

1.3. Les kystes de dinoflagellés (= dinokystes)

Les dinoflagellés sont des organismes unicellulaires microscopiques biflagellés faisant partie du phytoplancton marin (Taylor et al., 2008). Ils peuvent occasionnellement former des floraisons massives appelées marées rouges. Certaines espèces peuvent être toxiques. Le cycle de vie de certaines espèces de dinoflagellés comporte une phase sexuée après laquelle un kyste résistant est formé (Figure 1.4).

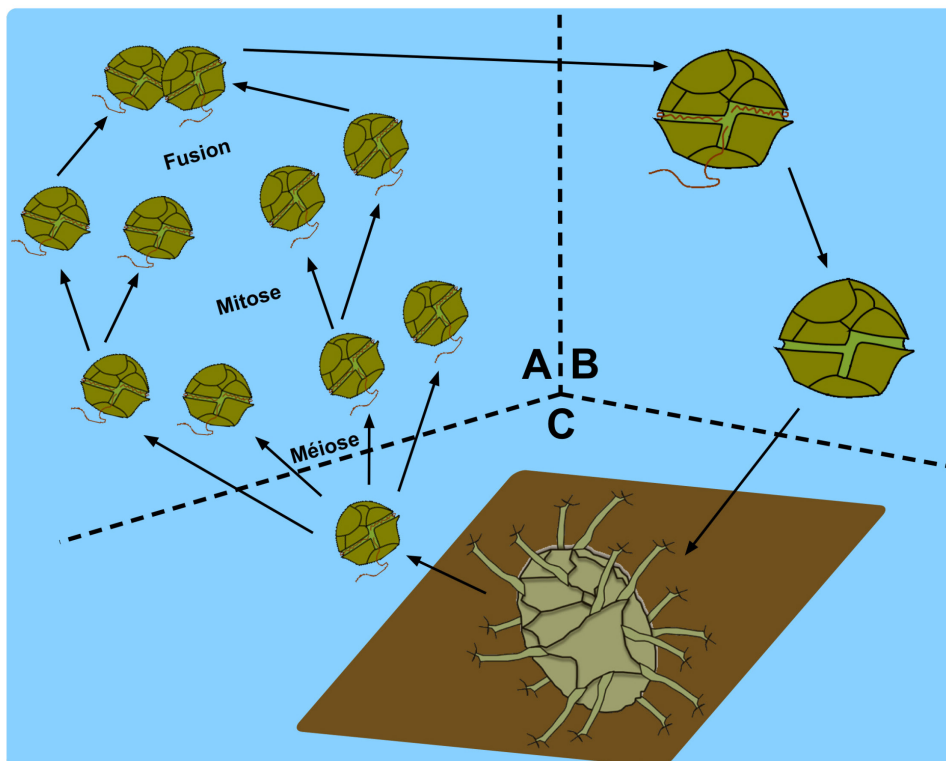


Figure 1.4 : Schéma du cycle de vie des dinoflagellés. A) phase haploïde durant laquelle les individus (1 dinoflagellé = 1 cellule) se divisent *via* la mitose. Il s'agit du stade de vie végétatif qui produit les événements de floraison ou *bloom*. À la suite d'un signal interne et/ou externe, des gamètes se forment et fusionneront pour produire un zygote diploïde; B) phase planozygote (zygote mobile pélagique) durant laquelle la cellule diploïde perdra éventuellement sa mobilité et développera un kyste qui sera éventuellement libéré dans la colonne d'eau puis sédimentera; C) phase hypnozygote durant laquelle le kyste subira une période de dormance obligatoire contrôlée par une horloge interne qui déclenchera le moment de la libération du dinoflagellé ou exkystement (adapté de Rochon, 2009).

Ce dinokyste est composé de dinosporine, un polymère très résistant, similaire à la sporopollénine impliquée dans la construction de la paroi des grains de pollen et des spores. Le dinokyste est ainsi préservé dans les sédiments jusqu'à la venue des conditions nécessaires à la floraison (Rochon, 2009). La forme et l'ornementation du kyste sont caractéristiques pour chaque espèce et permettent leur identification.

Les dinokystes ont été utilisés dans de nombreuses études en tant que *proxies* paléocéanographiques de certains paramètres environnementaux caractéristiques du développement de chaque espèce (salinité et température des eaux de surface, durée du couvert de glace, productivité). La méthode de reconstitution quantitative employée utilise des fonctions de transfert qui comparent les assemblages fossiles des séquences sédimentaires marines aux assemblages modernes de dinokystes des sédiments de surface afin d'identifier les meilleurs analogues modernes et les conditions environnementales qui leurs sont liées. (Rochon et al., 1999; Devillers and de Vernal, 2000; Boessenkool et al., 2001; de Vernal et al., 2001, 2005, 2006; Grøsfjeld and Harland, 2001; Kunz-Pirrung, 2001; Mudie and Rochon, 2001; Radi et al., 2001; Voronina et al., 2001; Radi and de Vernal, 2008; Richerol et al., 2008a,b; Bonnet et al., 2012).

Les dinokystes ont déjà été employés dans des études précédentes portant sur des fjords de régions arctiques et subarctiques. Dans les fjords norvégiens, la dynamique de la formation, de la sédimentation et la préservation des dinokystes a été étudiée à Trondheimsfjord (Dale, 1976), tandis que les dinokystes ont été employés comme *proxy* pour la pollution et le climat passé à Nordåsvannet et Grimstadvfjord (Thorsen et Dale, 1997) et comme *proxy* pour l'eutrophisation d'origine humaine à Oslofjord (Dale et al., 1999). Les dinokystes ont également été employés dans une étude multi-*proxies* sur le climat Holocène dans le fjord subarctique de Malangen (Hald et al., 2003). Dans le fjord de Gullmar (Suède), la relation entre l'abondance des dinoflagellés planctoniques, l'abondance de dinokystes récupérés dans des pièges à sédiments et les facteurs

environnementaux a également été étudiée (Godhe et al., 2001; Harland et al., 2006). Dans le fjord d'Igaliku (Sud du Groenland), les dinokystes ont été employés pour documenter les palynofaciès de la fin de l'Holocène en relation avec la paléohydrographie du fjord (Roncaglia et Kuijpers, 2004). Les assemblages de dinokystes des fjords du Svalbard ont été documentés en relation avec les conditions océanographiques modernes (Kongsfjorden, Krossfjorden, Sassenfjorden, Van Mijenfjorden et Storfjorden) (Grøsfjeld et al., 2009) et l'influence de la circulation atlantique (Kongsfjorden et Rijpfjorden) (Howe et al., 2010). Sur la côte Ouest du Canada, le fjord anoxique d'Effingham (Île de Vancouver, Colombie-Britannique.) a été étudié afin de caractériser les assemblages modernes de dinokystes (Kumar et Patterson, 2002) et les conditions paléocéanographiques (Patterson et al., 2011).

La glace de mer est un paramètre complexe, difficile à reconstituer à partir d'observations indirectes. Alors que les sciences du climat considèrent la glace de mer comme un paramètre purement physique, les géosciences reconstituent les conditions passées de glace de mer en assumant qu'elle joue un rôle central dans la biogéochimie de l'eau de mer et donc dans la production primaire et la structure trophique des populations planctoniques (Meier et al., 2011). La plupart des *proxies* pour la glace de mer employés dans les reconstitutions proviennent de restes d'organismes vivants récupérés dans les sédiments marins (i.e. diatomées, foraminifères, dinokystes, ostracodes). Comme les zones de productivité dans les environnements de glace de mer se retrouvent essentiellement proche de la limite de la glace au printemps et à l'été, la plupart des *proxies* sont reliés à la saisonnalité de la glace de mer (de Vernal et al., 2013). Les dinokystes en particulier fournissent de l'information sur l'étendue annuelle du couvert de glace de mer pour l'hémisphère Nord (de Vernal et al., 2008). Cependant, leur relation avec le couvert de glace est souvent indirecte, dépendante plus directement de la quantité de lumière et/ou de nourriture disponibles en fonction du couvert de glace (Richerol et al., 2012). De plus, l'hétérogénéité taxonomique des populations dans l'espace peut être liée à l'endémisme ou au développement de différents

génotypes pour différentes affinités écologiques. Ainsi, les dinokystes sont essentiellement utiles à une échelle régionale pour reconstituer le couvert de glace et doivent être comparés à d'autres indicateurs pour une interprétation plus complète des conditions paléoenvironnementales (de Vernal et al., 2013).

1.4. Reconstitutions climatiques au Labrador et dans les régions avoisinantes

À l'heure actuelle, il existe peu de reconstitutions paléoclimatiques qui portent uniquement sur la région du Labrador. La plupart englobent de plus grandes régions dont le Labrador ne représente qu'une petite partie (par exemple, le Nord-Est du Canada, la région boréale du Canada, l'Arctique et le Subarctique canadien ou la mer du Labrador). Une étude de Fallu et al. (2002) utilise comme *proxy* les assemblages modernes de diatomées provenant des sédiments de surface de 64 lacs du Québec-Labrador. Les analyses statistiques de ces assemblages ont montré une nette corrélation entre la répartition des espèces et la couleur de l'eau et l'alcalinité. Ces assemblages de diatomées permettent de démontrer le potentiel de cette base de données pour détecter des changements plus subtils du couvert végétal du bassin versant des lacs. Les reconstitutions climatiques réalisées sur une séquence sédimentaire lacustre du Nord du Québec, en utilisant cette base de donnée de diatomées, ont révélé une tendance régionale au refroidissement sur les derniers 1 500 ans et l'absence de signe du réchauffement récent (Fallu et al., 2005). En règle générale, les études portant sur une reconstitution climatique du Labrador et du Nord du Québec à partir de diatomées montre une stabilité climatique au cours des 200 dernières années (Laing et al., 2002 ; Paterson et al., 2003 ; Smol et al., 2005), en décalage avec le reste de l'Arctique qui montre un réchauffement plus ou moins rapide selon les régions (ACIA, 2005).

Les reconstitutions climatiques pour le Labrador, basées sur le pollen, portent sur les ~10 000 dernières années, selon des échelles de temps millénaires (orbitales) afin de mieux appréhender le réchauffement climatique actuel (Viau et Gajewski, 2009). De nombreux sites au Labrador enregistrent une longue période de végétation de type toundra après la déglaciation (Short et Nichols, 1977 ; Lamb, 1980) ce qui conduit à une reconstitution de températures froides pour le début de

l'Holocène. La transition d'une toundra herbacée vers une toundra arbustive dans le Nord du Labrador (Short et Nichols, 1977) et la diminution du sapin et de l'épinette blanche favorisant l'épinette noire dans le Sud du Labrador (Engstrom et Hansen, 1985) vers 6 500 BP, témoignent d'une augmentation rapide des températures hivernales. Un maximum des températures estivales entre 4 000 et 2 500 BP correspond au maximum d'abondance relative de l'épinette et de l'accumulation pollinique dans le Sud-Est et le centre du Labrador (Short et Nichols, 1977 ; Lamb, 1980). Cette reconstitution faite à partir des assemblages polliniques n'a cependant pas la résolution suffisante pour faire ressortir l'impact du réchauffement climatique actuel sur la végétation locale (Viau et Gajewski, 2009).

Les reconstitutions reposant sur les assemblages de dinokystes sont principalement concentrées dans la mer du Labrador, le Nord-Ouest de l'océan Atlantique ou Nord-Est de l'Arctique canadien et la baie de Baffin (Hillaire-Marcel et al., 1994 ; Levac et de Vernal, 1997 ; Sawada et al., 1999 ; de Vernal et al., 2002 ; de Vernal et Hillaire-Marcel, 2006 ; Radi et de Vernal, 2008a). Il existe une base de données des assemblages modernes de dinokystes pour l'hémisphère Nord (n=1 171), mais les sites spécifiques aux écosystèmes du Labrador en sont absents en-dehors de quelques-uns dans la mer du Labrador (Radi et de Vernal, 2008b). Les reconstitutions climatiques réalisées à partir des dinokystes couvrent le domaine marin et sont complémentées par des reconstitutions réalisées à partir du pollen de la végétation terrestre afin d'établir une corrélation entre la palynostratigraphie continentale et la palynostratigraphie océanique (Levac et de Vernal, 1997 ; Sawada et al., 1999).

Des analyses statistiques ont montré, qu'au niveau régional, il existe une corrélation entre les deux types de reconstitutions car les deux *proxies* répondent au même signal climatique. L'étude palynologique d'une séquence sédimentaire prélevée le long de la côte du Labrador, a permis de reconstituer les conditions marines de surface grâce aux dinokystes et de les corrélérer avec l'histoire de la végétation des terres adjacentes sur la base des assemblages polliniques fossiles

(Levac et de Vernal, 1997). Depuis la déglaciation jusqu'à environ 8 000 BP, les auteurs reconstituent des conditions de type arctique dans les eaux de surface caractérisées par la dominance de l'espèce *Islandinium minutum*. Pour la même période, les assemblages polliniques révèlent une végétation de type toundra dans le Sud-Est du Labrador (Engstrom et Hansen, 1985). Entre 8 000 et 6 000 BP, Levac et de Vernal (1997) observent la codominance d'*I. minutum* et de *Brigantedinium* spp., ce qui caractérise une persistance des conditions froides pour les eaux de surface, avec des températures reconstituées inférieures à 3°C pour le mois le plus chaud (août) et une durée du couvert de glace reconstituée de ~11 mois an⁻¹. Cependant, la présence de pollen d'*Abies* (sapin) entre 7 000 et 6 000 BP et l'augmentation de l'abondance de pollen d'*Alnus* (aulne) illustrent un déplacement de la limite des arbres vers le Nord et le développement d'une toundra arbustive résultant de conditions climatiques terrestres plus chaudes (Lamb, 1980 ; Engstrom et Hansen, 1985). Vers 6 000 BP, la présence de *Peridinium faeroense* (maintenant *Pentapharsodinium dalei*) et de *Nematosphaeropsis labyrinthus* dans la séquence sédimentaire marine, suggère l'établissement de conditions semblables à l'actuel dans les eaux de surface. Cette transition coïncide avec une soudaine augmentation de l'abondance de l'épinette (*Picea*), associée avec le développement régional de forêts d'épinettes (Lamb, 1980 ; Vilks et Mudie, 1983 ; Engstrom et Hansen, 1985). De 6 000 BP à nos jours, les assemblages de dinokystes ne montrent pas de changement significatif des températures, cependant les assemblages polliniques montrent une diminution du pollen arborescent et donc une ouverture du couvert forestier causée par un léger refroidissement (Lamb, 1980 ; Vilks et Mudie, 1983 ; Engstrom et Hansen, 1985 ; Levac et de Vernal, 1997).

Une autre étude a combiné les informations reconstituées à partir des assemblages de diatomées de 3 lacs du Labrador et des assemblages de dinokystes provenant d'une séquence sédimentaire prélevée au Sud de la mer du Labrador (Sawada et al., 1999). Les séquences polliniques du Sud du Labrador couvrent une longue période de temps et indiquent des températures froides avant 7 000 BP, un réchauffement entre 7 000 et 6 000 BP et un refroidissement durant

les derniers 5 000 ans. L'augmentation des températures reconstituées à partir des assemblages polliniques entre 7 000 et 6 000 BP montre un décalage temporel. Il se produit d'abord dans le Sud (6 400 BP) et plus tardivement vers le Nord (entre 4 600 et 1 800 BP). La séquence marine de la mer du Labrador indique un maximum thermique vers 6 200 BP (Sawada et al., 1999). D'importantes fluctuations apparaissent après 7 400 BP dans la séquence marine et peuvent être attribuées à des variations dans le débit de l'eau de fonte du glacier résiduel. Cependant, Sawada et al. (1999) l'interprètent comme un réchauffement progressif du milieu de l'Holocène. Avant 6 000 BP, un glacier persistait dans la péninsule du Québec/Labrador et influençait fortement le climat de la région. Les modèles de simulation du climat montrent la présence d'un anticyclone au-dessus du glacier, résultant en des vents de type cathabatique en provenance du Nord et des températures froides au Labrador (COHMAP members, 1988). Le réchauffement progressif reconstitué pour les sites terrestres du Labrador pourrait résulter de la fonte de ce glacier satellite. Alors que le glacier fondait, l'ouverture de la baie d'Hudson affectait le courant du Labrador (Dyke et al., 1996) et donc les assemblages de dinoflagellés.

La plupart des études portant sur le climat récent de l'Arctique et des régions subarctiques ont documenté un réchauffement des conditions atmosphériques et une diminution du couvert de glace de mer, en épaisseur et en durée, depuis le début de l'Ère Industrielle (ACIA, 2005; Smol et al, 2005; Stroeve et al, 2011; PAGES 2k Consortium, 2013). Il n'existe que peu d'études au Labrador pour cette période. D'une part, des études paléolimnologiques ont utilisé des assemblages de diatomées fossiles de séquences sédimentaires lacustres afin de reconstituer le climat des 100 à 300 dernières années du Nord du Québec-Labrador et de l'Est de la baie d'Ungava (Laing et al, 2002; Smol et al, 2005), et de la région du fjord de Saglek (Chapitre 2, Figure 2.1) (Gauthier, 2013). D'autre part, des études dendroclimatologiques ont corrélé les variations de la densité du bois final des arbres dans le fjord d'Okak avec la température estivale de l'air à une

échelle décennale, pour les derniers 350-400 ans (D'Arrigo et al., 1996, 2003; D'Arrigo et Jacoby, 1999).

Les résultats fournis par les études paléolimnologiques montrent une forte stabilité du climat du Labrador, accompagnée d'une légère tendance au refroidissement (D'Arrigo et al., 1996, 2003; Laing et al., 2002; Smol et al., 2005). L'étude dans la région du fjord de Saglek porte sur les séquences sédimentaires de deux lacs dont le bassin hydrographique, les caractéristiques écologiques et l'influence de la végétation sont différents. En conséquence, les compositions d'espèces de leurs assemblages fossiles de diatomées étaient également différentes. Les analyses des séquences sédimentaires de ces deux lacs ont révélé le plus faible renouvellement de la composition diatomologique pour des lacs arctiques depuis ~1850 AD et aucun changement significatif dans leurs assemblages de diatomées au cours des derniers ~300 ans (Gauthier, 2013). Cette absence de changement dans la biodiversité des diatomées suggère des changements limnologiques insignifiants dans les deux lacs au cours de cette période et, par conséquent, aucune influence mesurable dans la région de Saglek des récents changements climatiques observés dans d'autres régions arctiques et subarctiques où des changements brusques dans les communautés aquatiques ont été documentés (Douglas et al., 1994; Sorvari et al., 2002; Perren et al., 2003; Rühland and Smol, 2005; Solovieva et al., 2005; Perren et al., 2012; Gauthier, 2013).

Les études dendroclimatologiques portant sur l'épaisseur maximale du bois d'été ont permis de reconstituer les températures estivales passées pour le Labrador (D'Arrigo et al., 1996 ; D'Arrigo et Jacoby, 1999). Plus précisément, des chronologies ont pu être établies à partir de l'épaisseur et de la densité des cernes de croissance des arbres dans le fjord d'Okak (Chapitre 2, Figure 2.1), à la limite des arbres au Nord du Labrador (D'Arrigo et al., 1996). Ces chronologies remontent jusqu'à 1650 AD, permettant ainsi de documenter la période climatique récente. Vers l'intérieur des terres la densité des cernes est significativement corrélée avec la température estivale de l'air. Proche de la côte et de la mer du

Labrador, cette corrélation est plus évidente en ce qui concerne la température estivale des eaux de surface. Des fluctuations décennales dans la densité des cernes entre la fin du 17^{ème} et le milieu du 18^{ème} siècle sont interprétées comme un changement de conditions climatiques froides à chaudes puis à nouveau froides. Par la suite, la densité des cernes montre une certaine stabilité, à l'exception d'une brusque diminution aux alentours de 1816 AD associée avec l'éruption du volcan Tambora (Indonésie) en 1815 AD. Cette année est connue dans l'Est de l'Amérique du Nord comme « l'année sans été », et des enregistrements du couvert de glace et d'autres observations ont confirmé une période de grand froid durant le printemps et l'été de l'année 1816 AD dans le Nord du Labrador et dans la région de la mer du Labrador (Newell, 1992 ; D'Arrigo et Jacoby, 1999). Vers la fin du 20^{ème} siècle on observe une tendance à l'augmentation de la densité des cernes qui peut être associée avec le réchauffement actuel observé sur le reste de l'Arctique canadien (D'Arrigo et al., 1996, 2003).

1.5. Références bibliographiques

- Allard, M. and Lemay, M., 2012. Nunavik and Nunatsiavut: from Science to Policy. An integrated Regional Impact Study (IRIS) of Climate Change and Modernization. ArcticNet Inc., Quebec City, Canada, 303pp.
- Arctic Climate Impact Assessment (ACIA), 2005. International Arctic Science Committee (IASC), Cambridge University Press, 1020 pp.
- Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), 2011. Snow, Water, Ice and Permafrost in the Arctic (SWIPA): Climate Change and the Cryosphere. AMAP, Oslo, Norway. 538 pp.
- Barber, D. C., Dyke, A., Hillaire-Marcel, C., Jennings, A. E., Andrews, J. T., Kerwin, M. W., Bilodeau, G., MacNeely, R., Southon, J., Morehead, M. D. and Gagnon, J.-M., 1999. Forcing of the cold event of 8,200 years ago by catastrophic drainage of Laurentide lakes. *Nature*, 400, 344-348.
- Bell, T., Josenhans, H., 1997. The seismic record of glaciation in Nachvak Fiord, Northern Labrador. In: Davies, T. A., Bell, T., Cooper, A. K., Josenhans, H., Polyak, L., Solheim, A., Stoker, M. S., Stravers, J. A. (Eds.), *Glaciated Continental Margins: An Atlas of Acoustic Images*. Chapman & Hall, London UK, pp.190-193.
- Boessenkool, K.P., van Gelder, M.J., Brinkhuis, H. and Troelstra, S.R., 2001. Distribution of organic-walled dinoflagellate cysts in surface sediments from transects across the Polar Front offshore southeast Greenland. *Journal of Quaternary Science*, 16(7), 661-666.
- Bonnet, S., de Vernal, A., Gersonde, R. and Lembke-Jene, L., 2012. Modern distribution of dinocysts from the North Pacific Ocean (37-64°N, 144°E-148°W) in relation to hydrographic conditions, sea-ice and productivity. *Marine Micropaleontology*, 84-85, 87-113.
- Brown, R., Lemay, M., Allard, M., Barrand, N. E., Barrette, C., Bégin, Y., Bell, T., Bernier, M., Bleau, S., Chaumont, D., Dibike, Y., Frigon, A., Leblanc, P., Paquin, D., Sharp, M. J. and Way, R., 2012a. Chapter 2 – Climate variability and change in the Canadian Eastern Subarctic IRIS region (Nunavik and Nunatsiavut). In Allard, M. and Lemay, M. (Eds): *Nunavik and Nunatsiavut: from Science to Policy. An integrated Regional Impact Study (IRIS) of Climate Change and Modernization*. ArcticNet Inc., Quebec City, Canada, 57-113.
- Brown, T., Reimer, K., Sheldon, T., Bell, T., Bentley, S., Pienitz, R., Gosselin, M., Blais, M., Carpenter, M., Estrada, E., Richerol, T., Kahlmeyer, E., Luque, S., Sjare, B., Fisk, A. and Iverson, S., 2012. Chapter 10 – A first look at Nunatsiavut Kangidualuk (“fjord”) ecosystems. In Allard, M. and Lemay, M. (Eds): *Nunavik and Nunatsiavut: from Science to Policy. An integrated Regional Impact Study (IRIS) of Climate Change and Modernization*. ArcticNet Inc., Quebec City, Canada, 271-301.
- Carlson, A. E., Clark, P. U., Raisbeck, G. M. and Brook, E. J., 2007. Rapid Holocene deglaciation of the Labrador sector of the Laurentide Ice Sheet. *Journal of Climate*, 20, 5126-5133.
- Carlson, A. E., Legrande, A. N., Oppo, D. W., Came, R. E., Schmidt, G. A., Anslow, F. S., Licciardi, J. M. and Obbink, E. A., 2008. Rapid early Holocene deglaciation of the Laurentide ice sheet. *Nature Geoscience*, 1, 620-624.
- Caya, D., Laprise, R., Giguère, M., Bergeron, G., Blanchet, J.-P., Stocks, B. J., Boer, G. J. and McFarlane, N. A., 1995. Description of the Canadian Regional Climate Model. *Water, Air and Soil Pollution*, 82, 477-482.
- Caya, D. and Laprise, R., 1999. A semi-implicit semi-Lagrangian regional climate model: The Canadian RCM. *Monthly Weather Review*, 127, 341-362.

- COHMAP members 1988. Climate changes of the last 18,000 years: observations and model simulations. *Science*, 241, 1043-1052.
- Dale, B., 1976. Cyst formation, sedimentation, and preservation: factors affecting dinoflagellate assemblages in recent sediments from Trondheimsfjord, Norway. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 22, 39-60.
- Dale, B., Thorsen, T. A. and Fjellså, A., 1999. Dinoflagellate cysts as indicators of cultural eutrophication in the Oslofjord, Norway. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 48, 371-382.
- D'Arrigo, R. D., Cook, E. R. and Jacoby, G. C., 1996. Annual to decadal-scale variations on northwest Atlantic sector temperatures inferred from Labrador tree rings. *Canadian Journal of Forest Research*, 26, 143-148.
- D'Arrigo, R. D. and Jacoby, G. C., 1999. Northern North American tree-ring evidence for regional temperature changes after major volcanic events. *Climate Change*, 41, 1-15.
- D'Arrigo, R. D., Buckley, B., Kaplan, S. and Woollett, J., 2003. Interannual to multidecadal modes of Labrador climate variability inferred from tree rings. *Climate Dynamics*, 20, 219-228.
- De Blij, H. J. (Ed.) 2005. *Atlas of North America*. Oxford University Press.
- de Vernal, A., Henry, M., Matthiessen, J., Mudie, P.J., Rochon, A., Boessenkool, K.P., Eynaud, F., Grøsfjeld, K., Guiot, J., Hamel, D., Harland, R., Head, M.J., Kunz-Pirrung, M., Levac, E., Loucheur, V., Peyron, O., Pospelova, V., Radi, T., Turon, J.-L. and Voronina, E., 2001. Dinoflagellate cyst assemblages as tracers of sea-surface conditions in the northern North Atlantic, Arctic and sub-Arctic seas : the new 'n=677' data base and its application for quantitative palaeoceanographic reconstruction. *Journal of Quaternary Science*, 16(7), 681-698.
- de Vernal, A., Hillaire-Marcel, C., Peltier, W. R. and Weaver, A. J., 2002. Structure of the upper water column in the northwest North Atlantic: modern versus Last Glacial Maximum conditions. *Paleoceanography*, 17(4), 1050, doi:10.1029/2001PA000665.
- de Vernal, A., Eynaud, F., Henry, M., Hillaire-Marcel, C., Londeix, L., Mangin, S., Matthiessen, J., Marret, F., Radi, T., Rochon, A., Solignac, S. and Turon, J.-L., 2005. Reconstruction of sea-surface conditions at middle to high latitudes of the Northern Hemisphere during the Last Glacial Maximum (LGM) based on dinoflagellate cyst assemblages. *Quaternary Science Reviews*, 24, 897-924.
- de Vernal, A. and Hillaire-Marcel, C., 2006. Provincialism in trends and high frequency changes in the northwest North Atlantic during the Holocene. *Global and Planetary Change*, 54, 263-290.
- de Vernal, A., Rosell-Melé, A., Kucera, M., Hillaire-Marcel, C., Eynaud, F., Weinelt, M., Dokken, T. and Kageyama, M., 2006. Comparing proxies for the reconstruction of LGM sea-surface conditions in the northern North Atlantic. *Quaternary Science Reviews*, 25, 2820-2834.
- de Vernal, A., Hillaire-Marcel, C., Solignac, S., Radi, T. and Rochon, A., 2008. Reconstructing sea-ice conditions in the Arctic and subarctic prior to human observations. In Weaver, E. (Ed.): *Arctic Sea Ice Decline: Observations, Projections, Mechanisms, and Implications*. AGU Monograph Series, 180, 27-45.
- de Vernal, A., Hillaire-Marcel, C., Rochon, A., Fréchette, B., Henry, M., Solignac, S. and Bonnet, S., 2013. Dinocyst-based reconstructions of sea ice cover concentration during the Holocene in the Arctic Ocean, the northern North Atlantic Ocean and its adjacent seas. *Quaternary Science Reviews*, 79, 111-121.
- Devillers, R. and de Vernal, A., 2000. Distribution of dinoflagellate cysts in surface sediments of the northern North Atlantic in relation to nutrient content and productivity in surface waters. *Marine Geology*, 166, 103-124.

- Douglas, M. S. V., Smol, J. P. and Blake, W. J., 1994. Marked post-18th century environmental change in high-arctic ecosystems. *Science*, 266(5184), 416-419.
- Dyke, A. S. and Prest, V. K., 1987. Late Wisconsinan and Holocene history of the Laurentide Ice Sheet. *Géographie Physique et Quaternaire*, 41(2), 237-263.
- Dyke, A. S., Dale, J. E. and McNeely, R. N., 1996. Marine molluscs as indicators of environmental change in glaciated North America and Greenland during the last 18000 years. *Géographie Physique et Quaternaire*, 50, 125-184.
- Dyke, A. S., Andrews, J. T., Clark, P. U., England, J. H., Miller, G. H., Shaw, J. and Veillette, J. J., 2002. The Laurentide and Innuitian ice sheets during the Last Glacial Maximum. *Quaternary Science Reviews*, 21, 9-31.
- Dyke, A. S., 2004. An outline of North American Deglaciation with emphasis on central and northern Canada. In Ehlers, J. and Gibbard, P. L. (Eds): *Quaternary Glaciations – Extent and Chronology, Part II: North America, Vol. 2b*. Elsevier Science and Technology Books, 373-424.
- Ecoregions Working Group, 1989. *Ecoclimatic regions of Canada, first approximation*. Ecological Land Classification Series No. 23, Environment Canada, Ottawa.
- Engstrom, D. R. and Hansen, B. C. S., 1985. Postglacial vegetational change and soil development in southeastern Labrador as inferred from pollen and chemical stratigraphy. *Canadian Journal of Botany*, 63, 543-561.
- Fallu, M.-A., Allaire, N. and Pienitz, R., 2002. Distribution of freshwater diatoms in 64 Labrador (Canada) lakes: species-environment relationship along latitudinal gradients and reconstruction models for water colour and alkalinity. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 59(2), 329-349.
- Fallu, M.-A., Pienitz, R., Walker, I. R. and Lavoie, M., 2005. Paleolimnology of a shrub tundra lake and response of aquatic and terrestrial indicators to climatic change in Arctic Québec, Canada. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 215, 183-203.
- Fitzhugh, W., 1980. Preliminary report on the Torngat Archaeological Project. *Arctic*, 33(3), 585-606.
- Gauthier, M., 2013. Reconstitution paléolimnologique des conditions environnementales récentes (~300 ans) dans la région de Saglek, Labrador. M.Sc. Thesis, Université du Québec à Chicoutimi (UQAC), Chicoutimi, QC, Canada, 85pp.
- Godhe, A., Norén, F., Kuylenstierna, M., Ekberg, C. and Karlson, B., 2001. Relationship between planktonic dinoflagellate abundance, cysts recovered in sediment traps and environmental factors in the Gullmar Fjord, Sweden. *Journal of Plankton Research*, 23(9), 923-938.
- Grøsfjeld, K. and Harland, R., 2001. Distribution of modern dinoflagellate cysts from inshore areas along the coast of southern Norway. *Journal of Quaternary Science*, 16(7), 651-659.
- Grøsfjeld, K., Harland, R. and Howe, J., 2009. Dinoflagellate cyst assemblages inshore and offshore Svalbard reflecting their modern hydrography and climate. *Norwegian Journal of Geology*, 89, 121-134.
- Hald, M., Husum, K., Vorren, T. O., Grøsfjeld, K., Jensen, H. B. and Sharapova, A., 2003. Holocene climate in the subarctic fjord Malangen, northern Norway: a multi-proxy study. *Boreas*, 32(4), 543-559.
- Hare, F. K., 1959. A photo-reconnaissance of Labrador-Ungava. Geographical Branch Canada, Department of Mines and Technical Resources, Memoir 6.
- Hare, F. K. and Hay, J. E., 1974. The climate of Canada and Alaska. In Bryson, R. A. and Hare, F. K. (Eds): *World survey of climatology, Vol. II*. Elsevier Scientific Publishing Co., Amsterdam, 49-192.

- Harland, R., Nordberg, K. and Filipsson, H. L., 2006. Dinoflagellate cysts and hydrographical change in Gullmar Fjord, west coast of Sweden. *Science of the Total Environment*, 355, 204-231.
- Hay, M. B., Pienitz, R. and Thomson, R. E., 2003. Distribution of diatom surface sediment assemblages within Effingham Inlet, a temperate fjord on the West coast of Vancouver Island (Canada). *Marine Micropaleontology*, 48, 291-320.
- Hillaire-Marcel, C., de Vernal, A., Bilodeau, G. and Wu, G., 1994. Isotope stratigraphy, sedimentation rates, deep circulation, and carbonate events in the Labrador Sea during the last ~200 ka. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 31, 63-89.
- Howe, J. A., Harland, R., Cottier, F. R., Brand, T., Willis, K. J., Berge, J. R., Grøsfjeld, K. and Eriksson, A., 2010. Dinoflagellate cysts as proxies for palaeoceanographic conditions in Arctic fjords. Geological Society, London, Special Publication, 344, 61-74.
- Hulett, L. and Dwyer, E., 2003. Voisey's Bay Environmental Assessment Challenges and Successes. PDAC Convention, Toronto, March 2003.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2007. World Meteorological Organisation, Cambridge University Press.
- Jessen, C.A., Solignac, S., Nørgaard-Pedersen, N., Mikkelsen, N., Kuijpers, A. and Seidenkrantz, M.-S., 2011. Exotic pollen as an indicator of variable atmospheric circulation over the Labrador Sea region during the mid to late Holocene. *Journal of Quaternary Science*, 26(3), 286-296.
- Kahlmeyer, E., 2009. Comparison of the sedimentary record in three sub-arctic fjord systems in northern Labrador. B.Sc. Thesis, Memorial University of Newfoundland, St. John's, NL, Canada. 79 pp.
- Kaplan, M. R. and Wolfe, A. P., 2006. Spatial and temporal variability of Holocene temperature in the North Atlantic region. *Quaternary Research*, 65, 223-231.
- Kaufman, D. S., Ager, T. A., Anderson, N. J., Anderson, P. M., Andrews, J. T., Bartlein, P. J., Brubaker, L. B., Coats, L. L., Cwynar, L. C., Duvall, M. L., Dyke, A. S., Edwards, M. E., Eisner, W. R., Gajewski, K., Geirsdóttir, A., Hu, F. S., Jennings, A. E., Kaplan, M. R., Kerwin, M. W., Lozhkin, A. V., MacDonald, G. M., Miller, G. H., Mock, C. J., Oswald, W. W., Otto-Bliesner, B. L., Porinchu, D. F., Rühland, K., Smol, J. P., Steig, E. J. and Wolfe, B. B., 2004. Holocene thermal maximum in the western Arctic (0-180°W). *Quaternary Science Review*, 23, 529-560.
- Kumar, A. and Patterson, R. T., 2002. Dinoflagellate cyst assemblages from Effingham Inlet, Vancouver Island, British Columbia, Canada. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 180, 187-206.
- Kunz-Pirrung, M., 2001. Dinoflagellate cyst assemblages in surface sediments of the Laptev Sea region (Arctic Ocean) and their relationship to hydrographic conditions. *Journal of Quaternary Science*, 16(7), 637-649.
- Kuzyk, Z. A., Burgess, N. M., Stow, J. P. and Fox, G. A., 2003. Biological effects of marine PCB contamination on Black Guillemot Nestlings at Saglek, Labrador : Liver Biomarkers. *Ecotoxicology*, 12, 183-197.
- Kuzyk, Z. A., Hodson, P. V., Solomon, S. M. and Reimer, K. J., 2005a. Biological responses to PCB exposure in shorthorn sculpin from Saglek Bay, Labrador. *Science of the Total Environment*, 351-352, pp 285-300.
- Kuzyk, Z. A., Stow, J. P., Burgess, N. M., Solomon, S. M. and Reimer, K. J., 2005b. PCBs in sediments and the coastal food web near a local contaminant source in Saglek Bay, Labrador. *Science of the Total Environment*, 351-352, pp 264-284.
- Laing, T. E., Pienitz, R. and Payette, S., 2002. Evaluation of limnological responses to recent environmental change and caribou activity in the riviere George region, Northern Québec, Canada. *Arctic, Antarctic and Alpine Research*, 34(4), 454-464.

- Lajeunesse, P. and St-Onge, G., 2008. The subglacial origin of the Lake Agassiz-Ojibway final outburst flood. *Nature Geoscience*, 1, 184-188.
- Lamb, H. F., 1980. Late Quaternary vegetational history of southeastern Labrador. *Arctic and Alpine Research*, 12, 117-135.
- Lamb, H. F., 1984. Modern pollen spectra from Labrador and their use in reconstructing Holocene vegetational history. *The Journal of Ecology*, 72(1), 37-59.
- Levac, E. and de Vernal, A., 1997. Postglacial changes of terrestrial and marine environments along the Labrador coast: palynological evidence from cores 91-045-005 and 91-045-006, Cartwright Saddle. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 34, 1358-1365.
- Macpherson, J. B., 1982. Postglacial vegetational history of the eastern Avalon Peninsula, Newfoundland, and Holocene climatic change along the Eastern Canadian seaboard. *Géographie Physique et Quaternaire*, 36, 175-196.
- Meier, H. E. M., Höglund, A., Döscher, R., Andersson, H., Löptien, U. and Kjellström, E., 2011. Quality assessment of atmospheric surface fields over the Baltic Sea from an ensemble of regional climate model simulations with respect to ocean dynamics. *Oceanologia*, 53, 193-227.
- Mudie, P.J. and Rochon, A., 2001. Distribution of dinoflagellate cysts in the Canadian Arctic marine region. *Journal of Quaternary Science*, 16(7), 603-620.
- Music, B. and Caya, D., 2007. Evaluation of the hydrological cycle over the Mississippi River basin as simulated by the Canadian Regional Climate Model (CRCM). *Journal of Hydrometeorology*, 8, 969-988.
- Nakicenovic, N., Alcamo, J., Davis, G., de Vries, B., Fenhann, J., Gaffin, S., Gregory, K., Grübler, A., Jung, T. Y., Kram, T., Lebre La Rovere, E., Michaelis, L., Mori, S., Morita, T., Pepper, W., Pitcher, H., Price, L., Riahi, K., Roehrl, A., Rogner, H. H., Sankovski, A., Schlesinger, M., Shukla, P., Smith, S., Swart, R., van Rooijen, S., Victor, N. and Dadi, Z., 2000. Special report on emission scenarios. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Cambridge University Press, Cambridge, 612pp.
- Newell, J. P., 1992. The climate of the Labrador Sea in the Spring and Summer of 1816, and comparisons with modern analogue. In Harington, C. R. (Ed): *The year without a Summer? World Climate in 1816*. Natural Museum of Sciences, Ottawa, Canada, 245-254.
- Noble, B. F. and Bronson, J. E., 2005. Integrating human health into environmental impact assessment : case studies of Canada's Northern Mining Resource Sector. *Arctic*, 58(4), 395-405.
- PAGES 2k Consortium, 2013. Continental-scale temperature variability during the past two millennia. *Nature Geoscience*, 5, 339-347.
- Paterson, A. M., Betts-Piper, A. A., Smol, J. P. and Zeeb, B. A., 2003. Diatom and Chrysophyte algal response to long-term PCB contamination from a point-source in northern Labrador, Canada. *Water, Air, and Soil Pollution*, 145, 377-393.
- Patterson, R. T., Swindles, G. T., Roe, H. M., Kumar, A. and Prokoph, A., 2011. Dinoflagellate cyst-based reconstructions of mid to late-Holocene winter sea-surface temperature and productivity from an anoxic fjord in the NE Pacific Ocean. *Quaternary International*, 235, 13-25.
- Peltier, W., 2004. Global glacial isostasy and the surface of the ice-age Earth: the ICE-5G (VM2) model and GRACE. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 32, 111-149.
- Perren, B. B., Bradley, R. S. and Francus, P., 2003. Rapid lacustrine response to recent High Arctic warming: a diatom record from Sawtooth Lake, Ellesmere Island, Nunavut. *Arctic, Antarctic and Alpine Research*, 35(3), 271-278.

- Perren, B. B., Wolfe, A. P., Cooke, C. A., Kjaer, K. H., Mazzucchi, D. and Steig, E. J., 2012. Twentieth-century warming revives the world's northernmost lake. *Geology*, 40(11), 1003-1006.
- Pier, M. D., Betts-Piper, A. A., Knowlton, C. C., Zeeb, B. A. and Reimer, K. J., 2003. Redistribution of Polychlorinated Biphenyls from a local point source: terrestrial soil, freshwater sediment and vascular plants as indicators of the Halo Effect. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 35(3), 349-360.
- Plummer, D. A., Caya, D., Frigon, A., Cote, H., Giguère, M., Paquin, D., Biner, S., Harvey, R. and De Elia, R., 2006. Climate and climate change over North America as simulated by the Canadian RCM. *Journal of Climate*, 19, 3112-3132.
- Ponader, K., Pienitz, R., Vincent, W.F. and Gajewski, K., 2002. Limnological conditions in a subarctic lake (northern Quebec, Canada) during the late Holocene: analyses based on fossil diatoms. *Journal of Paleolimnology*, 27, 353-366.
- Radi, T., de Vernal, A. and Peyron, O., 2001. Relationships between dinoflagellate cyst assemblages in surface sediment and hydrographic conditions in the Bering and Chukchi seas. *Journal of Quaternary Science*, 16(7), 667-680.
- Radi, T. and de Vernal, A., 2008a. Last Glacial Maximum (LGM) primary productivity in the northern North Atlantic Ocean. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 45, 1299-1316.
- Radi, T. and de Vernal, A., 2008b. Dinocysts as proxy of primary productivity in mid-high latitudes of the Northern Hemisphere. *Marine Micropaleontology*, 68(1-2), 84-114.
- Renssen, H., Seppä, H., Heiri, O., Roche, D. M., Goosse, H. and Fichelet, T., 2009. The spatial and temporal complexity of the Holocene thermal maximum. *Nature Geoscience*, 2, 411-414.
- Richard, P.J.H., 1995. Le couvert végétal du Québec-Labrador il y a 6 000 ans BP : essai. *Géographie Physique et Quatenaire*, 49(1), 117-140.
- Richerol, T., Rochon, A., Blasco, S., Scott, D. B., Schell, T. M. and Bennett, R. J., 2008a. Distribution of dinoflagellate cysts in surface sediments of the Mackenzie Shelf and Amundsen Gulf, Beaufort Sea (Canada). *Journal of Marine Systems*, 74, 825-839.
- Richerol, T., Rochon, A., Blasco, S., Scott, D. B., Schell, T. M. and Bennett, R. J., 2008b. Evolution of paleo sea-surface conditions over the last 600 years in the Mackenzie Trough, Beaufort Sea (Canada). *Marine Micropaleontology*, 68, 6-20.
- Richerol, T., Pienitz, R. and Rochon, A., 2012. Modern dinoflagellate cyst assemblages in surface sediments of Nunatsiavut fjords (Labrador, Canada). *Marine Micropaleontology*, 88-89, 54-64.
- Ritchie, J. C., 1987. Postglacial vegetation of Canada: 5. Eastern Canada – fossil record and reconstruction. Cambridge University Press.
- Rochon, A., de Vernal, A., Turon, J.-L., Matthiessen, J. and Head, M.J., 1999. Distribution of recent dinoflagellate cysts in surface sediments from the North Atlantic Ocean and adjacent seas in relation to sea-surface parameters. Contribution Series Number 35, American Association of Stratigraphic Palynologists Foundation: Dallas, TX; 152pp.
- Rochon, A., 2009. The ecology and biological affinity of Arctic dinoflagellates and their paleoceanographical significance in the Canadian High Arctic. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 5, 6pp, doi:10.1088/1755-1307/5/1/012003.
- Rompkey, B., 2003. The Story of Labrador. McGill-Queen's University Press, 195 pp.
- Roncaglia, L. and Kuijpers, A., 2004. Palynofacies analysis and organic-walled dinoflagellate cysts in late-Holocene sediments from Igaliku Fjord, South Greenland. *The Holocene*, 14(2), 172-184.

- Rühland, K. and Smol, J. P., 2005. Diatom shifts as evidence for recent Subarctic warming in a remote tundra lake, NWT, Canada. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 226(1-2), 1-16.
- Sawada, M., Gajewski, K., de Vernal, A. and Richard, P., 1999. Comparison of marine and terrestrial Holocene climatic reconstructions from northeastern North America. *Holocene*, 9(3), 267-277.
- Short, S. K. and Nichols, H., 1977. Holocene pollen diagrams from subarctic Labrador-Ungava : Vegetational history and climatic change. *Arctic and Alpine Research*, 9, 265-290.
- Smol, J. P., Wolfe, A. P., Birks, H. J. B., Douglas, M. S. V., Jones, V. J., Korhola, A., Pienitz, R., Rühland, K., Sorvari, S., Antoniades, D., Brooks, S. J., Fallu, M.-A., Hughes, M., Keatley, B. E., Laing, T. E., Michelutti, N., Nazarova, L., Nyman, M., Paterson, A. M., Perren, B., Quinlan, R., Rautio, M., Saulnier-Talbot, E., Siitonen, S., Solovieva, N. and Weckström, J., 2005. Climate-driven regime shifts in the biological communities of arctic lakes. *Presentation of the National Academy of Sciences of the USA*, 102(12), 4397-4402.
- Solovieva, N., Jones, V. J., Nazarova, L., Brooks, S. J., Birks, H. J. B., Grytnes, J. A., Appleby, P. G., Kauppila, T., Kondratenok, B., Renberg, I. and Ponomarev, V., 2005. Palaeolimnological evidence for recent climatic change in lakes from the northern Urals, Arctic Russia. *Journal of Paleolimnology*, 33(4), 463-482.
- Sorvari, S., Korhola, A. and Thompson, R., 2002. Lake diatom response to recent Arctic warming in Finnish Lapland. *Global Change Biology*, 8(2), 171-181.
- Stroeve, J. C., Serreze, M. C., Holland, M. M., Kay, J. E., Malanik, J. and Barrett, A. P., 2011. The Arctic's rapidly shrinking sea ice cover: a research synthesis. *Climate Change*, online publication DOI 10.1007/s10584-011-0101-1.
- Taylor, F. J. R., Hoppenrath, M. and Saldarriaga, J. F., 2008. Dinoflagellate diversity and distribution. *Biodiversity and Conservation*, 17, 407-418.
- Thorsen, T. A. and Dale, B., 1997. Dinoflagellate cysts as indicators of pollution and past climate in a Norwegian fjord. *The Holocene*, 7(4), 433-446.
- Ullah, W., Beersing, A., Blouin, A., Wood, C. H. and Rodgers, A., 1992. *Water Resources Atlas of Newfoundland*. Water Resources Division - Department of Environment and Lands - Government of Newfoundland and Labrador, pages ii-80.
- Viau, A. E. and Gajewski, K., 2009. Reconstructing millennial-scale, regional paleoclimates of boreal Canada during the Holocene. *Journal of Climate*, 22(2), 316-320.
- Vilks, G. and Mudie, P. J., 1983. Evidence for a post-glacial paleoceanographic and paleoclimatic changes in Lake Melville, Labrador, Canada. *Arctic and Alpine Research*, 15, 307-320.
- Villeneuve, C. et Richard, F., 2005. *Vivre les changements climatiques – Quoi de neuf?* Éditions MultiMondes, Ste-Foy (Québec), Canada, ISBN 2-89544-074-3, 382pp.
- Voronina, E., Polyak, L., de Vernal, A. and Peyron, O., 2001. Holocene variations of sea-surface conditions in the southeastern Barents Sea, reconstructed from dinoflagellate cyst assemblages. *Journal of Quaternary Science*, 16(7), 717-726.
- Williams, J.W., Webb III, T., Richard, P.H. and Newby, P., 2000. Late Quaternary biomes of Canada and the eastern United States. *Journal of Biogeography*, 27, 585-607.