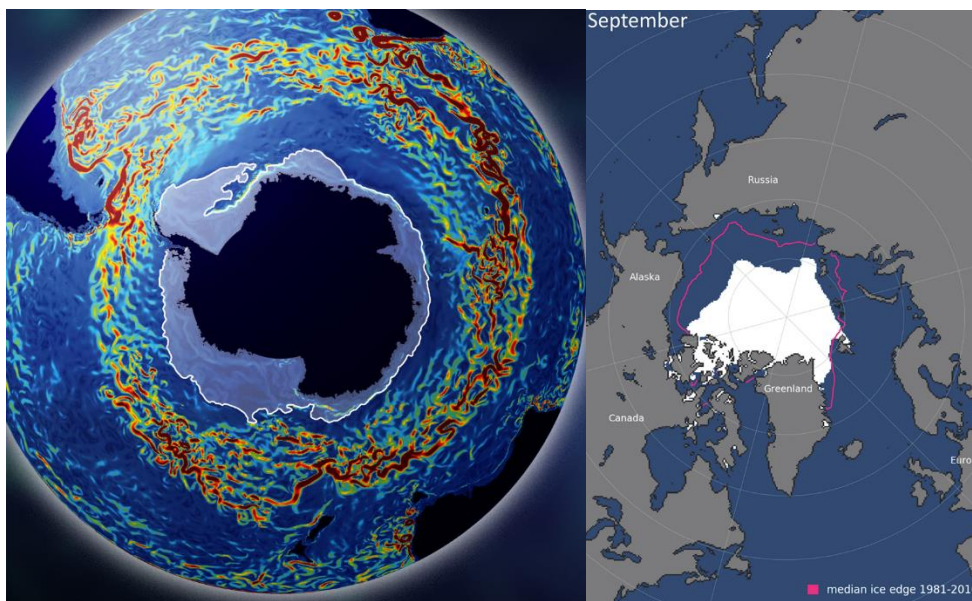




Axe transverse polaire



Changement climatique, risques et géodynamique des océans polaires

1er avril 2021

Introduction

A l'échelle décennale et séculaire, le changement climatique en cours impacte la planète Terre au niveau global et plus particulièrement les échanges océan-atmosphère, la circulation océanique et plus généralement le fonctionnement des écosystèmes marins polaires et subpolaires, y compris au niveau littoral. A plus grande échelle, les régions polaires et subpolaires présentent un intérêt majeur pour le développement de nouveaux paradigmes en géodynamique.

La grande majorité des unités de recherches de l'Institut Universitaire Européen de la Mer est impliquée dans des programmes de recherches polaires et subpolaires, en coopération avec leurs partenaires au niveau national (Ifremer, MNHN, IPEV,...) et au niveau international. Cet effort s'inscrit dans la déjà longue tradition des recherches polaires de l'Université de l'Université de Bretagne Occidentale, lancée dès les années 1970 par des recherches en géomorphologie au Spitzberg et en océanographie chimique dans le secteur Indien de l'océan Austral.

La création d'un Axe transverse polaire par l'Institut Universitaire Européen de la Mer répond à une double exigence :

- 1-favoriser les synergies interdisciplinaires entre les différentes unités de recherche de l'institut et de ses partenaires,
- 2-favoriser l'implication des chercheurs de l'IUEM et de ses partenaires dans les grands programmes nationaux et internationaux.

Programme

-09 :00-09 :05 : Ouverture et points pratiques par Paul Tréguer et Dominique Simon

-09 :05- 09 :20: l'axe transverse polaire : introduction par Fred Jean

-09 :20-10 :05 : Impacts du changement climatique et interactions atmosphère-océan (coordination : Sally Close, Camille Lique)

-09 :20-09 :35 : Camille Lique : Recherches polaires au LOPS (15 min)

-09 :35-09 :45 : Angelina Cassianides : Interaction entre la glace de mer et les tourbillons océaniques de mésoéchelle en Arctique (10 min)

-09 :45-09 :55 : Alexandre Supply : Observations satellites des conditions de surface (10 min)

-09 :55-10 :05 Fanny Ardhuin : Observations satellites des glaces de mer et icebergs (10 min)

-10 :05-11 :05: Pompe biologique et perturbations des océans polaires (coordination : Brivaela Moriceau, Laurent Chauvaud)

-10 :05-10 :20 : Les océans côtiers polaires : des écosystèmes peu connus, en mutation rapide, et aux pollutions émergentes (Laurent Chauvaud, Fred Olivier)

-10 :20-10 :35 : Les éléments métalliques et leurs isotopes (Hélène Planquette, E. Bucciarelli, G. Sarthou, F. Desprez de Gésincourt, D. Gonzalez Santana, W.-H. Liao, C. Baudet, M. Gallinari, N. van Horsten)

-10 :35 : 10 :50 : Les organismes silicifiés dans les océans polaires (Brivaëla Moriceau, Aude Leynaert, Johann Lavaud)

-10 :50 :11 :20 : break

-11 : 20-12 :20 : Conférence de presse de Fred Jean et des coordinateurs de thèmes

-11 :20-11 :30 : Fred Jean : présentation générale de l'Axe transverse Polaire IUEM

-11 :30-11 :35 : Quels sont les impacts du changement climatique sur les interactions océan-atmosphère et sur la circulation océanique ? (Camille Lique)

-11 :35-11 :40 : Quelles sont les perturbations des écosystèmes polaires dues aux activités humaines ? (Brivaela Moriceau)

-11 :45-11 :50 : A plus grande échelle de temps quel est l'apport des régions polaires pour établir de nouveaux concepts en sciences de la Terre ? (Laurent Geoffroy)

-11 :50-11 :55 : Quels sont les impacts économiques et juridiques du changement en cours ? (Anne Choquet)

-11 :55-12 :00 : Comment le changement climatique affecte la géomorphologie littorale ? (Serge Suanez)

-12 :00-12 :20 : temps d'échange avec les journalistes.

-14 :00-14 :15: Pompe biologique et perturbations des océans polaires (coordination : Brivaela Moriceau, Laurent Chauvaud) (suite)

-14 :00-14 :15 : La pompe biologique de carbone dans les océans polaires (Frédéric Planchon, Frédéric Le Moigne, Laurent Memery)

-14 :15-14 :45 : Nouveaux paradigmes en géodynamique : l'apport des régions polaires et subpolaires : (coordination : Laurent Geoffroy, Jean-Yves Royer)

-14 :15-14 :30 : Arctique et nouveaux paradigmes en Terre solide (L. Geoffroy)

-14 :30-14 :45 : Apport de l'hydroacoustique à l'observation des latitudes australes (Jean-Yves Royer)

-14 :45-15 :30 : Changement climatique et risques (coordination : Anne Choquet, Annie Cudennec)

14 :45-15 :00 : Antarctique et Arctique : deux régions que tout oppose ? (Anne Choquet)

15 :00-15 :15 : Vivre des pôles (Annie Cudennec)

15 :15-15 :30 : Présentation synthétique des travaux d'AMURE : Accompagner le changement (Emmanuelle Quillérou)

15 :30-16 :15: Changement climatique et géomorphologie littorale (coordination : Serge Suanez, Pierre Stéphan)

-15 :30-15 :45 : Synthèse par Armelle Decaulne et Serge Suanez

-15 :45-16 :00 : Etude de cas par Pierre Stéphan

-16 :00-16 :15 : Etude de cas par Agnès Baltzer

16 :15-17 :50: Table-ronde : structuration de l'axe transverse (Coordination de la table ronde : Paul Tréguer et les coordinateurs des 5 thèmes).

09 :20-10 :05 : Impacts du changement climatique et interactions atmosphère-océan (coordination : Sally Close, Camille Lique)

Les régions polaires, et en particulier le bassin Arctique, sont les régions du globe où la signature du changement climatique est la plus visible et la plus importante. La diminution drastique de l'extension de glace de mer est un des rares indicateurs robustes de l'origine anthropique du changement climatique (i.e. une série temporelle dont la variabilité et la tendance ne peuvent être dues à la variabilité naturelle du climat). Pourtant les causes et conséquences de cette diminution sont encore aujourd'hui à découvrir, et les rôles de l'atmosphère et de l'océan pour ces changements restent encore aujourd'hui très incertains. On s'attend à ce que la disparition de la banquise puisse avoir des implications pour le climat et la météo bien au-delà de l'Arctique, et en particulier à nos latitudes et pour l'Europe de l'Ouest, via des téléconnexions atmosphériques. Enfin, la disparition de la banquise induit d'ores et déjà des changements majeurs pour l'océan, avec des conséquences attendues pour la température de surface, les états de mer, la circulation et les conditions physiques et biogéochimiques, localement et à l'échelle globale via les échanges avec les autres bassins océaniques. En particulier, les changements en Arctique auront un effet important sur l'intensité et la structure de l'AMOC. Au-delà de l'intérêt scientifique, l'Arctique est aussi le lieu d'enjeux sociaux-économiques majeurs, avec par exemple la possibilité de forages ou de nouvelles voies de navigations au fur et à mesure que la banquise diminue.

Observer et modéliser ces changements pour pouvoir les quantifier, les comprendre pour être capable de les prévoir, sont des enjeux majeurs pour la communauté scientifique et la société civile en générale.

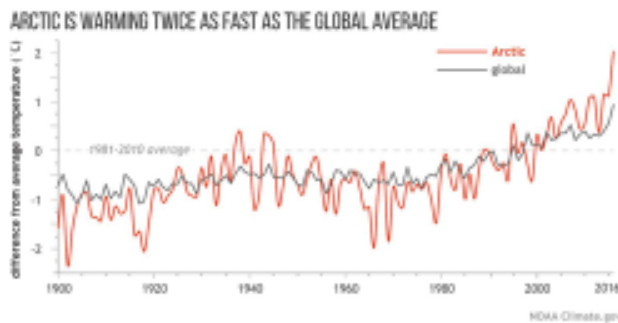
Au sein des différentes équipes du LOPS, un certain nombre de chercheurs abordent des questions scientifiques en lien avec les hautes latitudes, et en particulier avec la région Arctique. Les observations satellites permettent par exemple une connaissance détaillée de paramètres important pour la banquise, les icebergs ou les états de mer dans les bassins polaires. Un dynamisme existe autour de l'étude des états de mer dans les régions polaires depuis plusieurs années, afin de mieux comprendre les interactions entre les vagues et la glace de mer, avec des projets basés sur les observations satellites et de la modélisation, et notamment le projet ERC WAAXT porté par Peter Sutherland qui permet l'acquisition d'observation in-situ originales.

Plusieurs projets de modélisation de l'océan et la banquise de la région Arctique sont également en cours, afin de mieux comprendre les processus physiques importants pour la dynamique océanique de la région et les interactions entre la banquise et l'océan, à toutes les échelles de temps et d'espace. Le rôle des processus de petite échelle (comme les tourbillons océaniques) pour l'évolution de la banquise est étudié en détails, à partir de simulations numériques réalisées à des résolutions rarement atteintes. Des travaux sur l'impact des changements en Arctique pour la dynamique océanique en Atlantique Nord, l'AMOC et le climat sur des échelles de temps longues (de la décennie au siècle) sont également menés, à partir de l'analyse des modèles de climat de type CMIP.

Impacts du changement climatique et interactions atmosphère-océan

La première présentation (Camille Lique) se proposera de faire une synthèse des travaux en cours sur la compréhension des conditions physiques dans les régions polaires et leur changement en cours. Elle sera suivie par 3 exemples d'études en cours. Angéline Cassianides présentera ses travaux de thèse sur la compréhension des interactions entre les tourbillons méso-échelle et les conditions de glace. Alexandre Supply (postdoctorant CNES) présentera ses travaux sur l'observation satellite des conditions océaniques de surface en Arctique, et notamment le défi de pouvoir observer la salinité de surface. Fanny Arduin présentera les travaux fait autour de la télédétection des conditions de glace dans les zones polaires

- Les régions polaires (et l'Arctique en particulier) sont les régions *les plus sensibles* au changement climatique en cours

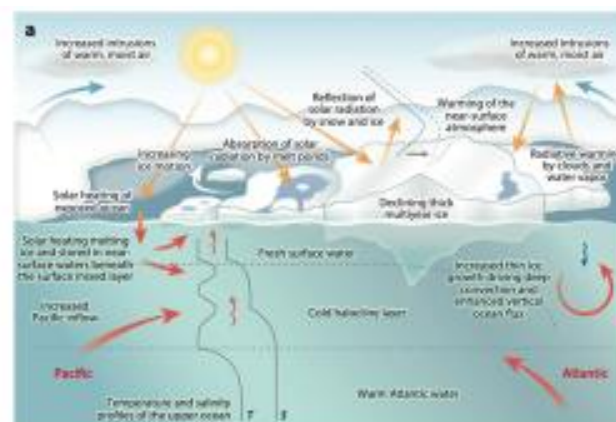
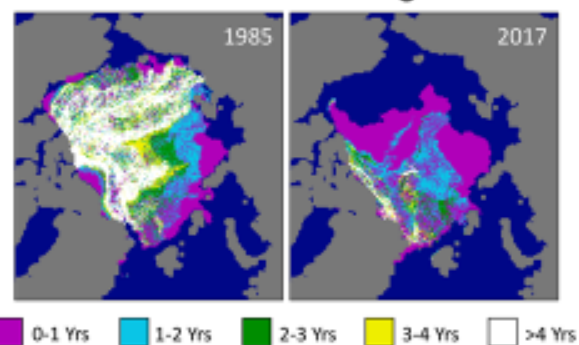


Les températures de l'air augmentent plus deux fois plus rapidement en Arctique qu'en moyenne globale

La glace de mer se transforme:

- *Extension en été divisée par 2 depuis 1980 en Arctique*
- *Épaisseur plus fine, glace plus jeune, plus fragile, qui se déplace plus rapidement ...*
- *Zones marginales de glace de plus en plus importantes*

Arctic Sea Ice Age



- L'océan est à la fois victime et coupable du déclin de la couverture de glace

AU LOPS

- *Suivi et quantification des changements de glace et océan à partir de données satellites et in-situ*
- *Observation, modélisation et compréhension des processus émergents à petite échelle: interactions glace de mer-vagues, interactions glace de mer-tourbillons...*
- *Déterminations des impacts de la diminution de la glace de mer à l'échelle globale (analyse de modèles CMIP)*

10 :05-11 :05: Perturbations anthropiques des océans polaires (Brivaela Moriceau, Laurent Chauvaud)

Les milieux océaniques polaires offrent un défi majeur à la communauté scientifique. En effet, le réchauffement climatique en cours affecte plus rapidement les régions polaires que le reste de la planète. Il convient de proposer des scénarios des bouleversements attendus dans des systèmes complexes et encore mal décrits en 2020. Dans ce contexte, nos recherches s'intéressent simultanément à la dynamique des propriétés physiques des océans polaires et à celle de leurs cycles biogéochimiques. Elles considèrent également la biodiversité des organismes marins qui y vivent et leur capacité à s'adapter aux changements, ainsi que leur rôle dans les grands cycles biogéochimiques. Par des approches transdisciplinaires nous prenons en considération tout à la fois les cycles et les écosystèmes de l'océan moderne, mais aussi de l'océan passé grâce aux archives environnementales.

10 :05-10 :20 : Les océans côtiers polaires : des écosystèmes peu connus, en mutation rapide, et aux pollutions émergentes (Laurent Chauvaud, Fred Olivier)

Les années 2010 à 2015 ont été les cinq années les plus chaudes jamais enregistrées dans l'Arctique depuis 1900 et 2020 a été le record du minimum de banquise. Il en découle une cascade de rétroactions qui amplifient le réchauffement de l'Arctique. L'océan Arctique et partiellement l'océan Antarctique, connaissent des modifications radicales de leurs propriétés hydrographiques (teneur en eau douce, sel) et de leur courantologie affectant la nature même de la production primaire ainsi que la turbidité de l'eau ou le couplage pélagos benthos. L'ensemble de ces changements ont de vastes conséquences sur la dynamique écologique marine polaire où endémisme et biodiversité sont forts voire exceptionnels, influençant la productivité et les interactions entre les espèces (trophique, pathogènes nouveaux,...).

Dans ce contexte, nos recherches adoptent une approche transdisciplinaire visant à mieux comprendre le fonctionnement de ces écosystèmes côtiers et leur évolution face aux pressions anthropiques toujours croissantes. Il s'agit d'anticiper les impacts générés par l'espèce humaine notamment du fait de la modification des usages (navigation, pêche ou exploitation minière) qui entraîne des perturbations additionnelles, depuis la pollution chimique incluant les microplastiques et la pollution sonore, jusqu'à la migration de nouvelles espèces et l'arrivée d'espèces invasives.

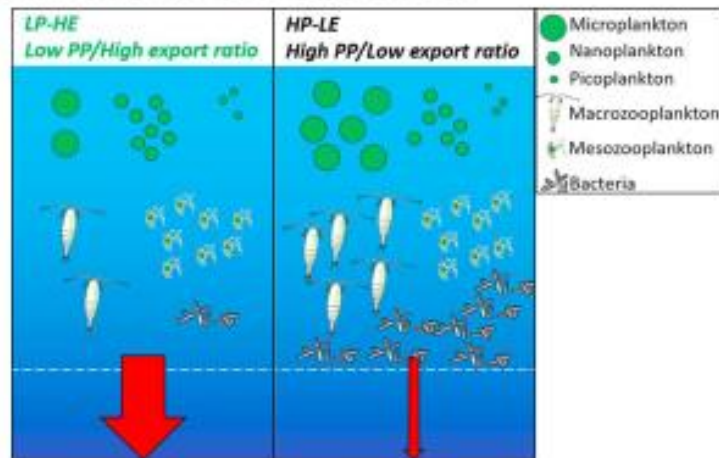
Underwater soundscape in Kongsfjorden with the context of increasing tourism boats; Arctic noise pollution



10 :20-10 :35 : La pompe biologique de carbone dans les océans polaires (Frédéric Planchon, Frédéric Le Moigne, Laurent Memery)

Les océans polaires et subpolaires sont des régions d'importance, à la fois climatique au travers des échanges de CO₂ naturel et anthropique, mais aussi biogéochimique via la redistribution des macro- et micro-nutriments vers les régions de basse latitude. Ce rôle essentiel est en partie assuré par la pompe biologique qui transfère la matière organique en profondeur, incluant le carbone et les nutriments associés. En zone polaire, l'intensité et l'efficacité de la pompe biologique sont en premier lieu déterminées par la nature et la productivité des communautés phytoplanctoniques, en général dominées par des blooms de diatomées. Cependant, ce rôle n'est pas unique et des études récentes montrent que la pompe biologique est régie par un ensemble complexe de processus de transfert, à la fois biologique, physique et chimique, qui varient considérablement dans le temps et l'espace. En particulier, le rôle des interactions trophiques entre les différents acteurs des écosystèmes pélagiques, depuis les communautés bactériennes, zooplanctoniques, jusqu'aux poissons s'avère important à prendre en compte mais reste encore très mal contraint. Comprendre les différents modes de fonctionnement de la pompe biologique constitue un réel défi, à la fois scientifique mais aussi logistique, qu'il est nécessaire de relever afin d'anticiper les conséquences du changement climatique dans ces zones de transition.

Pompe biologique: L'océan Austral fait de la résistance



Normalement la quantité de C isolé de l'atmosphère par la chute du phytoplancton est liée à l'abondance de ces micro-algues en surface.

Nos travaux récents montrent que dans ces régions reculées, la pompe biologique de carbone ne fait pas intervenir seulement le phytoplancton mais véritablement tout les organismes présent dans l'océan, des plus petites bactéries jusqu'au poissons.

10 :35-10 :50 : Les éléments métalliques et leurs isotopes (Hélène Planquette, E. Bucciarelli, G. Sarthou, F. Desprez de Gésincourt, D. Gonzalez Santana, W.-H. Liao, C. Baudet, M. Gallinari, N. van Horsten)

Les métaux traces tels que le fer sont très peu abondants dans l'océan du large, pourtant ils ont une importance capitale dans la régulation de l'écosystème marin et dans le fonctionnement de la pompe biologique de carbone. Ils participent ainsi à la régulation des concentrations de CO₂ atmosphérique. Or les sources et la distribution des métaux-traces dans l'océan du large sont susceptibles de varier avec le changement global (désertification, circulation océanique et atmosphérique...). Grâce en particulier à des campagnes pluridisciplinaires internationales nous cherchons à mieux caractériser la distribution de ces éléments essentiels à la vie le long de courants et fronts océanographiques clés, notamment dans l'océan Austral, et étudier leur lien avec la variabilité de la production primaire, à des saisons différentes.

Pendant la campagne SWINGS, nous avons notamment mis en évidence la présence d'une source hydrothermale le long de la dorsale SWIR, qui devra désormais être considérée dans le budget des différentes sources de fer. Nous avons également montré la fertilisation à différentes échelles des îles Marion/Prince Edward, Crozet, Kerguelen et Heard/Mc Donald. Cette campagne va nous permettre de mieux comprendre comment le carbone est séquestré dans l'Océan Indien Sud, comment varie l'activité biologique entre tropiques et grand sud,

comment sont transportés eaux et éléments chimiques au travers de cette zone de transit entre Atlantique et Pacifique.

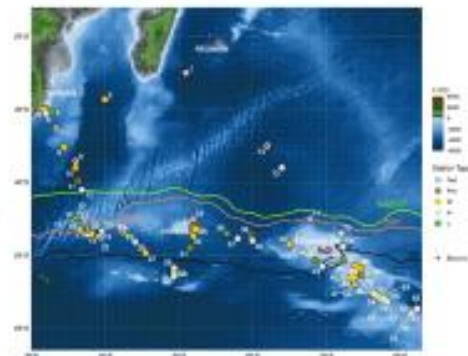
En tenant compte de données déjà acquises pendant d'autres campagnes, en période hivernale, nous pourrions quantifier le stock des éléments nutritifs, ce qui jusqu'à présent, n'avait jamais été fait.

Les métaux traces

- Micronutriments essentiels à la vie
- Limitent la production primaire océanique dans l'Océan Austral
- **Contrôlent en partie la séquestration du carbone**

➤ Campagnes de terrain d'envergure

- **Forte résolution spatiale: SWINGS** (N/O Marion Dufresne, 11/01-08/03/2021, pilotage LEMAR-LEGOS): 16000 km parcourus, échantillonnage intensif pour caractériser courants et masses d'eaux et explorer les différentes des métaux traces dont les sources hydrothermales. 73 stations. 18 laboratoires impliqués, mobilisation de 140 personnels. Financements FOF, ANR, IsBlue, LEFE-CYBER
- **A différentes saisons: IO6, SCALE, SISO** (I/B Aghulhas, hiver 2017, hiver et printemps 2019, printemps et automne 2022). Financements: PHC PROTEA France/Afrique du Sud, PHC Alliance France/Royaume Uni, Isblue: projet SeaTraM, projets sud-africains SANAP SCALE et SISO, CS IUEM



distributions à différentes saisons des métaux traces, et mise en évidence des processus qui les contrôlent dans cette région du globe très mal caractérisée

10 :50 : 11 :05 : Les organismes silicifiés dans les océans polaires (Brivaëla Moriceau, Aude Leynaert, Johann Lavaud)

Le silicium est le 2^{ème} élément le plus abondant de la croûte terrestre. Il est présent dans l'océan sous forme dissoute et est utilisé pour former le squelette ou les spicules de silice biogénique d'une grande variété d'organismes pélagiques et benthiques, tels que les diatomées (micro algues), mais aussi les radiolaires (protistes hétérotrophes), et les éponges siliceuses (métazoaires). Tous ces organismes contiennent aussi du carbone et participent activement à la pompe biologique de CO₂. Leur développement est fortement dépendant de la disponibilité du silicium dissous dans l'eau, qu'ils doivent se partager, et donc de la dynamique du cycle du silicium dans l'océan.

A eux seuls, les océans polaires représentent environ le quart de la production mondiale de silice biogénique. En Arctique comme en Antarctique, les diatomées dominent les communautés de micro algues, dans la colonne d'eau et dans la glace de mer, fournissant en

énergie le reste du réseau trophique. Dans le contexte actuel, avec la fonte des glaces, la modification des habitats et de l'environnement physico-chimique entraînent, des modifications drastiques de tout le réseau trophique des régions polaires : les diatomées des glaces disparaissent, les populations d'éponges siliceuses explosent, la diversité des radiolaires chute... avec d'importantes conséquences potentielles sur la disponibilité des éléments nutritifs en régions polaires et dans l'océan global, et par conséquent la productivité des océans.

Pour évaluer ces changements, il est indispensable de mieux comprendre l'écophysiologie des diatomées, mais aussi des radiolaires et des éponges, leur implication dans la pompe à carbone (production primaire et export), et leur rôle dans la dynamique du cycle du silicium des océans polaires, face à l'impact du changement climatique.

Les silicifiés aux pôles

Les diatomées sont des algues microscopiques qui utilisent le silicium sous sa forme dissoute pour former leur squelette siliceux



Aux pôles, ces micro-algues produisent $\frac{1}{4}$ de la silice biogénique de l'océan global



Les diatomées poussent **dans la glace, sous la glace et dans l'eau** dans des conditions extrêmes de lumière et de température.

Les algues de glace produisent jusqu'à 10% de la silice biogénique de l'Arctique.

Elles fournissent l'énergie nécessaire au reste des organismes à la sortie de la longue nuit polaire.



Si la banquise diminue trop rapidement les diatomées des glaces ne pourront se développer que se passera t'il pour l'écosystème Arctique?

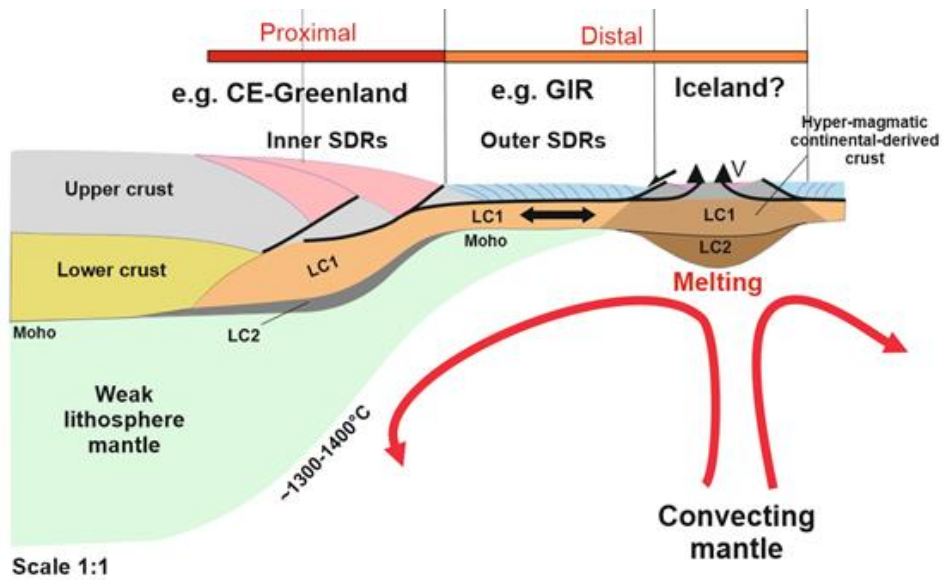
14 :00-14 :30 : Nouveaux paradigmes en géodynamique : l'apport des régions polaires et subpolaires : (coordination : Laurent Geoffroy, Jean-Yves Royer)

14 :00-14 :15 : Arctique et nouveaux paradigmes en Terre solide (L. Geoffroy)

L'Arctique et le péri-arctique sont des champs d'exploration majeurs en géosciences fondamentales. La spécificité de l'Arctique terrestre (hors taïga) est la qualité générale des affleurements (absence de couvert végétal dense, très faible altération) qui permet de faire des observations 3D (directes et satellitaires) et des analyses 4D (par prélèvements et datations absolues et relatives) de très grande qualité. A moins de 4000km de la France, certaines des problématiques majeures de la géodynamique et de la tectonique globale peuvent être étudiées dans des conditions inégalées à l'échelle terrestre: transition d'une Terre primitive à dynamique complexe à la Tectonique des Plaques au Protérozoïque, mécanismes généraux de la rupture continentale avec ou sans fusion mantellique, héritage structural, thermique et compositionnel dans la tectonique des plaques au sein du cycle de Wilson...L'Islande au sein de l'Atlantique NE est également un laboratoire majeur et unique au monde pour la compréhension des interconnexions entre processus glaciaires, magmatiques et tectoniques, en d'autres termes des couplages entre processus profonds de l'intérieur de la Terre (convection mantellique), la lithosphère et les enveloppes externes (hydrosphère/cryosphère et atmosphère).

L'exemple de recherche du LGO dans le domaine Terre Solide en Arctique illustré dans le cadre de la journée polaire est l'étude de la limite océan-continent (COB) dans les océans (Figure). Cette problématique a des implications scientifiques, économiques et géopolitiques forte. Les observations directes de marges passives volcaniques au Groenland ont servi de base à des modèles conceptuels et numériques thermo-mécaniques de la rupture continentale. Ces recherches (20 missions au Groenland avec financements IPEV, industriel, INSU, GDR Marges...) conduisent à une nouvelle définition des limites océan-continent, réduisant significativement la proportion de lithosphère océanique dans l'Atlantique NE et par extension dans 50% des espaces océaniques mondiaux.

D'autres aspects de la recherche en Arctique menée par le LGO seront illustrés dans la conclusion du thème et notamment le projet de faire de l'Islande un laboratoire « onshore » des processus actifs au niveau des dorsales océaniques, dont le couplage entre l'hydrothermalisme et le fonctionnement des failles actives.



www.nature.com/scientificreports/

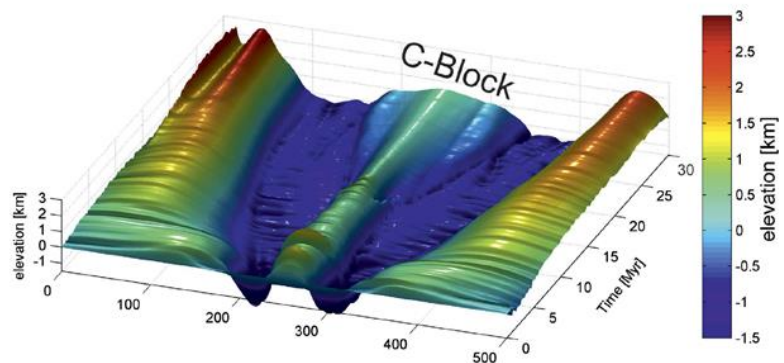


Figure. Haut. Expédition centre-Est Groenland, 2015 (voilier polaire Vagabond). Centre : modèle conceptuel de rupture continentale magmatique avec individualisation d'un « C-Block ». Bas : modélisation thermomécanique de la rupture magmatique (topographie du système d'ouverture sur 30Ma).

14 :15-14 :30 : Apport de l'hydroacoustique à l'observation des latitudes australes (Jean-Yves Royer, LGO)

Résumé succinct

L'éloignement de l'océan austral et les conditions météorologiques extrêmes qui règnent à ces latitudes rendent cette région du globe très difficile à observer in situ. L'acoustique passive continue, à partir de réseaux d'hydrophones autonomes placés dans la colonne d'eau, permet de pallier cette limitation majeure et d'étudier sur le long-terme de nombreux phénomènes d'origine géologique, biologique, cryogénique, et anthropique.

Résumé étendu

L'éloignement de l'océan austral et les conditions météorologiques extrêmes qui règnent à ces latitudes rendent cette région du globe très difficile à observer in situ. L'acoustique passive continue, à partir de réseaux d'hydrophones autonomes placés dans la colonne d'eau, permet de pallier cette limitation majeure et d'étudier sur le long-terme de nombreux phénomènes de nature différente :

- géologiques par l'enregistrement des ondes acoustiques générées par les séismes et éruptions volcaniques sous-marines le long des frontières de plaque actives, notamment les dorsales océaniques (Fig. 1) ;
- cryogéniques par l'enregistrement des nombreux craquements et collisions d'icebergs (Fig. 1) ;
- biologiques par l'enregistrement des cris de baleines qui permettent d'identifier les espèces présentes, leur saisonnalité, et à partir d'un réseau étendu, leurs migrations (Fig.2) ;
- anthropiques par l'enregistrement du trafic maritime ou des campagnes d'exploration sismique.

Tous ces bruits océaniques ont en commun de partager la même gamme de basses fréquences (0-120 Hz) et de nécessiter des enregistrements long-terme pour juger de leur importance relative, de leur cyclicité, de leur saisonnalité, de leur accroissement ou de leur diminution au fil des ans, et pour en tirer des informations inédites sur leur origine.

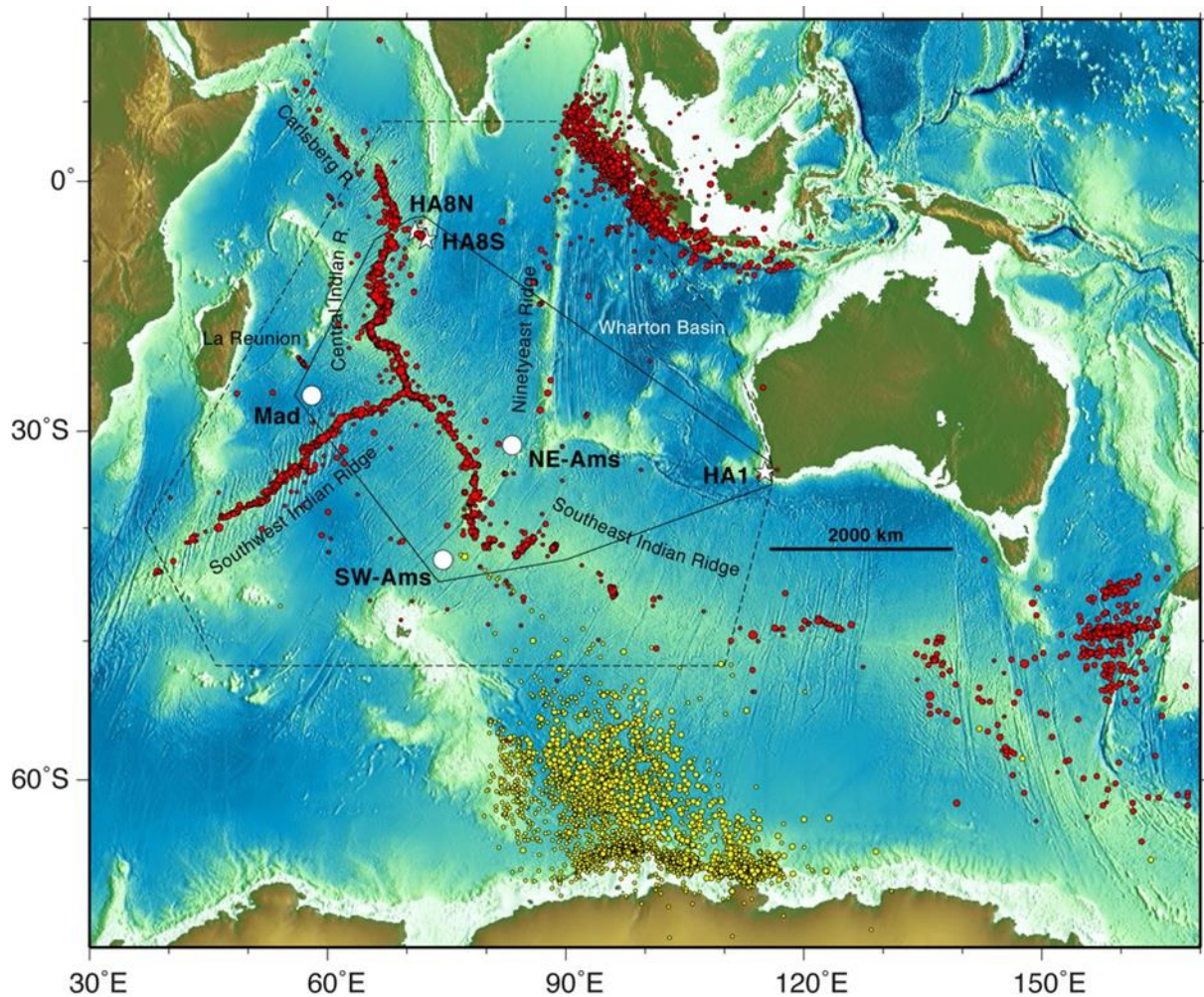


Figure 1 : Sismicité (points rouges) et événements d'origine cryogénique (points jaunes), détectés dans l'océan Indien par un réseau de 5 hydrophones (étoiles et cercles blancs) en 2007. D'après Royer et al., Geophys. J. Int. 2015.

En annexe : COMPARAISON DE MÉTHODES GÉO-ELECTRIQUES POUR L'AUSCULTATION DU PERGÉLISOL

BAZIN S.1, SYED S.G.2, GILBERT G.3, ETZEMÜLLER B.4

1 maintenant à l'Institut Européen de la Mer, UBO, Brest, France, Sara.Bazin@univ-brest.fr

2 Université d'Oslo (UiO), Oslo, Norvège, syedsg@student.geo.uio.no

3 Institut Norvégien de Géotechnique (NGI), Oslo, Norvège, Graham.Gilbert@ngi.no

4 Université d'Oslo (UiO), Oslo, Norvège, bernd.etzelmuller@geo.uio.no

14 :30-15 :15 : Changement climatique et risques dans les régions polaires (coordination : Anne Choquet, Annie Cudennec, Emmanuelle Quillérou)

Deux espaces sensibles aux changements.

L'Arctique et l'Antarctique sont deux espaces particulièrement sensibles aux changements par nature, et le changement climatique ne fait pas exception. La fonte des glaces et l'ouverture de l'accès aux pôles et leurs ressources sont les sources de convoitises certaines. Différents acteurs, aussi bien que privés et publics, se positionnent pour développer leur utilisation de ces espaces reconnus comme fragiles et relativement isolés.

Isolés mais pas vides !

Les pôles et océans qui les entourent accueillent des activités humaines : communes aux deux régions (pêche, recherche scientifique, transport maritime, ...) ou propres à l'Arctique (activités militaires et extraction minière).

Lorsqu'elles sont autorisées, ces activités sont pratiquées par des populations indigènes autochtones (inuits, samis...) comme par des populations arrivées pour y travailler (compagnies minières, scientifiques, enseignants, soignants...) ou qui ne font qu'y passer (transport maritime, pêche...).

Le changement climatique peut induire des risques pour les populations qui vivent des pôles.

Une dégradation de l'environnement des pôles a des incidences bien au-delà des régions polaires. Elle est surtout un risque pour les populations humaines qui en dépendent : perte de leurs sources de revenu, déstabilisation des infrastructures avec la fonte du pergélisol, ... Ce risque n'est pas identique pour tous les acteurs présents aux pôles : certains acteurs pourraient bénéficier de l'accès amélioré aux régions polaires et également à leurs ressources alors que d'autres perdent tout moyen d'existence, sans alternative pour rebondir. Il y a donc un risque financier pour certains, économique pour les États, et un risque de tensions sociales accrues voire de conflits sociaux qui éclateraient.

Les pôles sont des espaces partiellement réglementés

Les activités humaines aux pôles ne sont pas débridées. Les pôles et les eaux polaires font l'objet d'un encadrement juridique national ou international plus ou moins contraignant. Quotas de pêche, licences d'accès aux ressources, permis d'exploitation ont été mis en place par les États souverains responsables pour réguler les accès. Les États côtiers de l'Arctique bénéficient de droits souverains sur leur territoire mais également dans les espaces qui sont sous leur juridiction au large de leurs côtes. En Antarctique, un régime juridique singulier est organisé autour d'un « gel » des prétentions territoriales.

Des conflits de compétences : un risque de paralysie dans la gouvernance des pôles ?

Des conflits de compétences pourraient émerger avec des différends dans les délimitations des espaces sous juridiction des États côtiers (par exemple, en raison de l'extension possible des plateaux continentaux et du développement des routes maritimes : passage du Nord-Ouest au large du Canada et Passage du Nord-Est au large de la Russie). L'activité militaire au nord du cercle polaire pourrait poser un risque pour la sécurité transfrontalière et donner une matérialité à ces conflits de compétences. Ces conflits de compétences pourraient favoriser une paralysie des instances compétentes en cas de problème économique, social ou environnemental avéré qui ne peuvent plus exercer les arbitrages pour lesquelles elles ont autorité.

Des développements nouveaux des pôles : un besoin de mieux réglementer ?

Le centre de l'Océan Arctique est considéré comme de la haute mer et ne bénéficie pas des réglementations développées par les États côtiers dans les zones périphériques. En raison du « gel » des prétentions territoriales en Antarctique, un besoin continu de règles communes est flagrant.

Le risque de vides juridiques pourrait faire que de nouvelles activités ne soient pas suffisamment encadrées et génèrent des impacts économiques, sociaux et environnementaux d'autant plus néfastes. Il est indispensable que les institutions relèvent les défis et soient capables d'arbitrer les demandes et conflits, faute de quoi leurs insuffisances pourraient induire une « ruée vers le froid » d'autant plus forte et dommageable.

Les problématiques économiques et juridiques sont nombreuses en la matière. Les travaux de l'équipe d'AMURE conduisent notamment à l'analyse juridique et économique des risques nés du développement des activités humaines dans les régions polaires et des changements globaux. Dans ce contexte, les États sont conscients de la force d'une coopération internationale, observée depuis longtemps en matière de recherche scientifique, et renforcée au niveau diplomatique.

Au-delà de cette coopération interétatique, les recherches menées au sein d'AMURE ont permis de démontrer que seule une coopération continue, impliquant non seulement les États mais l'ensemble des acteurs concernés, tant au niveau international, européen ou national, permettra de faire face au changement climatique dans les régions polaires.

Ces recherches visent à fournir un appui scientifique venant nourrir les réflexions, et être force de proposition pour les décideurs.

umr-amure.fr
@umramure

UBO

ifremer

cnrs



CHANGEMENT CLIMATIQUE ET GESTION DES RISQUES

Antarctique et Arctique: deux espaces sensibles aux changements

- Isolés mais pas vides !
- Le changement climatique peut induire des risques pour les populations qui vivent des pôles.
- Les espaces polaire ne sont pas sans règles.
- Le développement d'activités humaines nouvelles ou d'une autre ampleur peut être confronté à des vides juridiques: la gouvernance des deux régions est au cœur des préoccupations des acteurs polaires.
- Des conflits de compétences peuvent présenter un risque de paralysie dans la gouvernance des activités.

Une volonté de coopérer des différents acteurs pour garantir

- la sécurité humaine et
- la protection de l'environnement



15 :30-16 :15: Changement climatique et géomorphologie littorale (coordination : Serge Suanez, Pierre Stéphan)

15 :30-15 :45 : Synthèse par Armel Decaulne et Serge Suanez

Synthèse par Serge Suanez¹, Armelle Decaulne², Pierre Stéphan¹, Agnès Baltzer²

¹LETG-Brest UMR 6554 CNRS, Institut Universitaire Européen de la Mer (IUEM), rue Dumont d'Urville, 29200 Plouzané (serge.suanez@univ-brest.fr ; pierre.stephan@univ-brest.fr)

²LETG-Nantes UMR 6554 CNRS, Institut de Géographie et d'Aménagement Régional de l'Université de Nantes (IGARUN), Campus Tertre, BP 81227, 44312 Nantes cedex 3 (armelle.decaulne@univ-nantes.fr ; armelle.decaulne@univ-nantes.fr)

Les actions scientifiques menées par le laboratoire LETG-UMR 6554 CNRS dans le cadre de cette thématique s'inscrivent dans 3 projets majeurs portant sur (i) les dynamiques de versant en lien avec le réchauffement et la fonte des pergélisols au Nunavik (nord Québec), (ii) les dynamiques sédimentaires littorales de construction (plaines littorales et deltas) en lien avec les débâcles glaciaires au Svalbard, (iii) la tempétoérosion et dynamiques érosives des côtes rocheuses et sédimentaires en Islande (projet EXTREMEVENT).

Le projet EXTREMEVENT « Etude de l'impact des événements extrêmes sur les changements morpho-sédimentaires des littoraux islandais » est porté par le LETG-Brest. Il a été lancé en 2014 sur des financements du LabexMER (ANR-10-LABX-19-01) ; depuis 2019, il est en grande partie financé par l'Institut Paul Emile Victor (IPEV). Il rassemble les universités de Bretagne Occidentale, de Rimouski au Québec (UQAR), et des fjords de l'ouest en Islande (University Centre Of The Westfjords). L'objectif est d'étudier l'impact des événements extrêmes (tempêtes) sur la dynamique morphosédimentaire littorale aux latitudes subpolaires de l'Islande qui se situe sur la trajectoire d'une grande partie des plus fortes tempêtes extra-tropicales de l'Atlantique nord. Cette recherche s'inscrit dans une approche comparative zonale puisque des études similaires sont réalisées aux latitudes tempérées de la Bretagne. La finalité de ces recherches porte sur l'élaboration de perspectives si dans le cadre du réchauffement climatique, le rail des dépressions « islandais » venait à se déplacer aux latitudes plus basses de la Bretagne. Ce travail repose sur des suivis topo-morphologiques annuels des côtes rocheuses et d'accumulation situées au SW de l'Islande (presqu'île de Reykjanes). Il a donné lieu à une thèse qui a été soutenue à l'UBO en mars 2018. Un second sujet de thèse a été proposé dans le cadre de la campagne 2021 afin de consolider la poursuite de ces travaux.

Le projet MOVE « Mouvements de versants au Nunavik » est porté par le laboratoire LETG-Nantes. Il a été lancé en 2014 sur des financements du LabEx DRIIHM (ANR-11-LABX-0010), et est co-financé par l'Institut Polaire Français Paul-Emile Victor (IPEV) via le projet DeSiGN. Il rassemble l'Université de Nantes, le CNRS et l'Université Laval à Québec. L'objectif

est d'étudier les processus gravitaires hérités et actifs sur les versants du Nunavik, au Québec nordique afin d'estimer son rôle géomorphologique sur l'évolution post-glaciaire des pentes d'une part, et sur le risque que l'aléa fait peser sur les populations autochtones d'autre part. Ces travaux s'inscrivent dans une étude comparative à l'échelle du domaine subpolaire, en comparaison avec les résultats acquis en Islande septentrionale et Norvège Occidentale. Il s'agit de comprendre la part des différents processus (avalanches de neige, glissements de terrain, chute de blocs) dans l'édification des dépôts de pente en parallèle de la vulnérabilité des activités humaines dans des secteurs à fort potentiel touristique dans un contexte de réchauffement climatique qui fragilise la stabilité des versants et corniches rocheuses les surmontant. Le travail repose sur des suivis morphométriques et photographiques des dépôts de pente, une analyse des fluctuations climatiques et des conditions météorologiques de déclenchement, et une estimation des enjeux humains. Plusieurs étudiants de M2 sont engagés dans ces recherches.

Les premiers travaux en Arctique ont débuté en 2009, dans le cadre de l'IPEV, afin de suivre l'évolution des transferts sédimentaires continents/océan dans le Kongsfjorden, au Svalbard (Arctique) en fonction du changement climatique. Ainsi depuis 2009, plusieurs missions de prospection géophysique (Spitsbay 2009, Sonny 11, Seispits 12) ont permis de suivre la progradation des prodeltas sous-marins sur la côte sud du Kongsfjorden. Le projet Coasts under Climate Change (C3), mené avec le Pr. Denis Mercier a permis de prolonger ces enregistrements de la déglaciation dans le cadre de la thèse de Marine Bourriquen (2016-2018). Ce programme C3 nous a permis de poursuivre l'observation des processus de transfert de sédiments non seulement au niveau des côtes basses, mais également au niveau des falaises. Enfin, un nouveau projet KONBHAS (Kongsfjorden Habitats) a été déposé et accepté auprès de l'IPEV pour la période de 2020 à 2023. Il se focalise sur le développement des foraminifères sur les prodeltas identifiés lors des missions précédentes dans le Kongsfjorden (Bourriquen et al., 2016). En effet, la dernière mission en 2018 nous a permis d'observer un développement notable de la faune et flore sur les prodeltas sous-marins. L'objectif de KONBHAS est de se servir des foraminifères comme "proxis" pour suivre et enregistrer les changements environnementaux en collaboration avec les spécialistes de l'Université d'Angers. Pour ce projet, une thèse a été obtenue à l'université d'Angers depuis Octobre 2020, et la prochaine mission pourrait débuter en Mai 2021. L'étude de ces changements environnementaux actuels en Arctique éclairent les variations holocènes et mettent en évidence l'importance et l'impact des variations du niveau marin futur sur tous les processus sédimentaires et les écosystèmes en domaine côtier.

Conséquences géomorphologiques du changement climatique en milieux littoraux polaires et subpolaires

Serge Suanez¹
Armelle Decaulne²
Pierre Stéphan¹
Agnès Baltzer²

UMR LETG 6554 CNRS

¹ Université de Bretagne occidentale

² Université de Nantes



Dynamique sédimentaire littorale

Spitsberg

- Transferts sédimentaires continent-fjord et progradation littorale. Formation des pro-deltas sous marins. Assemblages des foraminifères et indicateurs des changements environnementaux.
- Erosion des falaises.
- Temps long / temps court

© D. Merlier

LPG, Université de Caen Normandie, UNICAEN

Tempétuosité et érosion littorale

Islande

- Impacts des tempêtes sur la dynamique morpho-sédimentaire littorale
- Approche comparative zonale (moy. vs hautes latitudes)
- Trajectoires du rail des dépressions
- Suivis topo-morphologiques

© S. Guener

labex MER, UQAR, Université de Québec à Rimouski, KIC, RER

Dynamique des versants littoraux

Nunavik

- Processus gravitaires actifs et hérités
- Évolution postglaciaire des pentes
- Avalanches, chutes de blocs, glissements de terrains
- Aléas et vulnérabilités des populations autochtones et allochtones
- Événements extrêmes hivernaux et estivaux
- Fonte du pergélisol

© A. Dorashe

labEx ORII-M, Université de Caen Normandie, UQAR, CEV

15 :45-16 :00 : Etude de cas par Pierre Stéphan

16 :00-16 :15 : Etude de cas par Agnès Baltzer

16 :15-17 :50: Table-ronde : structuration de l'axe transverse (Coordination : Paul Tréguer et les coordinateurs des thèmes).

Bases de la discussion :

Pourquoi ?

Créer un Axe transverse polaire est stratégique dans le contexte du changement global et de ses impacts biologiques et économiques dans les océans polaires et sub-polaires, y compris au niveau littoral, à l'échelle décennale et séculaire. A plus grande échelle cet axe est également stratégique pour le développement de nouveaux paradigmes en géodynamique, pour les régions polaires et sub-polaires.

Comment ?

1--Pour se structurer l'axe transverse polaire s'organise pour favoriser l'échange d'informations sur l'activité "polaire" des chercheurs de l'IUEM et de ses partenaires, en s'appuyant sur la création d'une page web "polaire" du site web de l'IUEM (Newsletter numérique) et l'organisation de séminaires avec une fréquence à déterminer,

2--Pour favoriser la création de projets fédérateurs à l'échelle nationale, européenne et internationale, y compris sous forme de campagnes à la mer, les chercheurs de l'axe transverse polaire peuvent organiser une veille scientifique sur les priorités de recherche d'organismes ou programmes polaires en France, Europe (Commission Européenne, Allemagne, Angleterre, Norvège, etc...) et dans le reste du monde (Australie, Canada, Chine, Nouvelle Zélande, ...).

Annexe : COMPARAISON DE MÉTHODES GÉO-ELECTRIQUES POUR L'AUSCULTATION DU PERGÉLISOL

BAZIN S.1, SYED S.G.2, GILBERT G.3, ETZEMÜLLER B.4

1 maintenant à l'Institut Européen de la Mer, UBO, Brest, France, Sara.Bazin@univ-brest.fr

2 Université d'Oslo (UiO), Oslo, Norvège, syedsg@student.geo.uio.no

3 Institut Norvégien de Géotechnique (NGI), Oslo, Norvège, Graham.Gilbert@ngi.no

4 Université d'Oslo (UiO), Oslo, Norvège, bernd.etzelmuller@geo.uio.no

12^e Colloque GEOFCAN 9 et 10 mars 2021, Grenoble

COMPARAISON DE MÉTHODES GÉO-ELECTRIQUES POUR L'AUSCULTATION DU PERGÉLISOL

BAZIN S.1, SYED S.G.2, GILBERT G.3, ETZEMÜLLER B.4

1 maintenant à l'Institut Européen de la Mer, UBO, Brest, France, Sara.Bazin@univ-brest.fr

2 Université d'Oslo (UiO), Oslo, Norvège, syedsg@student.geo.uio.no

3 Institut Norvégien de Géotechnique (NGI), Oslo, Norvège, Graham.Gilbert@ngi.no

4 Université d'Oslo (UiO), Oslo, Norvège, bernd.etzelmuller@geo.uio.no

RESUME

La tomographie par résistivité électrique (ERT) est très efficace pour cartographier les sols gelés en raison du fort contraste de résistivité entre la glace et l'eau. Nous présentons un exemple d'ERT avec des levés réalisés en utilisant deux types d'acquisition : le couplage galvanique classique avec électrodes et le couplage capacitif (CCR). Bien que peu de travaux aient été publiés sur l'auscultation de la couche active du pergélisol (c'est-à-dire la partie superficielle qui dégèle annuellement) avec la méthode CCR, la présente étude de cas montre l'intérêt de cette méthode en raison de sa rapidité de mise en place.

Mots clés : *pergélisol, couche active, ERT, CCR*

COMPARISON BETWEEN TWO GEOELECTRICAL METHODS FOR PERMAFROST MAPPING

ABSTRACT

Electrical resistivity tomography (ERT) is very effective in mapping frozen soils due to the strong resistivity contrast between ice and water. We present an example of ERT with surveys carried out using two types of acquisition: classic galvanic coupling with electrodes and capacitive coupling (CCR). Although little work has been published on the mapping of the active layer of permafrost (i.e. the ground layer which thaws annually) with the CCR method, this case study shows the interest of this method thanks to its rapidity of field acquisition.

Key words: *permafrost, active layer, ERT, CCR*

INTRODUCTION

L'étude est située dans la ville de Longyearbyen, Svalbard (Fig. 1) sur le site choisi par le Norwegian Geotest Site (NGTS, GILBERT et al. 2019) comme chantier de recherche pour caractériser le pergélisol.

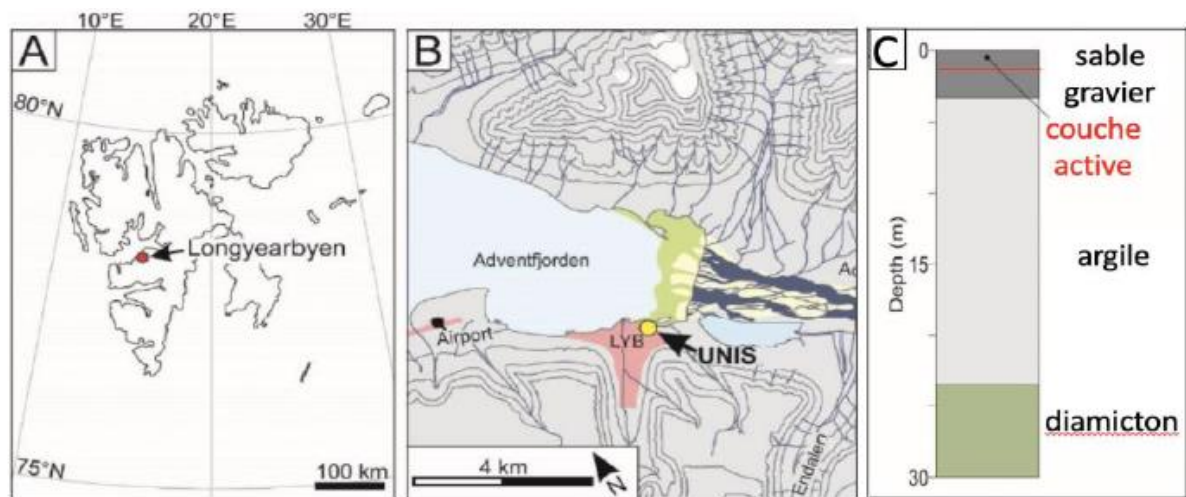


Fig. 1 – A) ville de Longyearbyen, Svalbard. B) site NGTS sur le campus UNIS. C) géologie du site.

Le pergélisol est constitué de matériaux qui restent à en dessous de 0°C pendant au moins deux années consécutives (FRENCH, 2018). Les îles des Svalbard possède le pergélisol le plus chaud au nord de l'Arctique (ROMANOVSKY et al., 2010). Il a généralement une épaisseur d'environ 100 m dans les vallées. La couche gelée peut être très hétérogène dans sa distribution spatiale, en raison des variations de topographie et du couvert de neige et de végétation. Actuellement, le pergélisol est dégradé en raison du réchauffement climatique et la géophysique peut aider à caractériser cette dégradation.

Différents outils d'investigation géophysique de subsurface ont été utilisés avec succès pour cartographier la présence de pergélisol, évaluer la teneur en glace et l'épaisseur de la couche active (HAUCK, 2013). L'ERT convient parfaitement aux études sur le pergélisol car la résistivité électrique dépend de la présence de glace. Celle-ci augmente de façon exponentielle pendant la congélation car la teneur en eau non gelée dans le substrat diminue. L'ERT fournit une information indirecte sur la nature du sous-sol, de la surface jusqu'à quelques dizaines de mètres de profondeur, et peut être facilement étalonnée par forage.

MATERIEL ET METHODES

Un panneau de résistivité électrique a été réalisé en septembre 2017 avec la méthode galvanique classique en utilisant un Terrameter LS2 (ABEM, Fig. 2A) avec une disposition roll-along à 81 électrodes et 2 m de séparation entre les électrodes pour une longueur totale de 200 m. Le même profil a été acquis en juillet 2019, cette fois avec la méthode CCR, en utilisant un OhmMapper (GEOMETRICS, Fig. 2B) avec 2 dipôles récepteurs. Le profil a été réalisé par plusieurs passages en allongeant successivement la distance entre les dipôles à l'aide d'une corde. Les données ont ensuite été concaténées pour produire un panneau vertical. Le profil du OhmMapper est légèrement plus court (160 m) que celui du Terrameter en raison de la présence de bâtiments qui empêchaient de dérouler totalement la flûte. Le point d'origine, à 0m, est identique pour les deux profils. Environ deux heures ont été nécessaires pour réaliser chacun des levés.

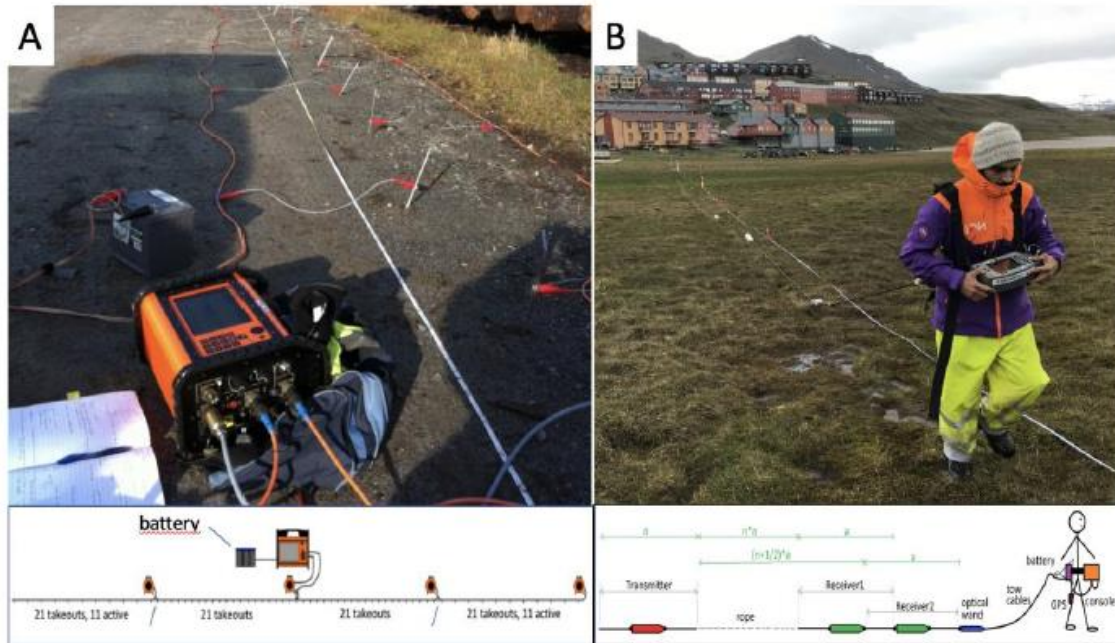


Fig. 2 – A) Acquisition classique avec un Terrameter. B) Acquisition type CCR avec un OhmMapper.

12e Colloque GEOFCAN

9 et 10 mars 2021, Grenoble

3

Les deux jeux de données ont été traités de façon similaire avec le logiciel Res2Dinv : une inspection manuelle avec élimination des valeurs aberrantes puis une inversion de type robuste (norme L1). Les modèles de résistivités sont illustrés dans les Fig. 3A et Fig. 4A avec la même échelle de couleurs.

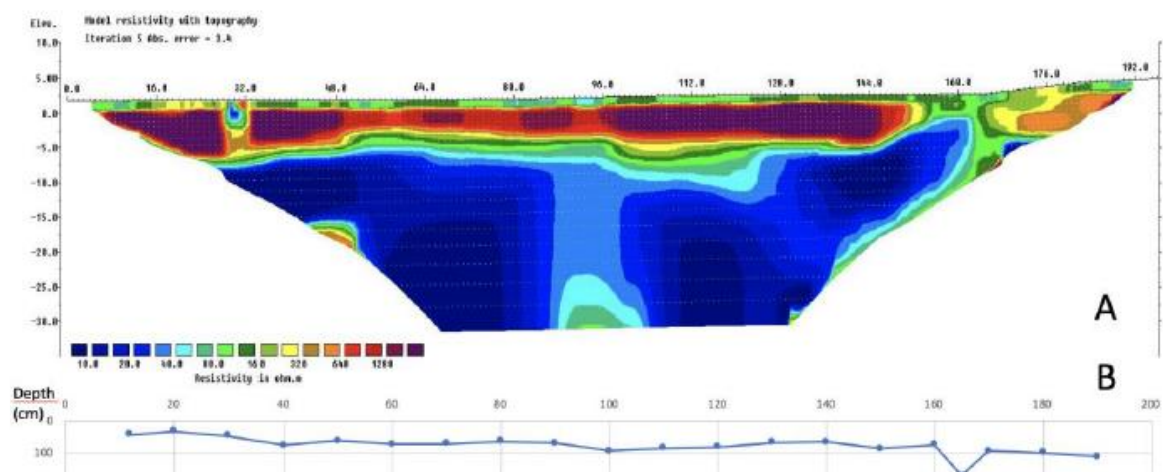


Fig. 3 – A) Panneau de résistivité avec le Terrameter. B) Profondeur de la couche active en cm.

Par ailleurs, la profondeur de la couche active a été mesurée manuellement le long des deux profils en enfonçant une pointe graduée dans le sol. L'épaisseur moyenne de la couche active était de 79 cm en septembre 2017 pendant le levé avec le Terrameter (Fig. 3B) et de 35 cm en juillet 2019 pendant le levé avec le OhmMapper (Fig. 4B).

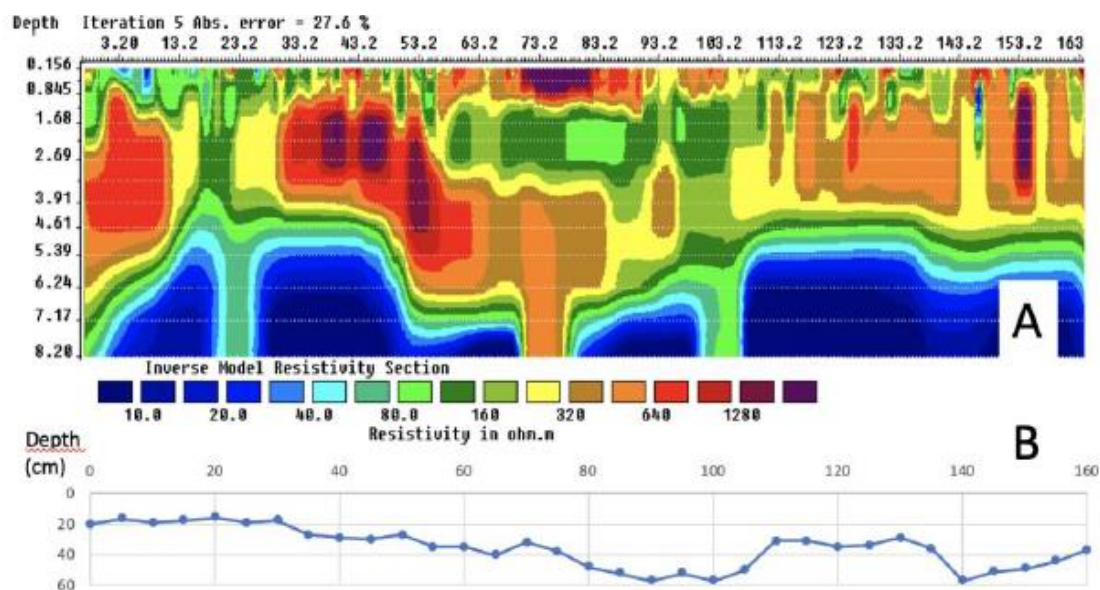


Fig. 4 – A) Panneau de résistivité avec le OhmMapper. B) Profondeur de la couche active en cm.

La profondeur d'investigation du panneau mesuré avec le Terrameter est 32 m alors que celle avec le OhmMapper est 8 m. Les données sont globalement moins bruitées avec le Terrameter qu'avec le OhmMapper et le modèle obtenu a une meilleure erreur moyenne quadratique (3 % contre 28%). Les deux modèles imagent une couche superficielle et conductrice ($\rho \sim 100 \Omega m$), qui correspond à la couche active du pergélisol. Son épaisseur est détectée entre 1 et 2 m sur le levé avec le Terrameter. Cette surestimation est engendrée par l'écartement des électrodes. L'épaisseur de la couche active varie entre 0 et 2,7 m sur le levé du OhmMapper alors que les mesures manuelles indiquent une moyenne de seulement 35 cm et une faible variabilité. Les deux profils imagent plus bas la couche de sable gelé ($\rho \sim 1 k\Omega m$) avec la même épaisseur (~ 5 m), puis la couche d'argile conductrice ($\rho \sim 10 \Omega m$).

12e Colloque GEOFCAN

9 et 10 mars 2021, Grenoble

4

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Même si la résolution verticale d'un levé CCR devrait être supérieure grâce à la plus grande densité de points de mesure, le modèle de résistivité obtenu est moins facile à interpréter que celui obtenu avec un levé classique. Ainsi pour une acquisition en panneau vertical, la méthode ERT classique semble plus efficace pour cartographier la couche active du pergélisol. En revanche, l'intérêt de la méthode CCR se révèle pour une acquisition en mode carte. En effet dans ce cas, l'opérateur n'a pas besoin de modifier l'écartement entre les dipôles lors de l'acquisition et il peut facilement acquérir un levé en 3D en marchant le long de profils parallèles. La Fig. 5 montre l'exemple d'une grille de 100 m x 100 m obtenue en environ 2 heures de temps et inversée avec Res3Dinv (SYED, 2021). Les rides résistives allongées correspondent à des structures géologiques (coins de glace). Avec cette géométrie d'acquisition, la grande densité de points de mesure devient un avantage par rapport à la méthode classique qui consisterait à planter de nombreuses électrodes le long de profils parallèles. Par ailleurs, la méthode CCR s'affranchit du problème de résistances de contact qui est pénalisant en milieu résistif.

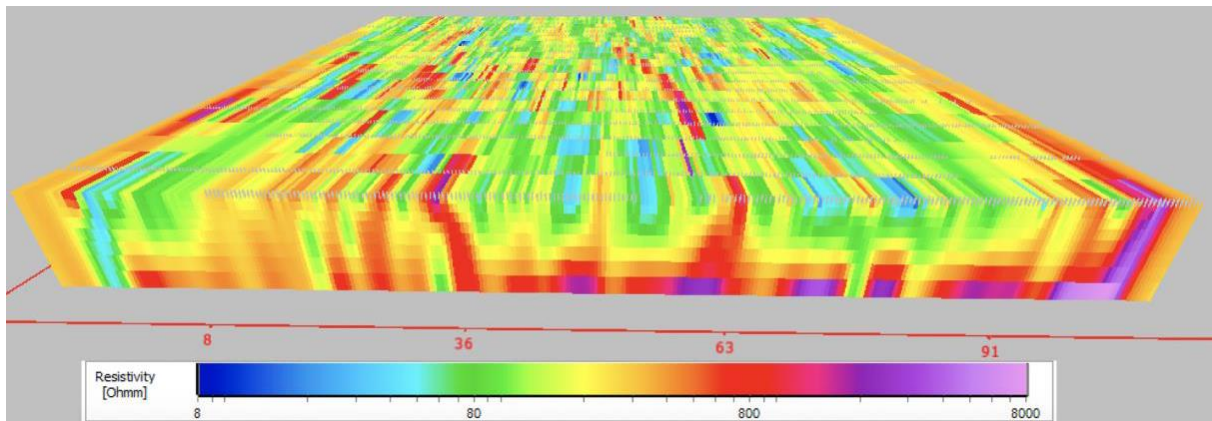


Fig. 5 – une grille (100 m x 100 m x 2 m) de résistivité mesurée par méthode CCR image la couche active (conductrice) et les coins de glace (longues rides résistives) caractéristiques du pergélisol.

Remerciements

Cette étude a été financée par le projet GBV290190133 du NGI. Nous remercions UNIS pour avoir facilité la logistique de la mission et M.-E. Pau pour son aide musclée sur le terrain.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.

FRENCH H.M., 2018 - *The Periglacial Environment*, John Wiley and Sons, Ltd., 515 pages.

GILBERT G., INSTANES A., SINITSYN A.O., AALBERG A. 2019 - Characterization of two sites for geotechnical testing in permafrost: Longyearbyen, Svalbard. *Geosciences*, 5 (4) 868-885.

HAUCK C., 2013 - New concepts in geophysical surveying and data interpretation for permafrost terrain. *Permafrost and Periglacial Processes*, doi:10.1002/ppp.1774

ROMANOVSKY V.E., SMITH S.L., CHRISTIANSE H.H. 2010 - Permafrost thermal state in the polar Northern Hemisphere during the international polar year 2007–2009: a synthesis. *Permafrost and Periglacial Processes*, doi:10.1002/ppp.689.

SYED S.G., 2021 - Testing of different resistivity investigation methods for mapping permafrost. Thèse de Master, Université d'Oslo, 62 pages.