

Séance publique du 1^{er} décembre 2025

Changement climatique et hautes latitudes

Jean-Paul LEGROS

Académie des Sciences et Lettres de Montpellier

MOTS-CLÉS

Températures terrestres, sols polygonaux arctiques, fentes en coin, permafrost, pergélisol, *alaas*, méthane, gaz carbonique, émissions gazeuses, Alaska.

RÉSUMÉ

Les mesures révèlent que l'Arctique se réchauffe trois ou quatre fois plus vite que le reste de la surface terrestre avec, comme conséquences principales, la fusion des glaciers, la diminution de la durée d'enneigement, l'augmentation du débit des rivières, la perte de surface de la glace de mer. Les terres se transforment aussi. La grande surface occupée par les sols arctiques, leur organisation géométrique étonnante, leur fonction de préservation des archives paléontologiques de la Terre et de stockage du carbone, enfin leur rôle dans les émissions gazeuses expliquent leur intérêt scientifique et patrimonial. Tout cela est abordé. Aujourd'hui, l'homme réagit comme il peut sur des sols fréquemment boueux et donc instables.

INTRODUCTION

Depuis 1850, on observe une augmentation des températures mondiales de plus de 1° C. Cela s'explique et se modélise assez bien si l'on tient pour responsables les gaz à effet de serre relâchés dans l'atmosphère par les activités humaines. Cette augmentation est encore faible mais inquiétante pour le futur si elle se poursuit à la même vitesse, d'où les travaux actuels sur le changement climatique [IPCC, 2021].

Ici nous allons examiner seulement les hautes latitudes. Plusieurs raisons le justifient.

D'abord, tous les indicateurs montrent, et en particulier la température locale du sol, que le nord de la planète se réchauffe plus vite que le reste du globe. C'est ce qu'on appelle « amplification arctique » (*Arctic amplification*). Il est donc intéressant de regarder les choses de près dans cette région. Ensuite, même si les scientifiques restent prudents, la presse ne cesse d'inquiéter les populations et de les persuader que tout cela est très grave. Sans prétendre trancher, il est intéressant d'essayer d'y voir plus clair. En outre, il s'agit d'espaces sinon déserts, du moins peu transformés par l'Homme. On peut donc espérer que les modifications du milieu naturel y sont plus faciles à voir qu'ailleurs. En plus, les terres arctiques, gelées, représentent environ 24 % de la masse continentale de l'hémisphère Nord. C'est donc tout à fait considérable ; on ne peut les négliger. Notons qu'il y a au moins trois façons d'en préciser la limite sud ; cela peut être : le cercle polaire (au-dessus duquel on observe, chaque année, au moins une nuit sans que le soleil se couche) ; l'isotherme 10° C du mois le plus chaud (au-delà duquel les arbres ne poussent plus) ; la présence de sols gelés (ce qui a toutes sortes de conséquences que nous verrons). Enfin, et surtout, ces régions correspondent à des paysages méconnus, beaux, parfois étranges ou même énigmatiques. J'ai voulu partager avec vous mon émerveillement.

Le plan de la présentation sera le suivant, en quatre séquences. D'abord, on rappellera rapidement quelques données sur les changements climatiques passés ou actuels. Ensuite – et ce sera la partie centrale de l'exposé –, on examinera en détail le milieu naturel et on montrera comment son organisation est étroitement liée au froid. En troisième lieu, on abordera le problème des émissions gazeuses car chacun sait que le réchauffement peut amener les sols à libérer des gaz, au point, nous dit-on, de transformer les terrains arctiques en bombe climatique. Enfin, on verra quelles sont les conséquences actuelles de la diminution du froid.

1. Mesure et observations du réchauffement

1.1. Évolution des températures

Au cours des temps géologiques, les températures moyennes terrestres varient énormément. On est monté, à plusieurs reprises, au-dessus de 25° C. Mais il est rassurant d'observer qu'avec nos 15 degrés actuels, nous sommes dans une des périodes les plus froides que la Terre ait connues depuis plus de 500 millions d'années. Dans les derniers 500 000 ans, les températures ont beaucoup varié selon un cycle de 100 000 ans, comme le prouvent les carottages réalisés dans les glaces du Groenland et de l'Antarctique. Cela est dû à plusieurs causes, dont les irrégularités de rotation de la Terre autour du Soleil. À cette échelle de temps, on perçoit que l'on est sur un sommet de courbe, donc dans une période relativement chaude à l'intérieur de cette période froide qu'est le Quaternaire. La montée en température qui nous a conduits là est de l'ordre de sept degrés en 10 000 ans soit moins de 0,1° C par siècle en moyenne. Mais cela s'accélère beaucoup, puisque l'on parle pour la période actuelle de 2° C en plus par siècle pour l'atmosphère terrestre. Et c'est bien pire sous les hautes latitudes. Par exemple l'AMAP qui est le *Conseil des Pays de l'Arctique* donne les valeurs suivantes : entre 1971 et 2019, donc sur un demi-siècle seulement, la moyenne annuelle de la température de l'air à proximité du sol a augmenté de 3,1° C soit une tendance de 6° C par siècle !

1.2. Observation du réchauffement actuel

Considérons d'abord la surface englacée de l'océan glacial arctique. On a choisi de la mesurer tous les ans à la même époque, en juillet. Elle est en diminution rapide. Entre 1980 et 2024, elle est passée de 10,5 millions de km² à 7,5 millions environ [IPCC, 2021].

La seconde matérialisation du réchauffement est la fusion des glaciers. On l'observe en épaisseur de glace perdue, mais on la mesure précisément en hauteur équivalente d'eau. En effet la glace est plus ou moins dense et bulleuse ; mieux vaut donc se référer à la quantité d'eau correspondante. C'est ainsi que deux glaciers américains de l'Alaska ont perdu l'un et l'autre plus de 15 mètres de hauteur d'eau en seulement un demi-siècle. Sous nos latitudes c'est pire : la mer de glace a perdu 3,64 mètres de hauteur d'eau pour la seule année 2022. Dans le même temps, les glaces du Groenland et de l'Antarctique perdent de l'épaisseur sans diminution très sensible de la surface occupée. Dans l'hémisphère Sud, on observe des choses comparables.

Un autre indicateur du réchauffement est la couverture neigeuse. En Alaska encore, à Anchorage, on observe une contraction progressive de la durée d'enneigement. En revanche l'épaisseur cumulée de neige qui tombe chaque année ne paraît pas en diminution [Thoman et Walsh, 2019]. C'est que le réchauffement augmente l'évaporation sur la mer et donc les précipitations (d'environ 10 % d'après les mesures).

Au passage, on note qu'il y a toutes sortes d'indicateurs possibles pour ce seul paramètre qu'est la neige. Ainsi, peut-on déterminer l'épaisseur cumulée sur la saison, la date de la première chute, la date de la dernière chute, la surface terrestre couverte à telle ou telle date... Par exemple, la surface totale couverte par les neiges, en avril dans l'hémisphère Nord, est en diminution.

Bien sûr la fusion de la glace se traduit par un débit accru des cours d'eau. Entre 1971 et 2019, on a calculé l'accroissement moyen du débit des huit principales rivières de l'Arctique. Il est de 7,8 %. Il y a bien d'autres indicateurs mesurés : augmentation de la quantité de calories renfermée dans les océans, diminution de leur salinité à proximité des glaciers qui fondent, augmentation du niveau des océans...

Cependant, même si le niveau de la mer monte globalement dans le monde, ce n'est pas forcément vrai en bordure des calottes polaires. En effet, déchargés du poids des glaces, les continents subissent ce qu'il convenu d'appeler *rebond post-glaciaire* ou encore *réajustement isostatique (land uplift)*. La montée est de l'ordre de quelques millimètres par an. Localement, elle peut dépasser le centimètre par an. C'est considérable. La terre monte plus vite que la mer... qui semble donc descendre. Un proverbe lapon dit que là où le grand-père attachait sa barque, le petit fils plante ses choux [Thomas, 2015]. Il en résulte des paysages typiques avec présence de terrasses marines, sortes de paliers horizontaux exondés de plusieurs mètres en bordure d'océan. Les hommes s'installent là, en Islande par exemple.

Si l'Arctique se réchauffe globalement plus vite qu'ailleurs c'est qu'il y a des boucles de rétroaction. L'augmentation de température fait fondre les neiges et aussi les glaces continentales ou marines qui renvoyaient l'énergie solaire vers l'espace. Alors le sol et la mer, devenus sombres, absorbent d'avantage cette énergie ce qui renforce le réchauffement et donc la fusion, ainsi de suite. D'autres phénomènes interviennent sans doute. Par exemple, il y aurait modification de la circulation atmosphérique (cyclones plus nombreux ou plus violents) avec pour effet un transport accru de la chaleur des régions tropicales vers les régions polaires. Enfin, le sol intervient : venons-en à cet élément.

2. Examen des espaces continentaux

2.1 Permafrost

Même si cela ne correspond pas au record terrestre, notons d'abord que l'Arctique est une région de fort contraste thermique entre l'été et l'hiver puisque, pendant toute une partie de l'année, le Soleil ne se lève pas ou ne se couche pas.

Partout dans le monde, la température des terrains est plus élevée à grande profondeur à cause du gradient géothermique : dans les mines profondes, il fait chaud. Ainsi la température diminue-t-elle vers la surface au point d'y devenir négative sous les hautes latitudes. Il y a donc là une couche de sol gelée qui peut représenter plusieurs centaines de mètres d'épaisseur. C'est le *permafrost* (anglais) ou *pergélisol* (français). Pourtant en été, sous l'influence du Soleil, le permafrost dégèle en surface sur quelques décimètres d'épaisseur. On a d'abord baptisé *mollisol* cette couche alternativement gelée et dégelée. Ce n'est pas un bon terme pour diverses raisons. Il vaut mieux utiliser le vocable *couche active* ou *active layer* en anglais.

Le permafrost est plus ou moins riche en glace. Il correspond souvent à de fins cristaux assurant la cohésion des particules terreuses. Alors, pour le creuser, il vaut mieux disposer d'un marteau-piqueur. Dans d'autres cas, c'est une boue solidifiée, plus riche en glace qu'en sédiment. Les Russes appellent cela *Yedoma*. Enfin, la glace peut

apparaître seule en bancs ou lentilles. Tous ces matériaux sont particulièrement labiles et susceptibles de s'effondrer lors d'un réchauffement.

Dire que le permafrost dégèle c'est dire que fond la glace qu'il contient. Melissa Ward Jones, de l'université de Fairbanks (Alaska, USA), propose une expérimentation en bocal extrêmement simple et démonstrative de ce phénomène. Le sol réchauffé à la température du laboratoire s'effondre sur lui-même et l'eau de fusion de la glace passe en surface. Bien entendu, l'effondrement est d'autant plus important que la quantité de glace est élevée au départ dans le permafrost. Cette eau libérée en surface finit par former des mares ou des lacs en zone plane. Au contraire, en zone de pente, elle est évacuée latéralement vers les rivières.

Une coupe verticale et latérale dans le pergélisol fait apparaître des régions nordiques où il est continu et parfois épais, et des régions plus au sud où il s'amincit progressivement jusqu'à disparaître complètement. En surface se mettent en place les lacs que nous venons de mentionner. Dans un milieu globalement englacé, les lacs, qui sont faits d'eau libre, correspondent à des points plus chauds dans le paysage. Sous eux, le sol ne gèle pas. Ce sol jamais gelé en pays périodiquement ou toujours gelé, est le *talik*. Au-dessus du permafrost, la végétation est clairsemée et rarement forestière, sauf dans une petite tranche au sud. Au nord, c'est le royaume de la toundra avec ses lichens, ses mousses, ses arbrisseaux, ses carex et ses sphaignes dans les tourbières.

La surface occupée par le permafrost est difficile à déterminer exactement. En effet, vers le sud, il devient discontinu puis sporadique, donc difficile à cartographier. En plus, il est peu visible en surface. On admet qu'il occupe actuellement 23 à 24 millions de km² c'est-à-dire 20 à 25 % des terres émergées de l'hémisphère Nord. Et les lacs qu'il contient représentent un quart de la surface des lacs d'eau douce du monde. Comme le reste du paysage, le permafrost se réchauffe sans que sa température passe nécessairement au-dessus de zéro degré. Le GIEC indique, pour lui, une augmentation de température d'environ 0,03° C par an à 20 mètres de profondeur, ce qui fait tout de même 3° C en cent ans.

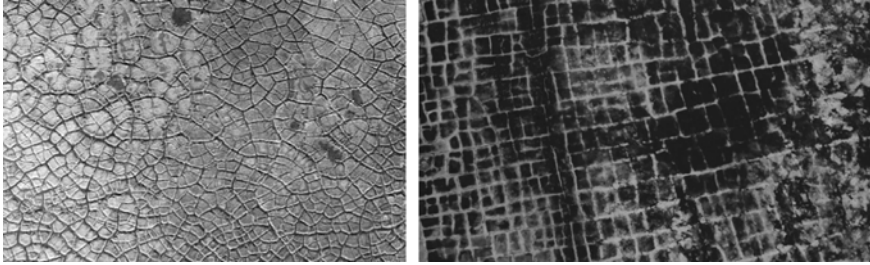
2.2 Sols polygonaux arctiques

Ici, nous nous intéressons seulement aux rives de l'océan glacial arctique. On voit les mêmes paysages en Sibérie, Grand Nord canadien et Alaska. Mais l'État américain offre des clichés satellitaires avec une meilleure résolution. C'est donc là que nous allons faire des observations. Cette zone se distingue par l'abondance des lacs qui s'y trouvent. On mentionne des millions de lacs. En fait, ils sont innombrables au sens strict du terme. En effet, leur taille va du millier d'hectares à des trous d'eau de quelques mètres carrés. Pour caractériser le milieu, on préfère évoquer la *limnité* c'est-à-dire la surface en eau rapportée à la surface totale du terrain. Dans la région, c'est 20 % au moins [Schongabner, 2016] et localement beaucoup plus. En Russie, on nomme ces lacs *alaas*. Selon que les lacs sont gelés ou pas, frappés ou pas par le Soleil, ils apparaissent de différentes couleurs (noirs, bleus, verts, blancs...) sur les clichés de Google. C'est que les couleurs des enregistrements satellitaires n'ont rien de naturel. Elles traduisent artificiellement des longueurs d'onde que la caméra intercepte mais que l'œil humain ne perçoit pas nécessairement. Toutefois, la forme arrondie des lacs permet de les reconnaître facilement.

Lorsque l'on observe les lacs de plus près, en zoomant sur les clichés, on s'aperçoit qu'ils sont séparés par des sols découpés en polygones. On parle de *sols polygonaux* arctiques. Ils sont présents partout sur substrat meuble, c'est-à-dire sur plus de trois millions de km² [Ramage *et al.*, 2024]. Ces polygones ont une dimension fort variable mais généralement voisine d'une quinzaine de mètres du cœur de l'un au cœur du

suisant. Notons que la première observation de ces sols étonnants a été faite en 1931 à partir du dirigeable LZ 127 Graf Zeppelin affrété par une expédition scientifique germano-soviétique.

Les sols polygonaux prennent différentes formes (photos 1 et 2). En général, ils ressemblent à des pentagones ou hexagones plus ou moins irréguliers (angles proches de 120 degrés). Mais ils sont parfois carrés ou rectangulaires et comme tracés au cordeau (angles de 90 degrés). Différents paramètres sont responsables de ces variations de géométrie : teneur en argile, humidité, température, pente locale et surtout proximité ou non du rivage d'un lac susceptible d'orienter la fabrication des premiers polygones.



Illustrations 1 et 2 : Sols polygonaux arctiques irréguliers ou bien rectangulaires sinon carrés. Clichés Google Earth.

Tout n'est pas encore très clair concernant la mise en place de ces formes. Limitons-nous à l'essentiel qui fait plus ou moins consensus [Shur *et al.*, 2025]. Quand le sol gèle en automne, il se rétracte comme le font la plupart des solides en se refroidissant. Des fissures s'ouvrent. La rétraction étant plus forte près de la surface, elles prennent la forme de *fentes en coin* (*ice wedges*). Au printemps et en été, lors de la fusion de la neige sur le sol et aussi de la fusion de la glace dans la couche active, il se produit trois phénomènes simultanément mais séparés ici pour mieux les présenter (illustration 3) :

1. remplissage des fentes par de l'eau qui regèle immédiatement au contact du permafrost sous-jacent, froid et imperméable ;
2. tendance à la fermeture partielle des fentes par gonflement du sol réchauffé, mais cela provoque le déplacement de la terre seulement dans la couche active qui n'est pas bloquée latéralement par la glace ;
3. montée des bordures des polygones car la glace des fentes en coins est poussée vers le haut en raison des forces de Buoyancy qui s'exercent latéralement sur elles (poussée d'Archimède pour faire simple).

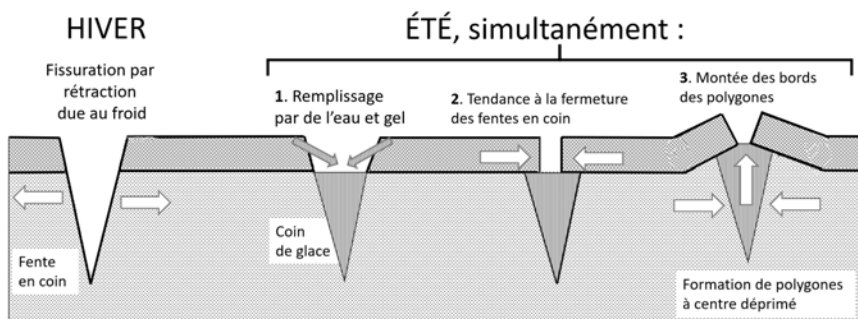


Illustration 3 : Formation des polygones à centre déprimé.

La première année, les coins de glace sont très étroits. Les alternances de gel/dégel des années postérieures vont provoquer leur fissuration verticale, le comblement de la fissure par de l'eau qui gèle à nouveau et leur élargissement. Dans certains cas, on voit apparaître la structure feuilletée verticale qui prouve la réalité du phénomène. Il y a donc grossissement progressif en largeur jusqu'à parfois 6 mètres. Pour cela, il faut des millénaires. Au contact de ces coins de glace, les sédiments sont tordus vers le haut par la pression.

En surface, les bords relevés des polygones sont appelés par les anglophones *rims* (rebords) ou *shoulders* (épaules). Ceci détermine des polygones à centre déprimé appelés *low centered polygons* (illustration 4). Sur les photographies aériennes, ils sont très caractéristiques car ils sont séparés par les creux des fentes en coin. On pourrait parler de polygones à limites doubles. On trouve aussi ces polygones à bords relevés en Antarctique, dans les *Dry Valleys*, lieux exceptionnels car non recouverts par la glace.

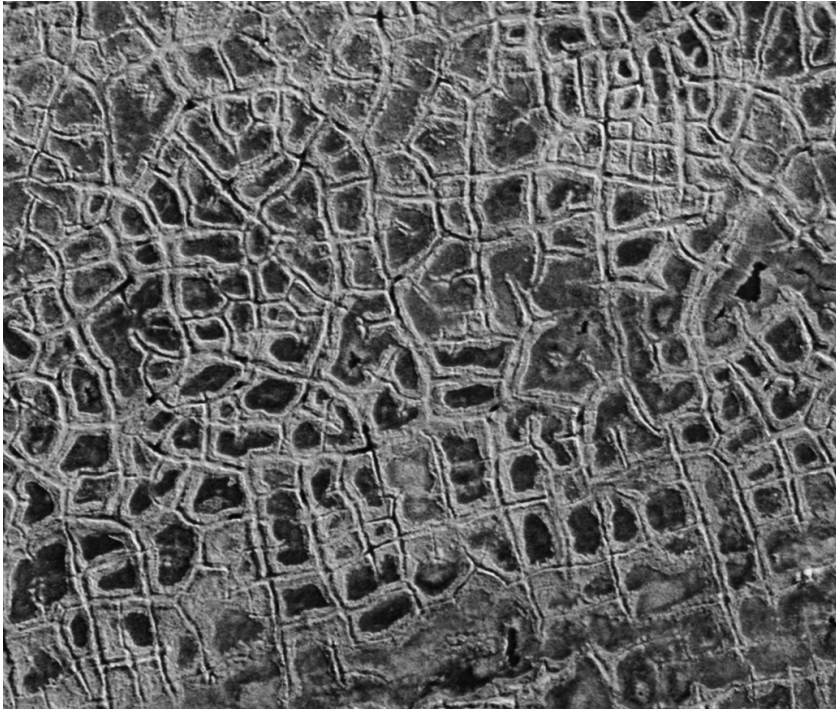


Illustration 4 : Polygones à centre déprimé. Alaska. Cliché Google Earth

Voyons maintenant la dégradation des polygones sous l'action du réchauffement post-glaciaire et peut-être actuel. La glace des fentes fond en surface et les polygones apparaissent séparés par de l'eau. En outre, leur partie centrale, plus basse, peut s'enfoncer car, en profondeur, le permafrost reste gelé c'est-à-dire imperméable. En de très nombreux endroits, il semble que les mares internes aux polygones fusionnent, s'agrandissent, forment progressivement des lacs [Fraser *et al.*, 2018]. Le phénomène s'étale certainement sur des millénaires [Schongabner, 2016]. On observe, sous Google Earth, des polygones qui, de toute évidence, sont en train de disparaître dans l'eau. Dans les rares cas où on peut comparer des photographies du même lieu prises à presque un siècle de distance, on constate effectivement cet écroulement des rives des polygones. Malgré sa lenteur, le phénomène est parfois visible sous Google Earth, c'est-à-dire sur

des durées plus faibles. Pour le constater, il faut utiliser des missions photographiques séparées au moins de deux ou trois décennies. D'ailleurs, en regardant de près les bordures dentelées de certains lacs, on comprend leur origine en quelque sorte multipolygonale. Localement, les lacs sont oblongs et alignés parallèlement. C'est une preuve supplémentaire de leur origine par destruction des diguettes entre polygones. En effet les vagues, à la surface des mares, sapent les terres toujours dans la même direction, celle des vents dominants. Les études sur photographies aériennes indiquent que le recul des rives des lacs est de l'ordre d'un demi-mètre par an. En outre, non seulement les lacs augmentent leur surface, mais ils peuvent aussi s'approfondir. La glace fond ; le terrain s'enfoncé verticalement de quelques mètres, ceci sur quelques centaines d'hectares correspondant à des formes plus ou moins circulaires. Sur les photographies aériennes on voit que les structures d'effondrement sont très nombreuses, parfois emboîtées, parfois recoupées les unes par les autres. Le stade final est un envahissement par les eaux. On parle de *lacs de thermokarst*. En effet, à la vitesse près, cela ressemble à la formation des dolines en pays calcaire, par exemple sur le Larzac.

Pourtant une évolution différente peut intervenir quand la fusion est suivie d'un assèchement. Les fentes en coin diminuent de volume. La terre des bourrelets sus-jacents s'effondre. Les polygones s'arrondissent vers le bas en leur périphérie. On obtient un champ de bosses que les spécialistes appellent *high center polygons* ou *polygones à centre élevé*. Ils sont très communs dans les interfluves. Ils représentent en quelque sorte une évolution terminale et sont sans doute l'un des marqueurs du réchauffement climatique. Anna Liljedahl, de l'Université de Fairbanks, aux USA, a décrit précisément ce deuxième type d'évolution dès 2012. Un peu plus tard, elle a précisé ses idées dans une publication cosignée par 18 autres spécialistes [Liljedahl *et al.*, 2016]. Mais, par la suite, ce schéma a été recopié de publications en publications, sans toujours signaler qu'il y avait une autre évolution possible et peut-être même prépondérante : celle qui conduit à un ennoisement du paysage.

Un article publié en 2019 par un groupe de chercheurs allemands et norvégiens montre bien ces deux voies possibles d'évolution en fonction du degré local d'humidité [Nitzbon *et al.*, 2019]. En réalité, c'est très complexe car les deux voies peuvent se succéder dans le temps. En effet, à force de grandir, les lacs peuvent atteindre la rivière la plus proche et se vidanger au travers d'un court chenal. Dans ce contexte, se fait jour une conclusion contre-intuitive défendue dans une thèse et validée, semble-t-il, par des mesures satellitaires : plus il fait chaud, plus les lacs disparaîtraient, en dépit de la fusion accrue des glaces et de la production concomitante d'eau [Schongabner, 2016]. Notons que l'on voit des polygones apparaître sur le fond asséché de ces lacs. Pour certains auteurs, cela correspond simplement aux racines des anciens polygones, maintenant dépourvus de glace et bourrés de terre [Gagnon *et al.*, 2024]. Pour la plupart des autres, il s'agirait d'une nouvelle génération de polygones. Sur plusieurs milliers d'années, on aurait : polygonation, puis mise à plat et effondrement sous l'effet de la submersion, puis assèchement, puis polygonation à nouveau...

En résumé, l'Arctique est partout découpé en polygones ; ces polygones sont de toutes sortes de formes. Ils apparaissent bien souvent en mélange sur de courtes distances donnant ainsi des paysages fort curieux. La question de savoir si les polygones en creux évoluent vers des champs de bosses, ou bien s'ils poursuivent leur dégradation jusqu'à disparaître dans des lacs, peut sembler du détail réservé aux spécialistes. En fait, le fond du problème est de déterminer si, au-delà de ce qu'on peut observer ici et là, le milieu se dessèche globalement ou bien s'humidifie globalement sous l'action du changement climatique. Et pour quelles échelles de temps ? En effet, il y a des conséquences sur les émissions gazeuses. Nous allons les présenter plus loin. La première hypothèse, celle du

dessèchement généralisé, est étayée par la montée isostatique, déjà signalée, des pays nordiques. Le relief se renforce et le drainage s'améliore. La seconde hypothèse, celle d'un ennoïement des zones côtières, est logique, à court terme, dans le contexte d'une augmentation rapide de température qui provoque la fusion de la glace contenue dans le sol et donc l'apparition d'eau.

Notons qu'un peu partout en France on observe la trace de sols polygonaux dont on comprend maintenant qu'ils sont les témoins des périodes froides subies par notre pays dans le passé. Les sites du Loiret sont bien connus. La glace des fentes en coin a disparu. Elle est remplacée par de la terre. Mais le plus bel exemple est sans doute celui de la Costière du Gard. Notons que ces structures ne sont visibles en surface que dans des conditions particulières faisant intervenir le type de culture et le degré d'humidité du sol (illustration 5).



Illustration 5 : Sols polygonaux fossiles en Costière du Gard.
Photo Guy Bouteyre, Compagnie BRL.

Ces structures polygonales ont une certaine valeur graphique, en particulier l'hiver. Soufflée par le vent, la neige s'accumule dans les fentes entre les polygones. Le photographe Yan Arthus-Bertrand a observé ce processus en Antarctique. Il vend sur internet le cliché correspondant.

2.3 Autres curiosités

Avant de quitter la plaine côtière en bordure de l'océan arctique, il faut signaler d'autres formes liées au froid, en particulier les pingos. Ce sont des collines isolées dont le cœur est fait de glace. Leur hauteur peut atteindre 50 mètres. On les reconnaît facilement à leur sommet où la terre se fissure comme un pain qui, lors de la cuisson, gonfle sous l'effet de la levure. On dirait des volcans. L'explication est la suivante. Sous les lacs, il y a du talik, donc une zone non gelée. Quand un lac s'assèche progressivement, la diminution de sa profondeur provoque un refroidissement local. Le talik sous-jacent regèle en gonflant, une île émerge, puis une colline monte au cœur du lac. Mais l'eau souterraine formant le cœur du pingo peut venir d'ailleurs, si bien qu'il y a plusieurs origines possibles pour eux. Au nord du Canada, il existe un Parc national des Pingos.

Quittons la zone côtière. En Alaska, en avant des hautes montagnes du sud, c'est-à-dire entre l'océan et 700 ou 800 mètres d'altitude, se présente un paysage de collines. Celles-ci sont entaillées de glissements de terrain très caractéristiques. Ils matérialisent à leur manière la fonte du permafrost. Le sol se liquéfie et s'effondre brutalement. Il laisse la place à des dépressions dont les falaises forment des séries de demi-cercles, ceci pour des raisons qui tiennent à la physique des matériaux. La boue formée s'écoule par des ravines. Elle va alors s'accumuler à l'aval ou bien est évacuée par des cours d'eau. Le plus célèbre de ces effondrements est visible à l'est de la Sibérie. C'est le *cratère de Batagaika*, le mal nommé car il n'a rien de volcanique. Il représente aussi une forme du thermokarst. La falaise est considérable (de 50 à 100 mètres de haut). Cela montre que le permafrost est profondément affecté. Cet effondrement progresse chaque année par recul des parois. Certains l'ont surnommé le *trou de l'enfer*.

Les « ruisseaux perlés » sont fréquents dans ces zones. Ils ressemblent à des colliers de perles noires. C'est que l'eau exploite la structure polygonale du milieu.

Dans les tranchées, on peut voir les sols en coupe. Souvent, on y observe d'étranges festons. En effet, la terre demi-gelée est plastique et peut être déformée tout comme l'est une glace au chocolat sortie du congélateur et un peu réchauffée. Dans les sols, les forces à l'œuvre sont complexes et plus ou moins bien connues mais on sait qu'elles sont liées aux phénomènes de gel-dégel. On parle alors de cryoturbation. En surface, cela se traduit à l'échelle métrique ou décimétrique par l'apparition de toutes sortes de formes. Signalons, parmi elles, les célèbres « cercles de pierres » de l'archipel Svalbard. On sait qu'ils sont parfaitement naturels.

3. Émissions gazeuses

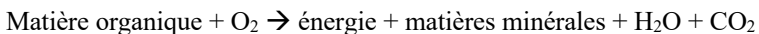
3.1. Mécanismes

On craint que le réchauffement climatique fasse disparaître le carbone accumulé dans les sols du Grand Nord et le renvoie vers l'atmosphère sous forme de gaz carbonique et de méthane. Nous allons en voir les mécanismes. En préambule, un seul chiffre suffit à révéler l'importance du problème : il y a autant de carbone stocké dans les sols arctiques et subarctiques que dans toute l'atmosphère terrestre.

Les émissions gazeuses à partir des sols sont liées à l'intervention de micro-organismes. Dans le détail, c'est très compliqué. En effet, certains microbes fabriquent des produits que d'autres consomment si bien que, dans les sols, il y a, au même moment, des transformations en chaîne et parfois antagonistes. Cela dépend de toutes sortes de facteurs. Ici nous nous limiterons à l'essentiel.

Les végétaux photosynthétiques absorbent le gaz carbonique de l'air pour fabriquer des produits carbonés : bois, racines, feuilles. Mais, chaque année, ces végétaux relâchent du carbone : excréta racinaires, feuilles mortes, racines pourries, fruits tombés au sol, troncs déracinés, etc. Des micro-organismes interviennent alors. Ils utilisent une grosse partie de ces matières organiques pour obtenir de l'énergie.

Cela s'écrit :



C'est une forme de respiration ou combustion lente si l'on préfère. La température est le principal facteur réglant l'activité des micro-organismes et donc la rapidité de la transformation. Chacun sait qu'il suffit de mettre un aliment au réfrigérateur pour ralentir sa dégradation par les micro-organismes ou de le placer au congélateur pour la bloquer presque complètement. Donc, il faut distinguer les sols des régions tempérées voire

chaudes et ceux des régions froides. Dans les régions chaudes ou tempérées, le cycle du carbone est très rapide. Les sols contiennent seulement les matières organiques difficilement recyclables. Ils sont donc peu humifères. Au contraire, en région froide (montagnes et hautes latitudes), les bactéries sont moins actives et la réaction de dégradation moins rapide. Les matières organiques s'accumulent largement dans les sols qui sont noirs et humifères. Ainsi, un réchauffement provoquant le réveil de la vie biologique pourrait-il mobiliser cette réserve carbonée avec, pour conséquence, une émission accrue de CO₂ en direction de l'atmosphère.

Mais, outre la température, un autre paramètre important intervient. Quand le sol est saturé d'eau, l'oxygène gazeux est pratiquement absent. En effet, il se dissout mal dans l'eau immobile. Dans ces conditions dites anoxiques (sans oxygène), la réaction que nous venons de voir ne peut pas se produire. Les émissions de gaz carbonique s'effondrent. On peut le montrer expérimentalement. Mais la vie s'est adaptée et les bactéries ont développé des stratégies spécifiques pour se procurer de l'énergie en l'absence d'oxygène. C'est le cas dans les tourbières. La fermentation est alors à l'œuvre. Les substances organiques sont découpées en petites molécules (acides, alcools, acétates, gaz carbonique, hydrogène). Puis du méthane est fabriqué en même temps que du gaz carbonique.

Matière Organique → CH₃COOH (acide acétique) → CH₄ (méthane) + CO₂ (gaz carbonique)

L'oxygène du CO₂ ne vient pas de l'atmosphère mais de la matière organique. Et ce CO₂ donne à son tour du méthane. Les chimistes expliquent que le carbone du CO₂ sert alors d'accepteur d'électron. Disons plus simplement que des micro-organismes se procurent l'oxygène, vital pour eux, en cassant la molécule de CO₂. En bref, dans les milieux mal oxygénés, le méthane, CH₄, est donc émis à la place du gaz carbonique.

La fabrication de ce méthane, CH₄, est révélée par l'apparition de bulles à la surface des eaux des marais et tourbières. Ce gaz, comme le gaz carbonique, contient du carbone 14. On peut donc calculer l'âge moyen des matières organiques dont il provient. C'est parfois plusieurs milliers d'années. Mais la principale contribution à la formation des bulles de méthane correspond aux couches de sol proches de la surface. Autrement dit, est renvoyé vers l'atmosphère surtout un carbone qui venait d'être fixé par la végétation. Cela participe quand même à l'effet de serre dans la mesure où le carbone, piégé sous forme de CO₂ par la photosynthèse, est renvoyé vers l'atmosphère sous forme de CH₄, qui est plus actif pour intercepter le rayonnement terrestre [Klapstein *et al.*, 2014]. S'il y a de la glace en surface, le méthane est piégé juste en dessous de manière spectaculaire. Si on fait un trou et si on approche une allumette, le trou s'enflamme. On rappelle que les feux follets sont des flammèches de méthane liées à des tourbières ou même à des cimetières. Elles sont allumées par l'étincelle d'un soulier ferré ou parfois s'enflamment spontanément. De quoi effrayer bien des gens !

En revanche, dans les rivières, surtout quand elles sont agitées par des remous, l'oxygène est incorporé à l'eau (cf. les bulleurs dans les aquariums). La toute première des réactions présentées, celle qui consomme de l'oxygène, peut se produire. Donc, les sédiments terreux véhiculés par les cours d'eau émettent du gaz carbonique vers l'atmosphère.

En résumé, sur le terrain, les choses sont complexes. Un étang peut relâcher du méthane, alors que la rivière voisine et les collines environnantes émettent du gaz carbonique. En outre, un sol émet du gaz carbonique dans sa couche de surface hors d'eau et du méthane dans sa partie profonde quand elle est submergée (nappe phréatique). Et le ratio « émission de CO₂/émission de CH₄ » change évidemment quand varie la profondeur de la nappe d'eau au sein du sol [Vanselow-Algan *et al.*, 2015].

3.2. Hydrates de méthane

Ils constituent un cas particulier important. Le méthane s'est accumulé, comme le pétrole, au cours des temps géologiques. Il est fréquent, sur Terre, sous forme d'hydrates dans lesquels des molécules d'eau entourent des molécules de méthane. Ce sont des clathrates. À l'œil, on dirait de la glace. Mais ces substances n'apparaissent et ne sont stables que sous une pression au moins égale à 35 bars, équivalente à une épaisseur d'eau de 350 mètres ou à une épaisseur de sédiments meubles d'environ 150 mètres. Si on les ramène à la surface, c'est-à-dire à la pression atmosphérique, les hydrates se décomposent par sublimation ; autrement dit, ils passent directement et rapidement à l'état vapeur. C'est la « glace qui brûle », au moins quand on approche une allumette.

Nous avons vu que la formation du méthane correspondait à la transformation de matières organiques en l'absence d'oxygène. Or des matières organiques sont piégées dans les sédiments marins. Il n'est donc pas étonnant de trouver des hydrates de méthane au fond de la mer, en dessous de 350 ou 400 mètres car ils sont alors stables. Mais au-delà de 1 500 mètres de profondeur, le gradient géothermique ne permet plus de les conserver à température suffisamment basse. Ils apparaissent donc en couronne autour des continents, sur les talus, au-delà des plateaux continentaux. On aimerait exploiter ces hydrates, mais on ne sait pas le faire à l'heure actuelle.

Récemment, en Sibérie, le survol par avion a permis de repérer des trous étranges, au moins 17 sinon plus. Ils mesurent jusqu'à 50 mètres de profondeur. Il y a deux explications possibles. La première est un effondrement du permafrost dans le cadre de phénomènes thermokarstiques, identiques, à la vitesse près, à ceux affectant les lacs examinés plus haut. Cette hypothèse, soutenue par des chercheurs américains, est crédible car on observe de tels effondrements de terrains un peu partout dans le monde. Ils sont tous remarquablement circulaires avec des puits strictement verticaux. En plus, on a trouvé de l'eau salée à la base de certains trous dans l'Arctique, ce qui indique un contact en profondeur avec la mer et exclut des phénomènes de surpression. La seconde explication, proposée initialement par des Russes, est une remontée explosive vers la surface de poches de méthane antérieurement piégées en profondeur dans le permafrost. En effet, on observe en surface des petites projections, parfois jusqu'à 200 mètres du trou. Ces remontées gazeuses seraient liées à la fusion de la glace mais aussi à des particularités géologiques locales (failles) car la conservation des hydrates de méthane ne peut pas intervenir à la base d'un puits de 50 mètres seulement dans des sédiments meubles : il n'y a pas suffisamment de pression. Dans ces trous, on a effectivement observé des teneurs élevées en méthane, ce qui n'est pas anormal dans de tels milieux. Voir les sols exploser sous l'effet de la folie humaine est un argument choc pour tous les amateurs de catastrophes planétaires et écologiques. Après leur création, les trous se remplissent d'eau par infiltration de la nappe au travers de leurs parois. Ensuite, ils ressemblent à des lacs comme les autres.

3.3 Bilan des émissions

Si on veut faire le bilan, il faut être attentif aux unités dans lesquelles sont exprimées les valeurs trouvées. On utilise volontiers les téragrammes c'est-à-dire les millions de tonnes (= 10^{12} grammes). Ce n'est pas pour le plaisir de compliquer mais pour ne pas manipuler des nombres caractérisés par trop de chiffres. En raison des poids atomiques des molécules, une tonne de CO_2 ne contient pas la même quantité de carbone qu'une tonne de CH_4 . Enfin, le pouvoir réchauffant de l'un et de l'autre sont différents. Si l'on veut additionner les deux effets climatiques, compte tenu des actions respectives de ces molécules sur le rayonnement infrarouge terrestre et compte tenu aussi de leur

durée de vie dans l'atmosphère, il faut multiplier par un facteur 28 les quantités de méthane mesurées avant de les ajouter aux quantités de carbone, créditées alors du coefficient 1. On parle de « CH₄-équivalent CO₂ ».

Une équipe a récemment tenté la synthèse des milliers de travaux antérieurement réalisés et obtenu un grand tableau de chiffres dont on présente ici seulement les résultats principaux [Ramage *et al.*, 2024] : sous les hautes latitudes, les quantités de gaz carbonique émises par les fleuves et rivières, associées aux émissions ponctuelles mais fortes résultant des incendies, sont à peu près compensées par les quantités de CO₂ fixées par la végétation (photosynthèse) et bloquées à plus ou moins long terme dans les sols. Globalement, le bilan est équilibré, au moins actuellement. Les scientifiques continuent donc de s'interroger pour savoir si les terres arctiques sont une *source* de carbone (émissions dominantes) ou un *puits* de carbone (fixation dominante). Mais, si l'on tient compte du rôle des océans, il est clair que la fixation l'emporte actuellement pour le carbone. L'Arctique n'est donc pas responsable aujourd'hui des augmentations de CO₂ dans l'atmosphère. Celles-ci sont liées directement à l'activité humaine.

En revanche, réchauffement et dégel favorisent le développement des tourbières et donc le verdissement des paysages, c'est l'*arctic greening* souligné par les auteurs. Or les tourbières augmentent la production de méthane comme le montrent bien les mesures de concentration dans l'atmosphère sous les hautes latitudes. Cependant, il faut relativiser l'importance de la production de méthane par le milieu naturel dans le nord de la planète. Les bactéries méthanogènes sont presque totalement inactives l'hiver. Alors, seules les zones humides des zones tropicales émettent ce gaz en quantité appréciable. En été au contraire, du méthane est effectivement émis. Mais, c'est faible par rapport à ce qui résulte de l'activité humaine. L'essentiel des émissions vient des champs pétrolifères du Moyen-Orient et des rizières asiatiques !

Revenons à l'Arctique : faibles émissions par rapport à celles observées ailleurs, diversité des situations écologiques, diversité dans le monde bactérien et végétal, interactions de toutes sortes entre les organismes... Il est difficile d'y voir clair et prématuré de considérer la région comme une bombe climatique dont la mèche serait déjà allumée.

4. Conséquences actuelles de la fusion du permafrost

Disons d'abord un mot de la fusion des glaces de mer. Les médias fantasment sur l'ouverture des passages du nord-est et du nord-ouest pour assurer la circulation des bateaux et raccourcir les temps de navigation entre Atlantique et Pacifique.

Rappelons que la première liaison entre Atlantique et Pacifique par le nord-est a été réalisée par le Finlandais Nordenskiöld en 1878 et 1879. Il a fait presque toute la traversée en deux mois mais il a été bloqué par les glaces à 200 km du détroit de Béring. Il lui a fallu alors hiverner avec son équipage et c'est un hiver qui a duré presque dix mois ! Pour passer par là, les spécialistes indiquent qu'il faut des bateaux à coque renforcée, des équipages spécialement formés et acceptant de se passer plus ou moins de secours rapides en cas d'accident. Les primes d'assurance sont en conséquence ! Enfin, les périodes favorables à la circulation des navires sont limitées à quelques semaines par an. Pas de quoi séduire le secteur de la navigation commerciale. Par exemple, le 29 juillet 2025, il n'y avait pratiquement pas de bateaux au nord de la Sibérie comme l'indique le site web spécialisé.

Le passage du Nord-Ouest a été vaincu plus tardivement, de 1903 à 1905 par le Norvégien Amundsen. L'équipage a dû s'arrêter deux fois pour hiverner. Bien qu'à une latitude plus basse que le passage du Nord-Est, la route au-dessus du Canada est encore plus difficile (récifs, climat plus imprévisible). Bref, il n'y a presque pas de navires pour

s'aventurer là, même à l'heure actuelle. Remarquons que Roald Amundsen est l'un des plus grands explorateurs de tous les temps. Vainqueur du passage du Nord-Ouest, il fut aussi le premier au pôle Sud battant l'infortuné Robert Scott. Il fut peut-être également le premier au pôle Nord, atteint en dirigeable avec le constructeur Umberto Nobile. En effet, on a contesté le succès des explorations antérieures par voie terrestre de Robert Peary et de Frederick Cook. À quelques kilomètres près, le pôle n'aurait pas été atteint. En tout cas, Amundsen restera le premier à avoir visité les deux pôles. Cet homme remarquable se porta volontaire pour rechercher Umberto Nobile avec lequel il avait survolé le pôle Nord et qui était reparti pour une seconde expédition en dirigeable. Amundsen disparut dans le crash de son hydravion. Il avait seulement 55 ans. On ne retrouva pas son corps. En revanche, Nobile survécut et fut secouru sur la banquise avec quelques rescapés de son équipage.

L'Arctique a donc peu d'intérêt actuellement pour la navigation commerciale. Il est convoité pour ses ressources minières et aussi sur le plan stratégique car États-Unis et Russie sont face à face de chaque côté du pôle Nord. Le Groenland et l'archipel de Svalbard étant à peu près à mi-chemin entre les deux, il n'est pas étonnant de voir les Américains réclamer le premier et les Chinois tenter de s'installer sur le second.

Revenons à la fusion du permafrost. On peut mesurer l'épaississement, au cours du temps, de la zone active des sols, c'est-à-dire de leur partie non glacée. Elle n'est pas très rapide. En effet, le réchauffement permet à la végétation de se développer et de faire écran au Soleil, l'été. Donc, le phénomène de fusion s'auto-ralentit. Une étude récente appuyée sur 2 966 mesures (nombreux sites suivis sur plusieurs années) estime cet approfondissement à 11 cm par siècle [Liu *et al.*, 2024]. En plus, chacun sait que la chaleur latente de fusion de la glace est de 80 calories par gramme. Autrement dit, le passage de la glace à l'eau consomme beaucoup d'énergie ce qui donne de la résilience au milieu.

Le dégel de surface amène localement une liquéfaction du sol. Alors les arbres peinent à résister aux coups de vents et à tenir leur verticalité. Ils penchent. C'est la forêt ivre, la *drunken forest*. Par ailleurs, les activités humaines ont une part directe dans la dégradation du permafrost. En particulier les bâtiments d'habitation, qui sont chauffés, font fondre la glace dans le sol situé au-dessous. Comme la répartition de la glace est hétérogène au sein des terres (coins de glace, lentilles de glace), il en résulte d'énormes désordres dans les structures. La solution consiste à éloigner du sol les sources de chaleur. On construit maintenant sur pilotis. On peut aussi bâtir sur des caves isolées et non utilisées ou sur d'épais radiers de cailloux [Bommer *et al.*, 2010].

Un oléoduc traverse l'Alaska du nord au sud pour amener le pétrole extrait sur les rives englacées de l'océan arctique jusqu'à la côte du Pacifique où il peut être chargé sur des navires pétroliers. Ce pipeline est construit au-dessus du sol et pas dans le sol que le pétrole liquide pourrait réchauffer. Mais cela ne suffit pas à assurer le maintien du permafrost car le tuyau chauffe au soleil et les poteaux de soutènement conduisent la chaleur. Ces derniers ont donc une allure étrange avec des prolongations à têtes doubles. Ce sont des thermosiphons. Ils contiennent divers types de gaz. Le gaz, liquéfié en surface pendant le froid hivernal, descend dans le tube. Alors, la terre réchauffe très relativement le fluide, le fait retourner à la forme gazeuse et donc remonter en surface [Hoop de Synghem, 2021]. Tout cela maintient le sol à température négative. En effet, s'il fait plus chaud en surface que dans la terre, la circulation du gaz est bloquée. Plus de 120 000 thermosiphons ont été installés sur ce pipeline.

Les routes aussi contribuent à la fusion du permafrost car leurs revêtements absorbent la chaleur. Elles sont parfois déformées de manière très spectaculaire. C'est la même chose pour les rails des chemins de fer.

Les lacs servent moins longtemps à la circulation hivernale. Les chemins sont facilement boueux et impraticables. Bref, le réchauffement nuit à la traficabilité.

Venons-en à l'archéologie. Les sols calcaires de nos pays tempérés conservent bien les os ; les tourbières de l'Europe du Nord, acides et dépourvues d'oxygène, dissolvent les os tout en tannant les peaux (d'où l'aspect aplati et caoutchouteux de certains restes humains). Seul le permafrost conserve à la fois les tissus mous et les os, et accessoirement les cornes, les sabots et l'ivoire. Bref, il préserve tous les tissus sur des durées qui peuvent dépasser 50 000 ans (= 500 siècles !). C'est pourquoi on a trouvé, dans le permafrost, des mammouths en bon état. À vrai dire, on en découvre de plus en plus. On connaît au moins sept individus complets, sans compter des centaines d'ossements de cette espèce. Ces grands animaux se sont aventurés jusqu'en Europe du Sud puisque la faune est descendue en latitude pendant la dernière glaciation. En 1869, Paul-Louis Cazalis de Fondouce, membre de notre Académie, associé à Jules Ollier de Marichard, a découvert un *Elephas meridionalis*, un mammouth en fait, mais on ne le savait pas à l'époque, dans la grotte de Durfort, dans le Gard, à proximité de Sauve. Le squelette était assez bien conservé. Il constitue maintenant une des pièces maîtresses de la Grande Galerie de l'Évolution du Muséum national d'histoire naturelle de Paris. Actuellement, le permafrost livre en continu les cadavres de toutes sortes d'animaux : loups, ours des cavernes, lemmings, rhinocéros, chevaux, lions des cavernes, tigres à dents de sabre... Presque chaque fois, l'état de conservation est bon. On observe leur pelage. Dans leur estomac on découvre ce qu'ils mangeaient. On analyse leur ADN. On cherche ce qui les a tués. Un des animaux les mieux conservés est un bison des steppes trouvé en Alaska. Sa peau est tannée et plus ou moins minéralisée. Il est maintenant exposé dans le Museum of the North de l'Université de Fairbanks. Son état de fraîcheur était tel que ses découvreurs ont prélevé de la viande sur l'animal et l'ont mangée, sans dommage pour eux. Il est vrai qu'ils avaient pris la précaution de la faire longuement bouillir en ragoût.

Conclusions

Par sa surface non anthropisée, par ses réserves biologiques et de carbone, par l'étendue de ses lacs et tourbières, l'Arctique joue un rôle écologique considérable. La terre que l'on trouve là renferme d'extraordinaires archives biologiques, mais force est de constater qu'elles sont en train de se détruire.

Concernant les paysages arctiques, malgré les travaux de nombreux scientifiques, il reste difficile de savoir ce qui est ancien et ce qui correspond à une transformation récente. En effet, le réchauffement s'est amorcé à la fin du dernier maximum glaciaire il y a 20 000 ans. Simplement, on constate que la dégradation du permafrost, non seulement se poursuit, mais aussi s'accélère.

Arrive le questionnement principal : est-ce grave tout cela ? Référons-nous au récent rapport GIEC, page 49 [IPCC, 2023]. Les écosystèmes naturels vont subir des modifications pas toujours prévisibles. Les productions animales et le secteur de la pêche risquent d'être affectés négativement. Mais les lois de l'agronomie nous apprennent que la végétation naturelle ou agricole sera favorisée dans les milieux plus humides, plus chauds, plus riches en CO₂, ceci en relation avec une photosynthèse accrue. On peut donc espérer de meilleures récoltes dans de nombreux endroits du monde [Legros *et al.*, 1994]. Par ailleurs, on nous prédit le pire concernant la vie dans les agglomérations. La « santé mentale » déclinera. La démonstration nous échappe. À toutes fins utiles, on propose au lecteur de se munir rapidement d'antidépresseurs adéquats.

Élargissons notre sujet. On observe des structures polygonales sur Mars [Hauber *et al.*, 2011]. Et on y découvre aussi des collines qualifiées de « possible pingo ». Or sur

Terre, pour obtenir ces types de forme, il faut de la glace et donc de l'eau... Au-delà du cas précis, cela démontre une chose : dans les sciences de la terre, même si cela n'a pas d'intérêt économique immédiat, il est toujours utile d'étudier les cas extrêmes (les sols englacés, les déserts chauds, les volcans en activité...) car cela permet de comprendre ce qui se passe ailleurs dans la galaxie [Legros, 2019]. Rappelons que, dans le système solaire, la Terre est la seule planète ni trop chaude ni trop froide pour accueillir aisément la vie.

Quoi qu'il en soit, les régions arctiques participent à la beauté de notre planète. Les étudier suscite l'admiration et donne un peu le vertige car cela fait entrer dans l'observation du cosmos et dans l'immensité des temps géologiques.

BIBLIOGRAPHIE SOMMAIRE

(ELLE EST COMPLÉTÉE PAR LES RÉFÉRENCES FOURNIES SUR LES CLICHÉS DE LA VERSION FILMÉE DE CETTE CONFÉRENCE)

BOMMER C., PHILLIPS M., KEUSEN H.R., TEYSSEIRE P., 2010 *Construire sur le pergélisol*, Guide pratique. Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage WSL, 126 p.

FRASER R.H., ID, KOKELJ S.V., LANTZ T.C., McFARLANE-WINCHESTER M., OLTHOF I., LACELLE D., 2018. « Climate Sensitivity of High Arctic Permafrost Terrain Demonstrated by Widespread Ice-Wedge Thermokarst on Banks Island ». *Remote Sensing*, 2018, 10, 954.

GAGNON S., ROY-LÉVEILLÉE P., TURNER K., 2024. *Contemporary formation of ice-wedge pseudomorphs during the expansion of a thermokarst lake in Old Crow Flats*, Yukon, Canada, *Geomorphology*, volume 457.

HAUBER E. et 13 autres auteurs, 2011. *Landscape evolution in Martian mid-latitude regions : insights from analogous periglacial landforms in Svalbard*. In : *Martian Geomorphology*, Geological Society, London, Special Publications, 356 p., 111–131.

HOOP de SYNGHEM, Y., 2021. *Dégel du permafrost en Alaska et en Sibérie : Causes, impacts et infrastructures*. Mémoire de fin d'études (Master en Sciences et Gestion de l'Environnement), Université Libre de Bruxelles, 134 p.

IPCC, 2021. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [MASSON-DELMOTTE et nombreux autres auteurs]. Cambridge University Press, NY, USA, 2391 p.

IPCC, 2023. *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 184 p.

KLAPSTEIN, S. J., TURETSKY M. R., McGUIRE A. D., HARDEN J. W., CZIMCZIK C. I., XU X., CHANTON J. P., WADDINGTON J. M., 2014. *Controls on methane*

- released through ebullition in peatlands affected by permafrost degradation*. J. Geophys. Res. Biogeosci., 418-431.
- LEGROS J.P, BALDY C., FROMIN N., BELLIVIER D. 1994. « Crop models: principle and adaptation to the problem of climate change ». In : *Soil Responses to Climate Change*: 72-98. NATO ASI Series: Global Environmental Change n° 23. Springer-Verlag.
- LEGROS J.P., 2019. « Les glaciations : découvertes, étude, traces dans le paysage ». *Bulletin de l'Académie des Sciences et Lettres de Montpellier* (séance publique du 2/12/201) n° 50 : 255-268.
- LILJEDAHL A.K. et 18 autres auteurs, 2016. « Pan-Arctic ice-wedge degradation in warming permafrost and its influence on tundra hydrology ». *Nature geosciences*, DOI: 10.1038/NGEO2674
- LIU Z, KIMBALL J.S., BALLANTYNE A., WATTS J.D., NATALI S.M., ROGERS B.M., YI Y., KLENE A.E., MOGHADDAM M., DU J., ZONA D., 2024. *Widespread deepening of the active layer in northern permafrost regions from 2003 to 2020*. Environ. Res. Lett. 19, 15 p.
- NITZBON J., LANGER M., WESTERMANN S., MARTIN L., AAS K.S., BOIKE J., 2019. *Pathways of ice-wedge degradation in polygonal tundra under different hydrological conditions*. In : *The Cryosphere* vol. 13, issue 4: 1089-1123.
- RAMAGE J., KUHN M., VIRKKALA A-M., VOIGT, C., MARUSHCHAK M.E., BASTOS A., et al., 2024. « The net GHG balance and budget of the permafrost region (2000–2020) from ecosystem flux upscaling ». *Global Biogeochemical Cycles*, vol. 38, 18 p.
- SCHONGABNER T., 2016. *Climate impact on geophysical thermokarst processes during the past 6000 years*. Thèse, Université de Hamburg, 133 p.
- SHUR Y., JONES B.M., JORGENSON T., KANEVSKIY M.Z., LILJEDAHL A., WALKER D.A., WARD Jones M.K., FORTIER D., VASILIEV A., 2025. *Formation of Low-Centered Ice-Wedge Polygons and their Orthogonal Systems: A Review* University of Alaska Fairbanks (preprint).
- THOMAS P., 2015. « Les plages soulevées de Scandinavie et du Canada, conséquences du rebond post-glaciaire ». Planet Terre : <https://planet-terre.ens-lyon.fr/ressource/Img495-2015-05-11.xml>
- THOMAN, R. & WALSH. J. E., 2019. *Alaska's changing environment: documenting Alaska's physical and biological changes through observations*. H. R. McFarland, Ed. International Arctic Research Center, University of Alaska Fairbanks.
- VANSELOW-ALGAN M., SCHMIDT S. R., GREVEN M., FIENCKE C., KUTZBACH I L., PFEIFFER E.-M., 2015. « High methane emissions dominate annual greenhouse gas balances 30 years after bog rewetting ». *Biogeosciences Discuss.*, 12: 2809-2842.