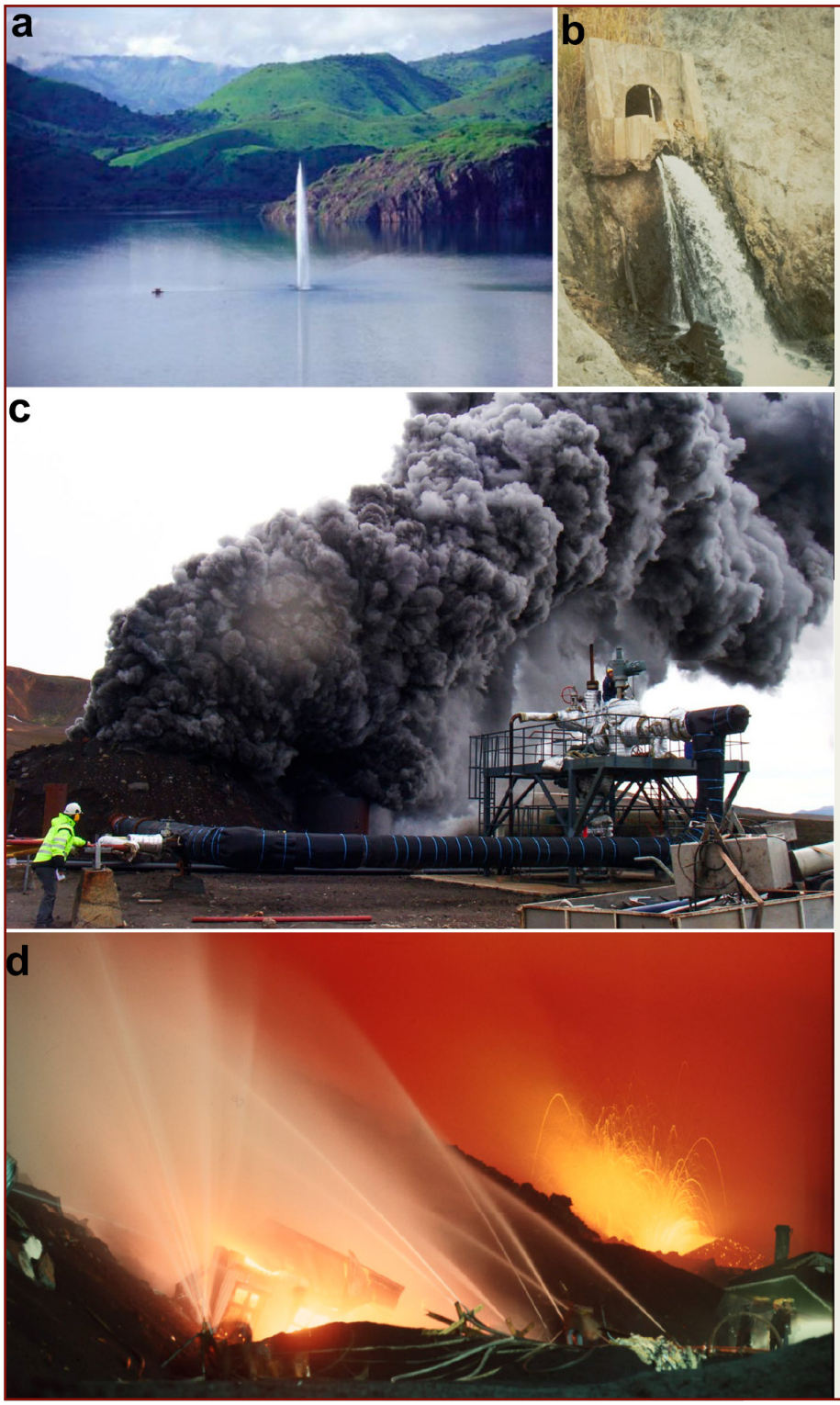


Image 87

(a) Dégazage de dioxyde de carbone du lac Nyos, Cameroun, tel que documenté par Halbwachs et al. (2020).
(b) Tunnel de drainage dans le mur du cratère du mont Kelud, Indonésie (Global Volcanism Program, image GVP-01120).
(c) Forage auxiliaire d'une poche magmatique à Krafla, Islande, en 2009 (image courtoisie de GO Friðleifsson/IDDP).
(d) Refroidissement des coulées de lave par injection d'eau de mer à Heimaey, Islande, en 1973, Tristan H. Benediktsson.

Source : Cassidy, M., Sandberg, A., & Mani, L. (2023). The Ethics of Volcano Geoengineering. Earth's Future, 11(10), e2023EF003714. https://doi.org/10.1029/2023EF003714

Le diagramme de l'image 88 présente la chronologie des cas les plus notables de géo-ingénierie volcanique. Les cercles noirs représentent les interventions délibérées, tandis que les cercles rouges indiquent les effets non intentionnels sur l'activité volcanique. Il existe également des méthodes brevetées pour le dégazage planifié et la réduction des risques d'éruptions des volcans et des supervolcans.

Par exemple, la technologie brevetée par deux experts russes consiste à prévenir les éruptions volcaniques incontrôlées en utilisant le forage incliné de puits pour réguler la pression au sein des chambres magmatiques. (Image 89).

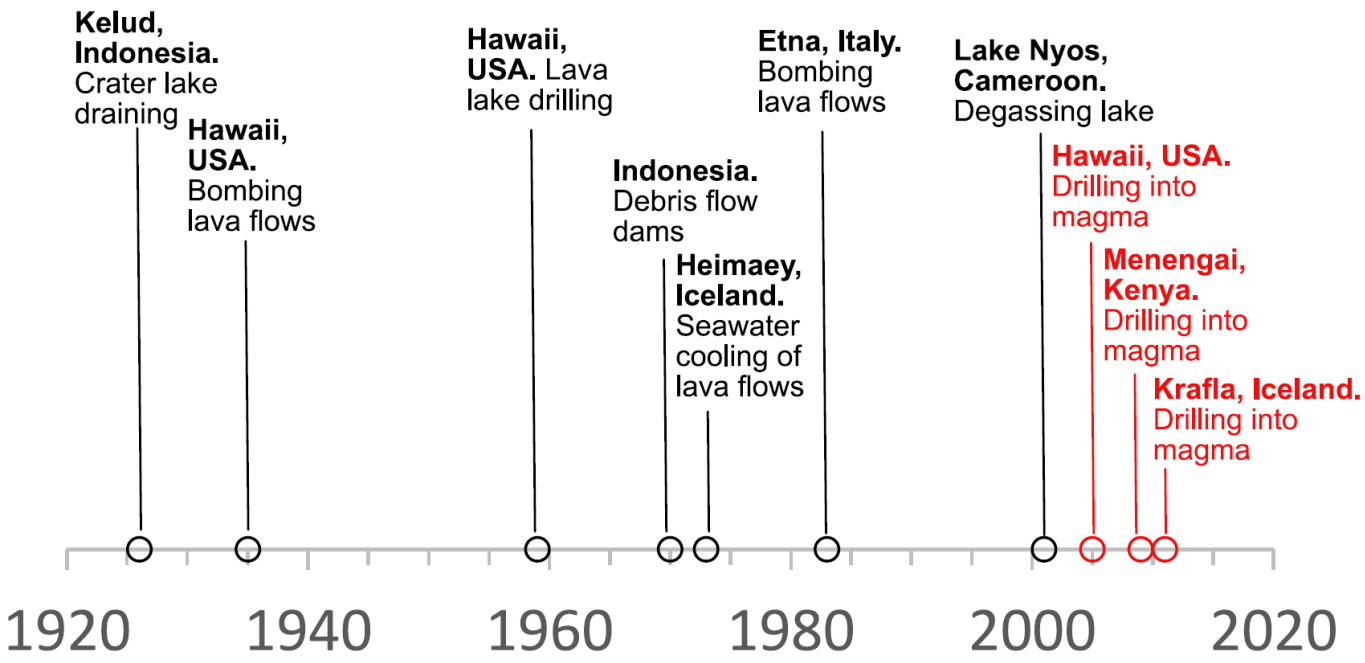


Image 88
Chronologie de certains cas notables de géo-ingénierie volcanique. Les cercles noirs indiquent les interventions délibérées, tandis que les cercles rouges signalent les interventions volcaniques involontaires.

Source : Cassidy, M., Sandberg, A., & Mani, L. (2023). The Ethics of Volcano Geoengineering. Earth's Future, 11(10), e2023EF003714. https://doi.org/10.1029/2023EF003714

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

(19) **RU** (11) **2 343 508** (13) **C1**

(51) МПК
G01V 9/00 (2006.01)
G01V 11/00 (2006.01)

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ,
ПАТЕНТАМ И ТОВАРНЫМ ЗНАКАМ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21), (22) Заявка: 2007112443/03, 04.04.2007

(24) Дата начала отсчета срока действия патента: 04.04.2007

(45) Опубликовано: 10.01.2009 Бюл. № 1

(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: RU 2098850 C1, 10.12.1997. SU 1193223 A, 23.11.1985. RU 2073769 C1, 20.02.1997. RU 2057839 C1, 10.04.1996. RU 2231092 C2, 20.06.2004. SU 1699979 A1, 23.12.1991. US 4319648 A, 16.03.1982.

Адрес для переписки:
109145, Москва, Жулебинский б-р,1, кв.82, Г.К.Мкртумяну

(72) Автор(ы):
Мкртычян Олег Альбертович (RU),
Мкртумян Георгий Каропетович (RU)

(73) Патентообладатель(и):
Мкртычян Олег Альбертович (RU),
Мкртумян Георгий Каропетович (RU)

RU 2343508 C1

(54) СПОСОБ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ЛАВИНООБРАЗНОГО ИЗВЕРЖЕНИЯ ВУЛКАНОВ

(57) Реферат:

Изобретение относится к способам предотвращения неконтролируемого - лавинообразного извержения вулканов и организации контролируемого транспортирования магмы для ее использования при строительстве. Обеспечивает повышение эффективности способа. Сущность изобретения: по способу управляют давлением во вторичных магматических очагах под вулканами, проявляющими сольфатарную активность. Для этого производят наклонное бурение каналов в основание вторичного магматического очага. В этот очаг подают сжатый газ. Повышают давление во вторичном магматическом очаге и замедляют поступление в него магмы из первичного очага. При этом осуществляют добычу и транспортирование магмы для строительства, накопившейся во вторичном магматическом очаге, через пробуренные каналы. При этом не допускают достижения критической величины давления, при которой происходит лавинообразное извержение.

5 0 8 C 1

Image 89
Brevet : La méthode de prévention des éruptions volcaniques en avalanche.

Cette invention concerne des méthodes pour prévenir les éruptions volcaniques incontrôlées semblables à des avalanches et pour organiser le transport contrôlé de magma destiné à une utilisation pour la construction. Elle améliore l'efficacité de l'approche.

Résumé de l'invention :

La méthode consiste à gérer la pression dans les chambres magmatiques secondaires sous les volcans à activité sulfurée. Cela est réalisé par le forage incliné de canaux dans la base de la chambre magmatique secondaire. Un gaz comprimé est injecté dans la chambre pour augmenter la pression, ralentissant ainsi l'influx de magma provenant de la chambre primaire. Simultanément, le magma accumulé dans la chambre secondaire est extrait et transporté à des fins de construction via les canaux forés. Le processus est mené de sorte à ce que la pression ne dépasse pas les niveaux critiques pour le déclenchement d'une éruption en avalanche.

Source : https://patentimages.storage.googleapis.com/0e/4a/51/11fd6e028d2813/RU2343508C1.pdf

Une autre technologie a été développée par un inventeur américain (Image 90). Cette technologie présente des méthodes pour évacuer le magma des chambres magmatiques volcaniques, comme celle du supervolcan de Yellowstone, afin de prévenir les éruptions catastrophiques potentielles.

L'idée principale consiste à créer des canaux artificiels (tubes) pour diriger le magma vers la surface, où il peut être traité et potentiellement utilisé, par exemple, pour la production d'énergie.

(12) **United States Patent**
Stratford

(10) **Patent No.: US 7,284,931 B2**
(45) **Date of Patent: Oct. 23, 2007**

(54) **MAGMA EVACUATION SYSTEMS FOR THE PREVENTION OF EXPLOSIONS FROM SUPERVOLCANOES**

(76) Inventor: **Brian Stapleton Stratford**, 40 Field Ris , Little ver, Derby DE23 1DE (GB)

(*) Notice: Subject to any disclaimer, the term of this patent is extended or adjusted under 35 U.S.C. 154(b) by 0 days.

(21) Appl. No.: **10/230,549**

(22) Filed: **Aug. 29, 2002**

(65) **Prior Publication Data**

US 2003/0145592 A1 Aug. 7, 2003

(30) **Foreign Application Priority Data**

Feb. 4, 2002 (GB) 0202465.1

(51) **Int. Cl.**
E21B 36/00 (2006.01)
E21B 43/24 (2006.01)

(52) **U.S. Cl.** **405/131**; 405/258.1; 405/303; 166/302; 166/57

(58) **Field of Classification Search** 405/52, 405/258.1, 130, 131, 303; 165/45; 166/302, 166/304, 57–62
See application file for complete search history.

(56) **References Cited**

U.S. PATENT DOCUMENTS

3,115,194	A	*	12/1963	Adams	376/273
3,357,505	A	*	12/1967	Armstrong et al.	175/16
3,396,806	A	*	8/1968	Benson	165/45
3,693,731	A	*	9/1972	Armstrong et al.	175/16
3,957,108	A	*	5/1976	Van Huisen	165/45
3,967,675	A	*	7/1976	Georgii	166/302
3,991,817	A	*	11/1976	Clay	165/45
4,134,462	A	*	1/1979	Clay	175/16
4,776,169	A	*	10/1988	Coles, Jr.	165/45

FOREIGN PATENT DOCUMENTS

GB	2362410		11/2001
JP	070071020	A	3/1995
JP	100076104	A	3/1998
JP	100077952	A	3/1998
JP	100078497	A	3/1998

* cited by examiner

Primary Examiner—Tara L Mayo
(74) *Attorney, Agent, or Firm*—Woodard, Emhardt, Moriarty, McNett & Henry LLP

(57) **ABSTRACT**

An apparatus controls the evacuation of volcanic magma to prevent explosions. Magma evacuation is through a single evacuation tube that heats the magma flow within the tube to prevent stickiness of the magma in the tube. The heating may use small combustion chambers to heat steam, which in turn heats and stabilizes the magma flow. Stability is aided by central cooling, where needed, using water jets from nozzles located at the wall of the tube.

25 Claims, 2 Drawing Sheets

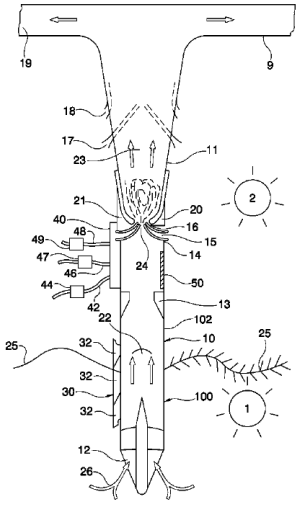


Image 90

Brevet : Les systèmes d'évacuation du magma pour la prévention des explosions des supervolcans.

Un appareil contrôle l'évacuation du magma volcanique pour prévenir les explosions. L'évacuation du magma se fait par un seul tuyau d'évacuation qui chauffe le flux de magma à l'intérieur du tuyau pour empêcher la viscosité du magma dans le tuyau. En tant que chauffage, de petites chambres de combustion peuvent être utilisées pour chauffer la vapeur, qui à son tour chauffe et stabilise le flux de magma. La stabilité est favorisée par un refroidissement central, si nécessaire, à l'aide de jets d'eau provenant de gicleurs situés sur les parois du tuyau.

Source:
https://patentimages.storage.googleapis.com/5f/dc/0d/7b5b99d61d1a75/US7284931.pdf

Un exemple de dégazage réussi est le projet japonais "Unzen Scientific Drilling Project" (USDP), une initiative de six ans lancée en avril 1999. Il visait à étudier l'histoire de la croissance, la structure souterraine et les processus de montée du magma du mont Unzen (Image 91). La première phase consistait en le forage de deux puits sur les pentes du volcan et la création d'un modèle de sa structure. La deuxième phase a été centrée sur le forage dans le canal de magma des éruptions de 1990–1995 pour analyser le mécanisme de dégazage. Pour un forage réussi, une stratégie de forage a été élaborée qui comprenait un forage vertical suivi d'une augmentation progressive de l'inclinaison du puits (Image 92).

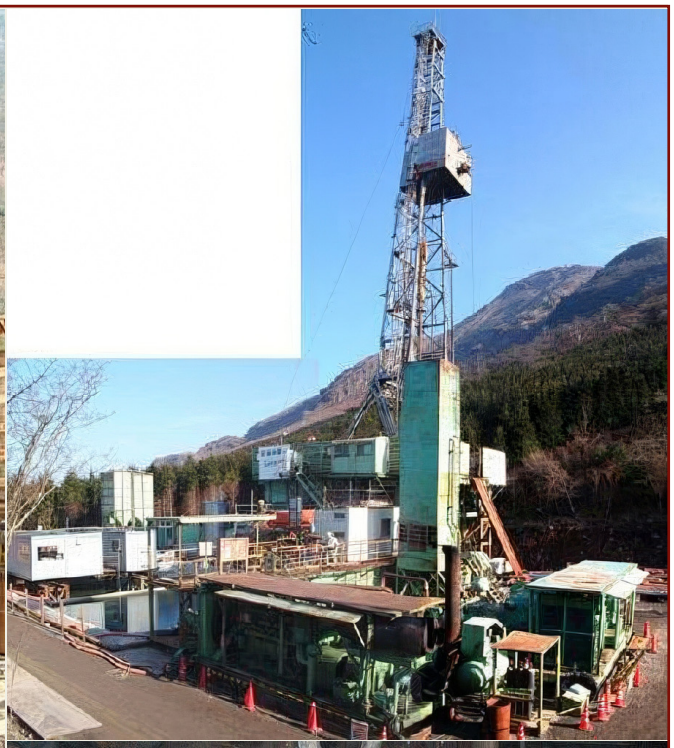
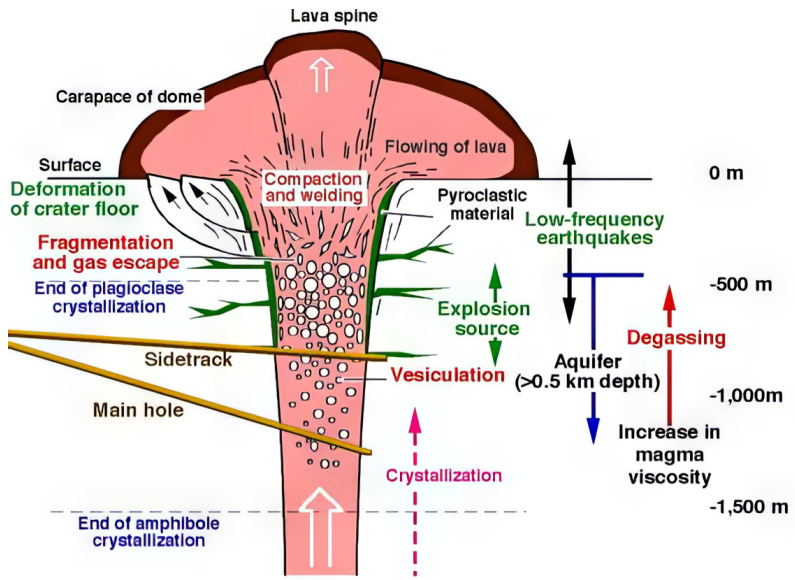
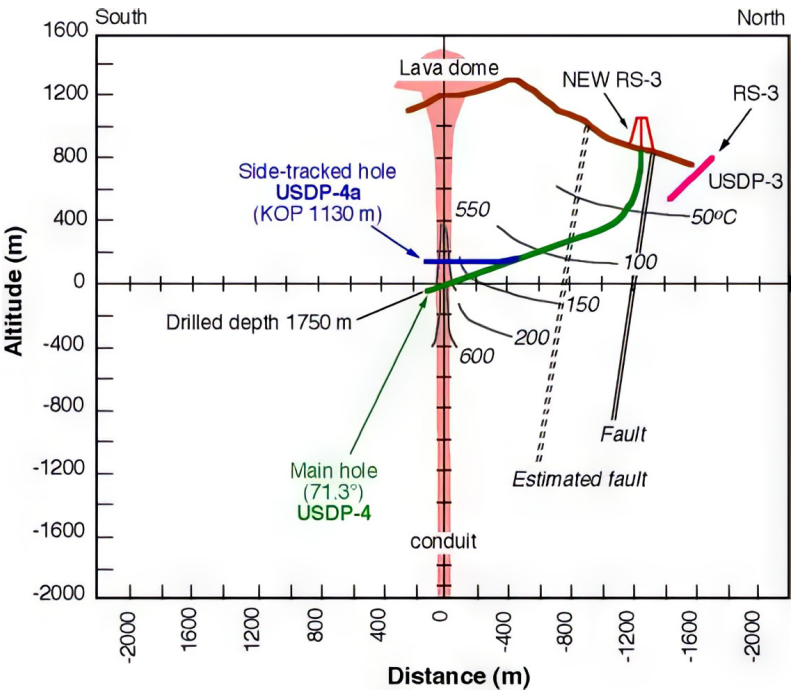


Image 91
L'équipement de forage utilisé pour le projet de forage du volcan Unzen en 1995.
Source:
https://www.icdp-online.org/projects/by-continent/asia/usdp-japan/gallery/





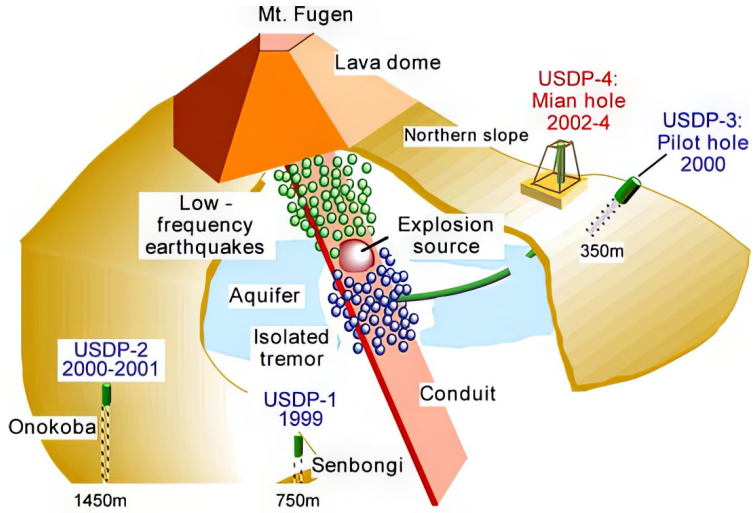


Image 92

(A) Image du dôme de lave et de la partie supérieure du conduit à Unzen.

Un dégazage efficace du magma mousseux a eu lieu lors de sa fragmentation et de son recuit dans la partie supérieure du conduit. L'état du conduit a été étudié lors du forage du trou principal (USDP-4) en 2003, et un carottage continu a été effectué en forant le trou de dérivation (USDP-4a) en 2004.

Source : Projet USDP. (n.d.). Dans Earthquake Research Institute, The University of Tokyo. Récupéré le 31 décembre 2024, https://www.eri.u-tokyo.ac.jp/KOHO/Yoran2003/sec4-5-eng.htm#:~:text=USDP%20consists%20of%20two%20phases%20

(B) Trajectoires du forage du conduit. Il est projeté de faire les forages des trous principaux et de dérivation, ainsi que d'un trou pilote, depuis les sites New RS-3 et RS-3 respectivement.

Source : Projet USDP. (n.d.). Earthquake Research Institute, The University of Tokyo. Récupéré le 31 décembre 2024 https://www.eri.u-tokyo.ac.jp/KOHO/Yoran2003/sec4-5-eng.htm#:~:text=USDP%20consists%20of%20two%20phases%20

(C) Image tridimensionnelle du forage du conduit

Source : Volcanic Fluid Research Center. (n.d.). Understanding of the conduit system at Unzen Volcano. [Comprendre le système des conduits du volcan Unzen.] Earthquake Research Institute, The University of Tokyo. Récupéré le 31 décembre 2024 https://www.eri.u-tokyo.ac.jp/VRC/vrc/usdp/conduit.html

Aujourd'hui, l'humanité possède un potentiel technologique et d'ingénierie suffisant pour intervenir dans les systèmes volcaniques. Cependant, chaque cas de dégazage planifié nécessite une préparation minutieuse, y compris une analyse approfondie des données et des calculs précis. Même dans ce cas, des risques subsistent.

Les méthodes décrites ont principalement été testées sur des volcans conventionnels, qui diffèrent fondamentalement en termes d'échelle du vaste panache mantellique sibérien. Ce panache représente une menace bien supérieure à la puissance d'un seul supervolcan. Il est comparable à l'énergie de mille éruptions de la caldeira de Yellowstone. Néanmoins, la nécessité de s'attaquer à ce problème est devenue urgente précisément parce que des approches potentielles pour l'atténuer existent.

Avec un engagement adéquat, l'humanité est capable de développer un programme de dégazage du panache mantellique sibérien, en s'appuyant sur l'expertise accumulée des spécialistes mondiaux. L'objectif principal de ce programme serait de minimiser les conséquences de l'ascension du panache en réduisant la pression de la lave et des gaz dans les chambres magmatiques secondaires, afin de prévenir des éruptions incontrôlées à grande échelle.

La mise en œuvre de ce programme nécessitera une coopération internationale étroite et les efforts collectifs des scientifiques et des ingénieurs du monde entier. Seule une approche unie peut aboutir à des solutions efficaces pour garantir la sécurité de l'humanité dans son ensemble.

L'exemple d'un programme pour le dégazage planifié du panache sibérien

Le programme pourrait impliquer le développement parallèle de plusieurs domaines clés :

1. La mise en place d'un réseau de surveillance

1.1 Développer un réseau de capteurs à haute sensibilité et des systèmes de surveillance par satellite pour surveiller l'activité sismique et thermique dans la région. Cela permettra la détection rapide des chambres magmatiques secondaires.

1.2 Réaliser une cartographie détaillée des chambres magmatiques secondaires à l'aide de méthodes d'exploration sismique. Des évaluations préliminaires de la pression et du volume de magma dans chaque chambre secondaire seront cruciales.

1.3 Forer des puits scientifiques de surveillance et installer des capteurs de pression, de température et d'activité sismique dans des zones anormales pour collecter des données essentielles.

2. Le développement de technologies de dégazage contrôlé et de blocage des canaux magmatiques

2.1 Il sera nécessaire de développer un plan pour forer des puits profonds inclinés jusqu'à 8 km dans des zones sûres. Des calculs de trajectoire détaillés seront requis pour garantir que les forages atteignent correctement les chambres magmatiques secondaires. Les technologies de forage résistantes aux hautes températures et à la pression doivent être utilisées. Cela inclut l'utilisation de matériaux résistants à la chaleur pour renforcer les parois des puits et la mise en place d'un système de surveillance de la pression et de la température dans les puits.

2.2 Un processus pour détourner les gaz et la lave doit être soigneusement élaboré, impliquant une gestion par étapes de la pression dans les chambres magmatiques secondaires par un système de forages. Cela nécessite de contrôler le taux de dégazage pour éviter des changements brusques de pression, ainsi que d'utiliser des systèmes de compression pour réguler la pression des gaz. Des systèmes de filtration et de refroidissement seront nécessaires pour éviter la libération de substances toxiques dans l'atmosphère. L'extraction de la lave et des gaz se poursuivra jusqu'à ce que la pression dans chaque chambre soit stabilisée.

2.3 Ensuite, un plan pour une explosion nucléaire ciblée dans des puits spécifiques doit être élaboré pour sceller les couches situées au-dessus des chambres magmatiques secondaires. Cette approche vise à empêcher l'excès de magma d'atteindre la surface et à minimiser les émissions de cendres.

La libération progressive de la pression assurera la stabilité de la Sibérie et protégera les principales zones peuplées, bien que Norilsk et les localités environnantes puissent rester à haut risque.

2.4 Lors du processus de détournement de la lave des chambres, des efforts doivent être faits pour contrôler son flux autant que possible. La lave doit être dirigée à travers des canaux spécialement préparés vers les mers arctiques. De plus, un programme devrait être développé pour utiliser le magma à des fins de construction, comme la création d'îles artificielles ou le renforcement des lignes côtières.

3. L'évacuation de la population :

Un système d'alerte précoce doit être mis en place, accompagné du développement de plans d'évacuation pour les urgences imprévues. De plus, un plan structuré pour l'évacuation sécurisée des personnes des zones à haut risque serait nécessaire. Ce plan devrait inclure des mesures pour adapter et soutenir socialement les évacués, en tenant compte de la possibilité d'une relocalisation à long terme.

4. La préservation des infrastructures :

Des plans doivent être élaborés pour la protection et l'évacuation des installations stratégiques des zones à risque d'inondation par la lave. Cela inclut la mise en place de centres de stockage sécurisés dans des zones sûres pour l'évacuation des ressources critiques de la région, telles que le pétrole, le gaz, les métaux non ferreux et précieux, les minerais, les engrais, les approvisionnements alimentaires, l'eau et les fournitures médicales.

La justification pour la sélection des sites de forage de recherche pour surveiller la dynamique du panache mantellique sibérien moderne

La première étape pour comprendre la vitesse et la direction de l'ascension du panache, l'étalement de son sommet et sa pénétration à travers les fissures de la croûte terrestre consiste à surveiller les paramètres géothermiques et géophysiques en profondeur. Cela nécessite de forer de nouveaux puits de recherche et de réaliser des mesures régulières de la température, de la pression, de la composition des gaz, des marqueurs de l'intensification des processus magmatiques, du bruit sismique et d'autres paramètres dans ces puits.

Dix sites ont été proposés pour le forage de puits de recherche (Images 93, 94).

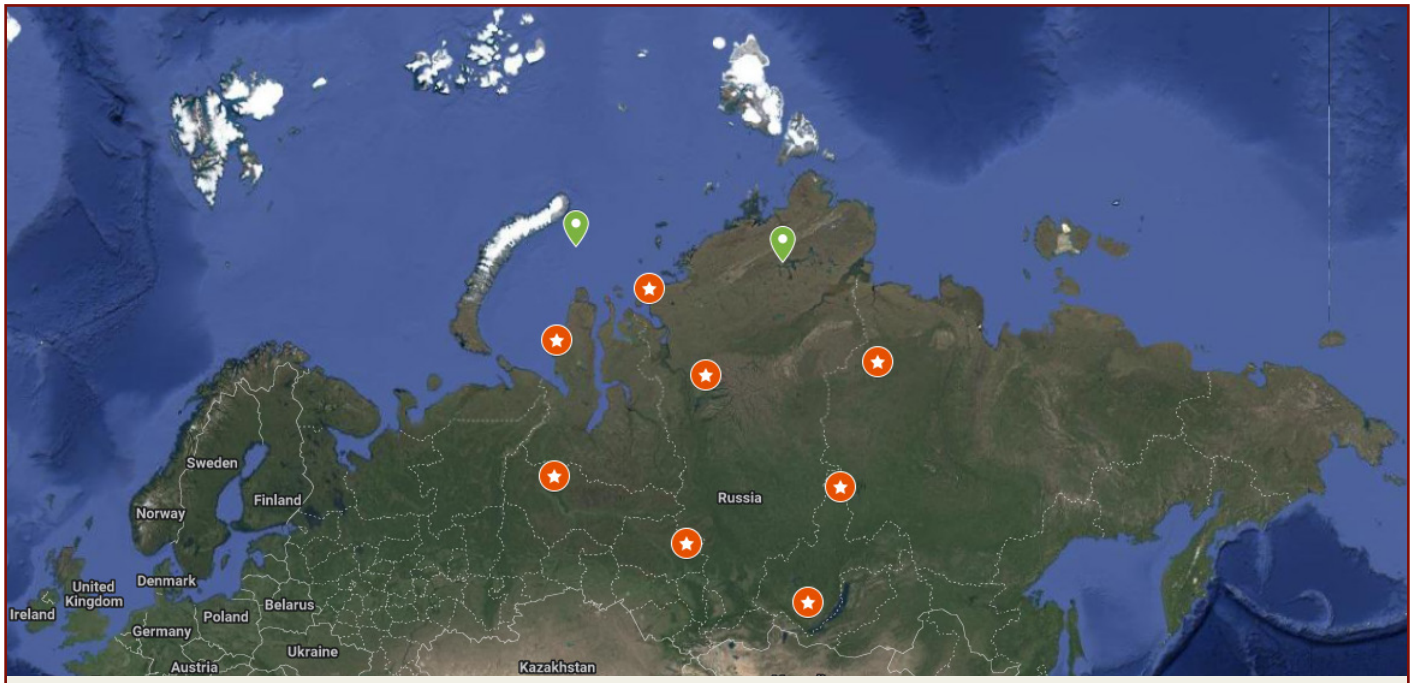


Image 93
La disposition préliminaire des 10 sites recommandés pour le forage de puits de recherche.

Borehole name	Locality or nearby infrastructure	Coordinates X (Latitude)	Coordinates Y (Longitude)	Area
Ц 1	Talnakh District, Norilsk, Krasnoyarskiy Krai	69.4459423	88.7670478	Taymyr Peninsula
ЗСЗ 2	Kharasavey field, Yamal Peninsula	71.1849618	66.9830117	Western Siberia
ЗЮЗ 3	Kislorskoye field, Beloyarsky District, Khanty-Mansi Autonomous Okrug	63.6572613	66.5569363	Western Siberia
ЮЗ 4	Tsentralny settlement in Verkhneketsky District, Tomsk Region	58.9454	86.0127	Western Siberia
Ю 5	Chichkova village, Chichkovskoye municipal formation, Ust-Udinsky District, Irkutsk Region	54.19598	103.7021	Eastern Siberia
ЮВ 6	Nakanno village in Katangsky District, Irkutsk Region	62.89873	108.45027	Eastern Siberia
В 7	Zhilinda village in Olenyoksky District, Yakutia	70.1528916	113.9261131	Eastern Siberia
СЗ 8	Dikson settlement in Taymyrsky Dolgano-Nenetsky District, Krasnoyarskiy Krai	73.50246	80.5498	Taymyr Peninsula
СВ 9	Lead-zinc deposit to the northwest of Lake Taymyr, Taymyr Peninsula	74.52147	100.02184	Eastern Siberia
СЗ 10	Rogozinskaya-1 site, Kara Sea	75.16298	69.74128	Western Arctic Platform

Image 94
Le tableau des 10 puits de recherche recommandés pour surveiller la progression du panache mantellique sibérien, comprenant le nom du puits, les coordonnées, les établissements ou infrastructures à proximité, et la structure des coupes géologiques.

Les critères de sélection de ces sites de forage ont été basés sur les principes suivants :

1. Les sites de forage ont été choisis par rapport à l'intersection maximale des anomalies thermiques et géodynamiques associées à l'ascension et à l'épanchement du sommet du panache. Selon ce principe, un puits a été placé dans la région centrale du soulèvement supposé du sommet du panache, sept puits ont été identifiés le long du périmètre supposé du flux de magma, un autre puits a été positionné près du lac Baïkal, en direction de l'avancement actif du magma sous le craton sibérien oriental, et un autre encore a été prévu près de la mer de Kara, pour surveiller la progression du panache sous la croûte océanique du plateau arctique.

2. L'emplacement des puits a été optimisé pour les travaux de tomographie sismique ultérieurs, garantissant que les données des capteurs sismiques, une fois traitées, fourniraient les images 3D les plus claires. Autrement dit, la grille de capteurs sismiques dans les puits a été conçue pour être positionnée de manière optimale pour la tomographie sismique des sous sols.

3. Lors de la sélection des sites de forage, on a pris en compte la faisabilité de la livraison d'équipements pour le forage et les itinéraires d'accès (accessibilité pour les transports). En raison du terrain difficile, des paysages marécageux, de l'absence de routes et des conditions climatiques extrêmes dans le nord de la Sibérie occidentale et orientale, la sélection des sites de forage a reposé sur la disposition des infrastructures existantes nécessaires pour la recherche scientifique, telles que les routes, les sites habités et les plateformes de forage actives. Deux points ont été choisis sur les champs pétrolifères actuels exploités par Gazprom et Rosneft, tandis que les autres se trouvent près des champs pétroliers, gaziers et d'autres ressources minérales. Il convient de noter que si le forage aux coordonnées spécifiées s'avère impossible, les sites de forage peuvent être ajustés de 10 à 20 km dans n'importe quelle direction.

Les méthodes de recherche recommandées pour les puits de forage :

Pour un suivi et une étude complets du panache mantellique, les paramètres suivants doivent être collectés à partir des puits de forage de recherche :

1. **La surveillance de la température :** Il s'agit de mesurer les températures à différentes profondeurs pour analyser les anomalies thermiques et l'intensification du flux géothermique, suite à la progression du magma à l'endroit de l'épanchement du panache.
2. **La pression :** Déterminer les niveaux de pression dans les strates pour évaluer les conditions hydrodynamiques.
3. **L'échantillonnage de gaz :** Collecter des échantillons de gaz provenant des strates profondes pour étudier leur composition et l'influence potentielle de l'activité magmatique sur eux.
4. **Les recherches sismiques :** Installation de capteurs sismiques standards et à large bande pour enregistrer l'activité sismique et créer une image de tomographie sismique détaillée de la croûte terrestre et du manteau afin de surveiller en continu l'état du panache.
5. **La composition des fluides de strate :** Analyser la composition des fluides de strate pour identifier d'éventuelles contributions thermiques ou magmatiques.

6. **Les études géomécaniques :** Effectuer des mesures de tension dans les roches pour analyser l'état de tension dans la lithosphère subissant une déformation en raison de l'intrusion du panache.

7. **Les méthodes électromagnétiques :** Réaliser des recherches électromagnétiques pour enregistrer les changements dans les propriétés électriques des milieux associés à l'intrusion du magma.

Les données collectées serviront de base pour développer un modèle complet de la dynamique du panache mantellique et évaluer son impact sur les processus géologiques en Sibérie.

Les caractéristiques du forage et du blocage des canaux magmatiques lors du dégazage planifié

L'objectif principal du forage des puits pendant le dégazage planifié est de réduire la pression dans les réservoirs magmatiques secondaires du panache, de prévenir les explosions de magma et d'établir une libération contrôlée de gaz et de lave.

Dans la phase initiale, le forage sera effectué par des opérateurs humains, car à des profondeurs peu avancées, le processus implique des tâches technologiques standard avec des risques minimes pour le personnel. Des plateformes de forage traditionnelles équipées de systèmes de surveillance de la température et de la pression seront utilisées pour contrôler le processus et réagir rapidement aux écarts par rapport à la norme.

À mesure que le forage approche des profondeurs critiques et des zones actives du système magmatique, le risque pour le personnel augmente considérablement. À ce stade, les opérations doivent passer entièrement à l'automatisation. Des plateformes de forage spécialisées avec des systèmes de contrôle automatisés seront utilisées. Le processus de forage sera géré à distance à l'aide de logiciels qui analysent les données en temps réel et ajustent les actions de l'équipement en conséquence.

Pour améliorer la précision de la surveillance, les opérateurs utiliseront des technologies de réalité virtuelle, permettant un contrôle détaillé de l'équipement sans présence physique dans les zones dangereuses. Cette approche minimise la probabilité d'accidents causés par des décharges de gaz à haute pression ou des défaillances d'équipement dues aux ondes de choc.

Les drones et les robots surveilleront le complexe de forage et l'environnement aux alentours. Les drones équipés de caméras, de systèmes de thermographie et de capteurs détecteront les fuites de gaz, les anomalies thermiques et l'activité sismique. Les robots opérant directement dans la zone de forage collecteront les données sur la température, la pression et la composition chimique de l'environnement, transmettant ces informations aux centres de contrôle automatisés. Ces technologies minimisent la présence humaine dans les zones à haut risque et assurent un niveau élevé de précision et de sécurité.

Après l'achèvement du forage, la phase suivante consiste à mener un dégazage contrôlé — libérer progressivement la pression et expulser de grands volumes de lave. Dans les dernières étapes, après une réduction significative des volumes de magma et de gaz, une explosion contrôlée peut être nécessaire pour sceller les voies de montée du magma. Une des méthodes proposées consiste à effectuer une explosion nucléaire dirigée dans le trou de forage. L'objectif de cette approche est de soulager le stress tectonique et de créer des barrières structurelles stables qui bloquent les canaux magmatiques.

Cette approche implique de briser les roches dans les zones de forte contrainte, puis de les fusionner et de les refroidir sous l'action de l'énergie thermique. Ce processus favorise la formation d'une barrière monolithique capable d'obstruer complètement ou partiellement l'accès du magma à la surface. L'impact thermodynamique peut également soulager le stress tectonique, réduisant ainsi la probabilité d'éruptions futures.

La mise en œuvre d'explosions nucléaires nécessite des calculs précis, y compris l'évaluation de la pression lithostatique, de la dureté et de la densité des roches, ainsi que des caractéristiques de la fonte magmatique. Ces facteurs doivent être soigneusement pris en compte pour maximiser l'efficacité de la méthode et minimiser les risques potentiels.

La sélection du moment optimal pour forer les puits lors du dégazage planifié

Actuellement, nos spécialistes se concentrent sur l'étude des délais optimaux pour effectuer les opérations de forage dans le cadre du dégazage planifié. Bien qu'il soit trop tôt pour tirer des conclusions définitives, des calculs préliminaires indiquent déjà un potentiel pour sélectionner avec précision le moment le plus favorable pour commencer le dégazage. Les résultats suggèrent qu'avec un timing correctement déterminé, le risque de complications peut être réduit de plusieurs fois.

Le processus de forage doit tenir compte non seulement des propriétés physiques et mécaniques des roches, telles que leur résistance et leur fracture, mais aussi des paramètres temporels liés à la mécanique céleste. Les calculs doivent être basés sur l'analyse de la position de la Terre le long de l'écliptique, de la phase de la Lune, de l'alignement des principales planètes comme Jupiter, et du niveau actuel de l'activité solaire. De plus, le suivi des séismes à foyer profond dans la région de forage est crucial, car ces événements peuvent augmenter considérablement l'activité sismique locale.

Actuellement, nous avons une compréhension générale du mécanisme et des principaux schémas gouvernant le processus, mais ces résultats nécessitent de multiples validations ultérieures. Les résultats doivent non seulement être rigoureusement réexaminés par notre équipe scientifique, mais aussi corroborés par des recherches et des modèles développés indépendamment par d'autres spécialistes.

Les résultats projetés du dégazage planifié du panache sibérien

La mise en œuvre du dégazage planifié du panache sibérien peut entraîner trois scénarios principaux, calculés en tenant compte de deux étapes du projet : la phase initiale et celle plus tardive. Considérons-les en détail.

1. Les dégâts minimes pour le territoire russe.

Si le processus de dégazage et de libération de lave excédentaire des chambres magmatiques secondaires est soigneusement modélisé par une équipe internationale d'experts, avec des calculs réalisés méticuleusement pour prendre en compte toutes les caractéristiques géologiques, les deux étapes du dégazage peuvent se dérouler sans accidents ni complications. Dans ce scénario, les dégâts sur le territoire russe seraient minimisés, avec des pertes représentant 5 à 7 % de la superficie du pays, ou au maximum jusqu'à 10 % (un rayon affecté d'environ 500 à 600 km). Les grandes villes du Kraï de Krasnoïarsk pourraient être protégées, et la perte de vies humaines pourrait être évitée. De plus, des développements favorables pourraient permettre de détourner la lave vers les mers arctiques, potentiellement en élargissant le territoire de la Russie par la création de nouvelles terres côtières.

2. Les dégâts modérés pour le territoire russe.

Ce scénario suppose l'achèvement réussi de la phase initiale de dégazage, mais anticipe des complications imprévues lors des étapes ultérieures, telles qu'une explosion de gaz soudaine ou une décharge de lave. À ce moment-là, certains gaz et laves auraient déjà été évacués, réduisant l'impact global. Les résultats possibles pourraient inclure des coulées de lave basaltique liquide, similaires à celles observées en Islande ou sur les îles hawaïennes, ou une éruption d'explosivité modérée. Dans ce cas, la perte potentielle de territoire pourrait augmenter de 25 à 30 % (environ 4 à 5 millions de kilomètres carrés). Cela affecterait les villes situées dans un rayon de 1 000 km de la zone active. Cependant, ce scénario ne conduirait pas à une catastrophe mondiale pour la civilisation ni à une destruction irréversible à travers le territoire russe. L'humanité serait capable de gérer les défis climatiques et écologiques qui en découleraient.

3. Les dégâts maximums pour la Russie et le monde.

Ce scénario suppose qu'une initiative tardive ou un manque d'expertise parmi les spécialistes pourrait entraîner des complications importantes. Un manque de recherche, des erreurs de calcul ou un forage à travers des roches tendres ou fracturées pourraient perturber les opérations. Si des complications surviennent lors de la phase initiale de dégazage, lorsque la pression dans les chambres magmatiques est à son apogée, l'une des deux issues catastrophiques suivantes pourrait se produire : une explosion immédiate de tout le système du panache sibérien ou des coulées de lave lentes mais étendues, similaires à la formation des Trapps de Sibérie.

Malgré les risques potentiels, la probabilité d'un tel résultat est extrêmement faible, car il est difficile d'envisager la mise en œuvre d'un projet aussi complexe sans une préparation internationale adéquate.

Le résultat optimiste et le plus probable implique la perte de seulement 5 à 7 % du territoire russe avec des dégâts minimes. Même en cas de complications lors des phases ultérieures, les pertes pourraient augmenter à 25–30 %, ce qui reste bien plus favorable que les conséquences de l'inaction. Le risque de destruction plus grave, que ce soit pour la Russie ou pour le monde, lors du dégazage planifié est négligeable.

La mise en œuvre du dégazage planifié offrira à la Russie une opportunité unique de prendre la tête de la gestion des risques géodynamiques mondiaux, renforçant ainsi sa position en tant que leader scientifique et technologique international. La réalisation réussie du projet démontrera la capacité du pays à relever des défis planétaires, favorisant la collaboration mondiale pour prévenir les catastrophes naturelles. Cette initiative stabilisera non seulement l'environnement politique et social intérieur de la Russie, mais renforcera également la coopération internationale pour résoudre les problèmes mondiaux.

Le dégazage contrôlé du panache sibérien pourrait affecter non seulement la région locale, mais aussi d'autres systèmes volcaniques, comme Yellowstone et les stratovolcans dans le monde entier. Les réservoirs magmatiques et leur dynamique forment un réseau global interconnecté, fonctionnant comme un système géomécanique unifié. Le soulagement contrôlé de la pression dans un segment peut réduire la tension du système dans les réservoirs magmatiques, empêchant les réactions en chaîne et les éruptions.

Cela peut être comparé à la déflation d'un pneu de voiture : réduire la pression dans une zone redistribue la charge et empêche la rupture aux points de tension critiques. Une approche similaire de dégazage pourrait stabiliser les systèmes magmatiques à l'échelle mondiale.

Ainsi, entreprendre une opération de dégazage planifié et contrôlé reste la seule chance viable de l'humanité pour éviter la catastrophe, tant pour la Russie que pour le monde entier, ce qui est à tout point plus avantageux et raisonnable que l'inaction. Ce scénario offre un moyen d'éviter une catastrophe mondiale tout en offrant du temps à l'humanité pour développer d'autres solutions.

Cependant, malgré son immense potentiel, la réalisation réussie, même du scénario le plus optimiste, représente un défi monumental. Une action immédiate est essentielle, car tout retard augmente la probabilité d'événements catastrophiques. Fait surprenant, un tel projet pourrait rencontrer de l'opposition au sein même de la Russie en raison des risques potentiels, comme les dommages à l'infrastructure et la perte de contrôle sur ses ressources stratégiques.

Conclusions

Le panache sibérien représente une menace géodynamique mondiale comparable en ampleur à mille éruptions catastrophiques des plus grands supervolcans. Une éruption incontrôlée pourrait entraîner des conséquences à l'échelle planétaire, notamment le début d'une ère glaciaire, la destruction des écosystèmes, l'effondrement des infrastructures et l'extinction de l'humanité. Ces risques nécessitent la mise en œuvre de mesures préventives, telles que le dégazage planifié du système magmatique du panache sibérien.

L'inaction crée la menace d'éruptions spontanées et incontrôlées, dont les conséquences seraient catastrophiques non seulement pour la Russie, mais pour la planète entière. La réduction contrôlée de la pression dans les chambres magmatiques peut aider à éviter les pires scénarios et offrir à l'humanité le temps crucial nécessaire pour développer des solutions à long terme.

De plus, l'intégration de la technologie des générateurs d'eau atmosphérique dans l'utilisation quotidienne parallèlement au dégazage du panache sibérien pourrait ouvrir de nouvelles opportunités pour restaurer l'équilibre écologique. Cela permettrait de nettoyer les plastiques dans les océans, de renforcer le cycle de l'eau et de rétablir l'équilibre thermique de la planète. L'adoption généralisée de ces mesures pourrait stabiliser le climat et garantir un avenir pour l'humanité, en gagnant du temps pour s'attaquer à l'influence cosmique externe responsable des événements catastrophiques survenant lors du cycle de 12 000 ans.

Ces objectifs exigent une collaboration internationale urgente entre les scientifiques de diverses disciplines, y compris les physiciens quantiques, pour développer et mettre en œuvre des solutions globales. Cependant, les conflits géopolitiques et militaires entravent une telle coopération. Par conséquent, il est impératif d'instaurer un moratoire mondial sur les guerres et la redirection des ressources militaires vers l'atténuation des catastrophes et les efforts humanitaires. L'humanité dispose de seulement 4 à 6 ans de conditions relativement stables pour entreprendre les actions nécessaires.

Si des conditions de collaboration ouverte sont établies, les scientifiques ne repartiront pas de zéro, car la recherche existante et la compréhension des relations causales dans ce domaine fournissent déjà une base solide. L'incapacité de l'humanité à prioriser l'unité mondiale et la collaboration scientifique entraînera des conséquences irréversibles pour la vie sur Terre.

Annexe 1

La méthodologie d'analyse de l'activité sismique consistait à télécharger et à traiter les données du Centre International de Sismologie (ISC). Étant donné que l'ensemble des données comprend des contributions de pays et d'institutions de recherche divers, ainsi que différents types d'échelles de magnitude (Mw, Ms, Mb, ML, MD, etc.), un algorithme de traitement des données spécifique a été appliqué pour sélectionner le type de magnitude le plus approprié parmi plusieurs sources. Deux approches distinctes ont été utilisées :

1. Appelée dans le texte **l'Algorithme Spécial de Magnitude Médiane**, cette méthode consiste à sélectionner une estimation préférée de magnitude et à inclure un événement dans l'ensemble de données uniquement si l'estimation préférée se situe dans la plage de magnitudes requises. La sélection de l'estimation préférée de la magnitude s'effectue en recherchant parmi les estimations les types de magnitude suivant (par ordre de préférence) : Mw, ML, MS, Mb, MD, MV.

Si plusieurs valeurs de magnitude existent pour le type préféré pour le même événement, alors toutes les estimations de la magnitude du type sélectionné disponibles pour cet événement sont prises et la médiane est ensuite calculée à partir de celles-ci.

Si aucune estimation de ces types n'est disponible pour l'événement (ce qui est rare, représentant seulement quelques pour cent des événements dans l'ensemble de données), alors on choisit toute estimation de magnitude avec une valeur correspondant à la médiane calculée à partir de tous les types de magnitude pour cet événement.

2. Appelée dans le texte **l'Algorithme de Magnitude Maximale**, cette méthode sélectionne l'estimation de magnitude ayant la valeur la plus élevée parmi toutes les estimations de magnitude disponibles pour l'événement donné.

Le premier algorithme entraîne généralement une légère réduction des valeurs de magnitude par rapport à l'estimation la plus élevée rapportée. Cependant, l'expérience a montré que l'Algorithme de Magnitude Médiane fournit une représentation fiable de la loi de Gutenberg-Richter et d'autres modèles sismiques, et s'accorde bien avec les données d'autres bases de données sismologiques, telles que le United States Geological Survey (USGS - La surveillance géologique des Etats-Unis) et l'Incorporated Research Institutions for Seismology (IRIS - Les institutions de recherche sismologique intégrées).

Le second algorithme permet d'évaluer le nombre de tremblements de terre enregistrés par toute institution de recherche avec une magnitude dépassant un seuil sélectionné. Cette approche aide à identifier les tendances de la fréquence des tremblements de terre dans une plage de magnitude donnée.

Tous les graphiques présentés dans la section «L'augmentation de l'activité sismique comme indicateur de déstabilisation des plaques due à l'activité du panache magmatique sibérien» ont été construits en utilisant le premier algorithme, l'Algorithme Spécial de Magnitude Médiane (Images 44–75).

Après avoir sélectionné la magnitude, les données ont été filtrées par type d'événement dans la base de données de l'ISC pour exclure les événements causés par des activités humaines liées aux opérations minières, tels que les explosions, les explosions suspectées et les secousses rocheuses etc. Les types d'événements suivants ont été exclus :

km = explosion minière connue

sm = explosion minière suspectée

kh = explosion chimique connue (Non standard IMS)

sh = explosion chimique suspectée (Non standard IMS)

kx = explosion expérimentale connue

sx = explosion expérimentale suspectée

kn = explosion nucléaire connue

sn = explosion nucléaire suspectée

De plus, étant donné que la Russie possède un grand nombre d'opérations minières, la base de données de l'ISC a été croisée avec les données du Service Géophysique Unique de l'Académie des Sciences de Russie en date du mois de janvier 2025. Cet ensemble de données inclut toutes les explosions et secousses rocheuses connues sur le territoire russe. Ces événements ont également été exclus pour s'assurer qu'aucun événement lié aux explosions ne subsiste dans l'ensemble de données final.

Références

Arushanov, M. L. (2023). Climate dynamics: Space factors. LAMBERT Academic Publishing.

Arushanov, M. L. (2023). Causes of Earth's climate change as a result of cosmic impact, dispelling the myth of anthropogenic global warming. Deutsche Internationale Zeitschrift Für Zeitgenössische Wissenschaft, 53, 4-14. https://doi.org/10.5281/zenodo.7795979

Barkin, Y.V. and Lyubushin, A.A. (2007) 'Movement of the Earth's geocenter and its geodynamic content', in Sagitov Readings 2007, Moscow State University, Moscow, 31 January-1 February [Online]. Available at: http://lnfm1.sai.msu.ru/grav/russian/life/chteniya/sagi2007/SAGITOV_BARKIN_2007.pdf

Barkin, Yu. V. (2009). Cyclic inversion changes of climate in the Northern and Southern hemispheres of the Earth. In Geology of Seas and Oceans: Proceedings of the XVIII International Scientific Conference on Marine Geology (Vol. 3, pp. 4-8). GEOS.

Barkin, Yu. V. (2011). Synchronous jumps in activity of natural planetary processes in 1997-1998 and their unified mechanism. In Geology of Seas and Oceans: Proceedings of the XIX International Scientific Conference on Marine Geology (Vol. 5, pp. 28-32). GEOS.

Barkin, Yu. V., & Smolkov, G. Ya. (2013). Abrupt changes in trends of geodynamic and geophysical phenomena in 1997-1998. In Proceedings of the All-Russian Conference on Solar-Terrestrial Physics (pp. 16-21). Irkutsk.

Barkin, Yu. V. (2014, September 16). Geofizicheskie sledstviya otnositel'nykh smeshcheniy i kolebaniy yadra i mantii Zemli [Geophysical consequences of relative displacements and oscillations of the Earth's core and mantle]. Institute of Physics of the Earth, Moscow.

Beerling, D.J., Harfoot, M., Lomax, B. & Pyle, J.A., 2007. The stability of the stratospheric ozone layer during the end-Permian eruption of the Siberian Traps. Philosophical Transactions of the Royal Society A, 365, pp.1843–1866. Available at: http://doi.org/10.1098/rsta.2007.2046

Black, B.A., Elkins-Tanton, L.T., Rowe, M.C., Ukstins Peate, I., 2012. Magnitude and consequences of volatile release from the Siberian Traps. Earth and Planetary Science Letters, 317–318, pp.363–373. Available at: https://doi.org/10.1016/j.epsl.2011.12.001

Black, B., Mittal, T., Lingo, F., Walowski, K., & Hernandez, A. (2021). Assessing the Environmental Consequences of the Generation and Alteration of Mafic Volcaniclastic Deposits During Large Igneous Province Emplacement. In R. E. Ernst, A. J. Dickson, & A. Bekker (Eds.), Geophysical Monograph Series (pp. 117-131). Wiley. https://doi.org/10.1002/9781119507444.ch5

Bogoyavlensky, V.I., Nikonov, R.A. & Bogoyavlensky, I.V., 2023. New data on intensive Earth degassing in the Arctic in the north of Western Siberia: thermokarst lakes with gas blowout craters and mud volcanoes. AEE, 13, pp.353–368. Available at: https://doi.org/10.25283/2223-4594-2023-3-353-368

Bogoyavlensky, V.I., 2023. New data on mud volcanism in the Arctic on the Yamal Peninsula. Doklady Rossiyskoy Akademii Nauk. Nauki o Zemle, 512, pp.92–99. Available at: https://doi.org/10.31857/S2686739723601084

Brown, S. K., Crosweller, H. S., Sparks, R. S. J., Cottrell, E., Deligne, N. I., Guerrero, N. O., ... & Takarada, S. (2014). Characterisation of the Quaternary eruption record: analysis of the Large Magnitude Explosive Volcanic Eruptions (LaMEVE) database. Journal of Applied Volcanology, 3(5). https://doi.org/10.1186/2191-5040-3-5

Bryson, R. A. (1989). Late quaternary volcanic modulation of Milankovitch climate forcing. Theoretical and Applied Climatology, 39, 115-125. https://doi.org/10.1007/bf00868307

Campbell I.H, Czamanske G.K, Fedorenko V.A, Hill R.I& Stepanov V. 1992 Synchronism of the Siberian Traps and the Permian–Triassic boundary. Science. 258, 1760–1763.doi:10.1126/science.258.5089.1760.

Cassidy, M., Sandberg, A., & Mani, L. (2023). The Ethics of Volcano Geoengineering. Earth's Future, 11(10), e2023EF003714. https://doi.org/10.1029/2023EF003714

Castro, J., & Dingwell, D. (2009). Rapid ascent of rhyolitic magma at Chaitén volcano, Chile. Nature, 461, 780-783. https://doi.org/10.1038/nature08458

Cheng, L., Abraham, J., Zhu, J., Trenberth, K. E., Fasullo, J., Boyer, T., Locarnini, R., Zhang, B., Yu, F., Wan, L., Chen, X., Song, X., Liu, Y., & Mann, M. E. (2020). Record-Setting Ocean Warmth Continued in 2019. Advances in Atmospheric Sciences, 37, 137–142. https://doi.org/10.1007/s00376-020-9283-7

Ciavarella, A., Cotterill, D., Stott, P., et al. (2021). Prolonged Siberian heat of 2020 almost impossible without human influence. Climatic Change, 166, 9. https://doi.org/10.1007/s10584-021-03052-w

Nikiforova, M. P., Vargin, P. N., Zvyagintsev, A. M., Ivanova, N. S., Kuznetsova, I. N., & Luk'yanov, A. N. (2016). Ozone mini-hole over the Northern Urals and Siberia. Proceedings of the Hydrometeorological Research Center of the Russian Federation, 360, 168–180. In Proc. of the Hydrometeorological Conf., February 9–10, Vol. 4, 91–96. Voronezh: Nauchno-Issledovatelskie Publikatsii.

Cox, C., & Chao, B. F. (2002). Detection of a large-scale mass redistribution in the terrestrial system since 1998. Science, 297(5582), 831–833. https://doi.org/10.1126/science.1072188

Davydova, V.O., Shcherbakov, V.D., Plechov, P.Yu., Koulakov, I.Yu., 2022. Petrological evidence of rapid evolution of the magma plumbing system of Bezymianny volcano in Kamchatka before the December 20th, 2017 eruption. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 421, 107422. Available at: https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2021.107422

D'Auria, L., Koulakov, I., Prudencio, J., et al. (2022). Rapid magma ascent beneath La Palma revealed by seismic tomography. Scientific Reports, 12, 17654. https://doi.org/10.1038/s41598-022-21818-9

Dannberg, J., & Sobolev, S. (2015). Low-buoyancy thermochemical plumes resolve controversy of classical mantle plume concept. Nature Communications, 6, 6960. https://doi.org/10.1038/ncomms7960

Deng, S., Liu, S., Mo, X., Jiang, L., & Bauer Gottwein, P. (2021). Polar Drift in the 1990s Explained by Terrestrial Water Storage Changes. Geophysical Research Letters, 48(7). https://doi.org/10.1029/2020gl092114

Dobretsov, N.L., Kirdyashkin, A.G. & Kirdyashkin, A.A., 2001. Deep Geodynamics. Novosibirsk: Publishing House of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, GEO Branch, 408 p.

Dou, H., Xu, Y., Lebedev, S., Chagas de Melo, B., van der Hilst, R. D., Wang, B., & Wang, W. (2024). The upper mantle beneath Asia from seismic tomography, with inferences for the mechanisms of tectonics, seismicity, and magmatism. Earth-Science Reviews, 247, 104595. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2023.104595

Dyachenko, A. I. (2003). Earth's magnetic poles. MCCME.

Elkins-Tanton, L. T., Grasby, S. E., Black, B. A., Veselovskiy, R. V., Ardakani, O. H., & Goodarzi, F. (2020). Field evidence for coal combustion links the 252 Ma Siberian Traps with global carbon disruption. Geology, 48(10), 986-991. https://doi.org/10.1130/G47365.1

Ernst, R. E., & Buchan, K. L. (2002). Maximum size and distribution in time and space of mantle plumes: evidence from large igneous provinces. Journal of Geodynamics, 34, 309-342.

Federal Research Center, Unified Geophysical Service of the Russian Academy of Sciences, n.d. Available at: http://www.ceme.gsras.ru/zr/contents.html

Fedorenko, V. A., Lightfoot, P. C., Naldrett, A. J., Czamanske, G. K., Hawkesworth, C. J., Wooden, J. L., & Ebel, D. S. (1996). Petrogenesis of the Flood-Basalt Sequence at Noril'sk, North Central Siberia. International Geology Review, 38(2), 99-135. https://doi.org/10.1080/00206819709465327

Geyer, R., Jambeck, J. R., & Law, K. L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. Science Advances, 3(7). https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782

Halldórsson, S. A., Marshall, E. W., Caracciolo, A., et al. (2022). Rapid shifting of a deep magmatic source at Fagradalsfjall volcano, Iceland. Nature, 609, 529-534. https://doi.org/10.1038/s41586-022-04981-x

Hantemirov, R. M., Corona, C., Guillet, S., et al. (2022). Current Siberian heating is unprecedented during the past seven millennia. Nature Communications, 13, 4968. https://doi.org/10.1038/s41467-022-32629-x

Holzworth, R.H., Brundell, J.B., McCarthy, M.P., Jacobson, A.R., Rodger, C.J. & Anderson, T.S., 2021. Lightning in the Arctic. Geophysical Research Letters, 48, e2020GL091366. Available at: https://doi.org/10.1029/2020GL091366

International Committee GCGE GEOCHANGE. (2010). Global environmental changes: Threat to civilization development (Vol. 1). London: GCGE. ISSN 2218-5798

Ivanov, A.V., He, H., Yan, L., Ryabov, V.V., Shevko, A.Y., Palesskii, S.V., Nikolaeva, I.V., 2013. Siberian Traps large igneous province: Evidence for two flood basalt pulses around the Permo-Triassic boundary and in the Middle Triassic, and contemporaneous granitic magmatism. Earth-Science Reviews, 122, pp.58–76. Available at: https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.04.001

Khain V.E Geology of the USSR, Beiträge zur Regionalen Geologie der Erde. 1985 Berlin-Stuttgart, Germany:Gebrüder Bornträger.

Kirdyashkin, A.A. & Kirdyashkin, A.G., 2013. Interaction of a Thermochemical Plume with Mantle Free-Convective Flows and Its Influence on Mantle Melting and Recrystallization. Geology and Geophysics, 54(5), pp.707–721

Kiyosugi, K., Loughlin, S. C., Siebert, L., & Takarada, S. (2014). Characterisation of the Quaternary eruption record: analysis of the Large Magnitude Explosive Volcanic Eruptions (LaMEVE) database. Journal of Applied Volcanology, 3(5). https://doi.org/10.1186/2191-5040-3-5

Konstantinov, K. M., Bazhenov, M. L., Fetisova, A. M., & Khutorskoy, M. D. (2014). Paleomagnetism of trap intrusions, East Siberia: Implications to flood basalt emplacement and the Permo–Triassic crisis of biosphere. Earth and Planetary Science Letters, 394, 242-253. https://doi.org/10.1016/j.epsl.2014.03.029

Koptev, A., & Cloetingh, S. (2024). Role of Large Igneous Provinces in continental break-up varying from "Shirker" to "Producer." Communications Earth & Environment, 5, 27. https://doi.org/10.1038/s43247-023-01191-9

Koulakov, I. Y. (2008). Upper mantle structure beneath Southern Siberia and Mongolia from regional seismic tomography. Russian Geology and Geophysics, 49(3), 187-196. https://doi.org/10.1016/j.rgg.2007.06.012

Larson, R.L. & Olson, P., 1991. Mantle plumes control magnetic reversal frequency. Earth and Planetary Science Letters, 107(3–4), pp.437–447. Available at: https://doi.org/10.1016/0012-821X(91)90091-U

Li, S., Li, Y., Zhang, Y., Zhou, Z., Guo, J., & Weng, A. (2023). Remnant of the late Permian superplume that generated the Siberian Traps inferred from geomagnetic data. Nature Communications, 14, 1311. https://doi.org/10.1038/s41467-023-37053-3

Livermore, P. W., Hollerbach, R., & Finlay, C. C. (2017). An accelerating high-latitude jet in Earth's core. Nature Geoscience, 10, 62–68. https://doi.org/10.1038/ngeo2859

Lvova, E. V. (2010). Tectonics of mantle plumes: Evolution of basic concepts. Moscow University Geology Bulletin, 5, 21-29.

Mazaud, A. & Laj, C., 1991. The 15 m.y. geomagnetic reversal periodicity: a quantitative test. *Earth and Planetary Science Letters*, 107(3–4), pp.689–696. Available at: https://doi.org/10.1016/0012-821X(91)90111-T

Mikhailova, R. S. (2014). Strong earthquakes in the mantle and their influence in the near and far zone. Geophysical Survey RAS. http://www.emsd.ru/conf2013lib/pdf/seism/Mihaylova.pdf

Mikhailova, R. S., Ulubieva, T. R., & Petrova, N. V. (2021). The Hindu Kush earthquake of October 26, 2015 with Mw=7.5, I0~7: Previous seismicity and aftershock sequence. Earthquakes in Northern Eurasia, 24(2015), 324-339. https://doi.org/10.35540/1818-6254.2021.24.31

Nikiforova, M.P., 2017. Extremely low total ozone values over the northern Ural and Siberia in the end of January 2016. AOO. Available at: doi:10.15372/AOO20170102

Ostle, C., Thompson, R. C., Broughton, D., Gregory, L., Wootton, M., & Johns, D. G. (2019). The rise in ocean plastics evidenced from a 60-year time series. Nature Communications, 10(1622). https://doi.org/10.1038/s41467-019-09506-1

Popykina, A., Ilin, N., Shatalina, M., Price, C., Sarafanov, F., Terentev, A., & Kurkin, A. (2024). Thunderstorms near the North Pole. Atmosphere, 15(3), 310. https://doi.org/10.3390/atmos15030310

Rantanen, M., Karpechko, A. Y., Lipponen, A., Nordling, K., Hyvärinen, O., Ruosteenoja, K., Vihma, T., & Laaksonen, A. (2022). The Arctic has warmed nearly four times faster than the globe since 1979. Communications Earth & Environment, 3, 168. https://doi.org/10.1038/s43247-022-00498-3

Roger L. Larson, Peter Olson, Mantle plumes control magnetic reversal frequency, Earth and Planetary Science Letters, Volume 107, Issues 3–4, 1991, Pages 437-447, ISSN 0012-821X, https://doi.org/10.1016/0012-821X(91)90091-U

Romagnoli, C., Zerbini, S., Lago, L., Richter, B., Simon, D., Domenichini, F., Elmi, C., & Ghirotti, M. (2003). Influence of soil consolidation and thermal expansion effects on height and gravity variations. Journal of Geodynamics, 35(4-5), 521-539. https://doi.org/10.1016/S0264-3707(03)00012-7

Roshydromet. (2022). Report on climate features in the Russian Federation for 2021. Moscow: Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring.

Roshydromet. (2024). Report on climate features in the Russian Federation for 2023. Moscow: Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring.

Samenow, J. (2019, August 12). Lightning struck near the North Pole 48 times on Saturday, as rapid Arctic warming continues. The Washington Post. https://www.washingtonpost.com/weather/2019/08/12/lightning-struck-within-miles-north-pole-saturday-rapid-arctic-warming-continues/

Sawyer, D. E., Urgeles, R., & Lo Iacono, C. (2023). 50,000 yr of recurrent volcaniclastic megabed deposition in the Marsili Basin, Tyrrhenian Sea. Geology, 51(11), 1001-1006. https://doi.org/10.1130/G51198.1

Sherstyukov, B. G. (2023). Global warming and its possible causes. Journal of Hydrometeorology and Ecology, 70, 7-37. https://doi.org/10.33933/2713-3001-2023-70-7-37

Smirnov, S. Z., et al. (2021). High explosivity of the June 21, 2019 eruption of Raikoke volcano (Central Kuril Islands): Mineralogical and petrological constraints on the pyroclastic materials. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 418, 107346. https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2021.107346

Smolkov, G. Ya. (2018). Exposure of the solar system and the earth to external influences. Physics & Astronomy International Journal, 2(4), 310-321. https://doi.org/10.15406/paij.2018.02.00104

Smolkov, G. Y. (2020). Heliogeophysical research. Heliogeophysical Research, 25, 14-29. http://vestnik.geospace.ru/index.php?id=569

Sobolev, S. V., Sobolev, A. V., Kuzmin, D. V., Krivolutskaya, N. A., Petrunin, A. G., Arndt, N. T., Radko, V. A., & Vasiliev, Y. R. (2011). Linking mantle plumes, large igneous provinces and environmental catastrophes. Nature, 477, 312-316.

Sobolev, S.V., Sobolev, A.V., Kuzmin, D.V., Krivolutskaya, N.A., Petrunin, A.G., Arndt, N.T., Radko, V.A. & Vasiliev, Y.R., 2011. Linking mantle plumes, large igneous provinces and environmental catastrophes. Nature, 477, pp.312–316. Available at: DOI: 10.1038/nature10385

Swallow, E. J., Wilson, C. J. N., Charlier, B. L. A., & Gamble, J. A. (2019). The Huckleberry Ridge Tuff, Yellowstone: evacuation of multiple magmatic systems in a complex episodic eruption. Journal of Petrology, 60, 1371-1426. https://doi.org/10.1093/petrology/egz034

Syvorotkin, V.L., 2018. Deep degassing in polar regions of the planet and climate change. APOG. Available at: doi:10.29222/ipng.2078-5712.2018-23.art48

TASS. (2024, January). Russia's territory is warming 2.5 times faster than the rest of the planet. TASS News Agency. https://tass.ru/obschestvo/16009287

USDP project. (n.d.). In Earthquake Research Institute, The University of Tokyo. Retrieved December 31, 2024, from https://www.eri.u-tokyo.ac.jp/KOHO/Yoran2003/sec4-5-eng.htm#:~:text=USDP%20consists%20of%20two%20phases%20

Viterito, A. (2022). 1995: An important inflection point in recent geophysical history. International Journal of Environmental Sciences & Natural Resources, 29(5). https://doi.org/10.19080/ijesnr.2022.29.556271

Volcanic fluid research center. (n.d.). Understanding of the conduit system at Unzen Volcano. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo. Retrieved December 31, 2024, from https://www.eri.u-tokyo.ac.jp/VRC/vrc/usdp/conduit.html

Watts, J.D., Potter, S., Rogers, B.M., Virkkala, A.-M., Fiske, G., Arndt, K.A., et al., 2025. Regional hotspots of change in northern high latitudes informed by observations from space. Geophysical Research Letters, 52, e2023GL108081. Available at: https://doi.org/10.1029/2023GL108081

Why the Tongan eruption will go down in the history of volcanology. (2022). Nature, 602, 376-378. https://doi.org/10.1038/d41586-022-00394-y

Witze, A. (2017). Earth's lost history of planet-altering eruptions revealed. Nature, 543, 295-296. https://doi.org/10.1038/543295a

Xia, Y. et al., 2021. Significant contribution of severe ozone loss to the Siberian-Arctic surface warming in spring 2020. Geophysical Research Letters, 48, e2021GL092509. Available at: https://doi.org/10.1029/2021GL092509

Zonenshain, L.P. & Kuzmin, M.I., 1993. Deep Geodynamics of the Earth. Geology and Geophysics, 34(4), pp.3–13.

Zonenshain, L.P., Kuzmin, M.I. *Deep Geodynamics of the Earth* // *Geology and Geophysics*, 1993, Vol. 34 (4), pp. 3–13.

Zotov, L. V., Barkin, Yu. V., & Lyubushin, A. A. (2009). Geocenter motion and its geodynamics. In Proceedings of the Conference "Space Geodynamics and Modeling of Global Geodynamic Processes" (pp. 98-101). Siberian Branch of RAS.