

1. Titre

Suivi temporel et spatial des masses d'eaux intermédiaires dans le Golfe de Gascogne et la Marge ibérique au cours du dernier cycle climatique

2. Unité de recherche

CNRS UMR 6112 LPG-BIAF Bio-Indicateurs Actuels et Fossiles Université d'Angers. 2, Boulevard Lavoisier, 49045 Angers Cedex, France

3. Encadrement et contacts

Directrice : Meryem Mojtahid (meryem.mojtahid@univ-angers.fr; 0241735002)

Co-encadrante : Christine Barras (christine.barras@univ-angers.fr; 0241735002)

4. Contexte, objectifs et intérêts scientifiques

Le Quaternaire récent est caractérisé par une succession de cycles glaciaire-interglaciaires qui sont rythmés par les changements périodiques de l'orbite terrestre autour de la terre. Cependant, de nombreuses études démontrent que l'insolation croissante en réponse à l'évolution des paramètres orbitaux (e.g., Milankovitch, 1941) ne peut pas expliquer à elle-seule les transitions relativement rapides des conditions glaciaires à interglaciaires du Pléistocène (i.e., les terminaisons ; e.g. Tzedakis et al., 2017). L'océan joue un rôle important dans le contrôle des mécanismes déclenchant et ponctuant les terminaisons (Rahmstorf, 2002; Denton et al., 2010). A titre d'exemple, les variations multi-millénaires dans l'intensité de la grande circulation méridionale de l'Atlantique en réponse aux apports épisodiques d'eaux douces provenant du recul des calottes glaciaires sont supposés jouer un rôle majeur dans le déclenchement des terminaisons dans l'hémisphère nord (HN) (Shakun et al., 2012).

La dernière déglaciation (Terminaison 1) a commencé dans l'HN il y a environ 19 ka (~ 19 - 10 ka BP, Clark et al., 2012) et marque la transition entre le Dernier Maximum Glaciaire (DMG) et l'Holocène. Au cours du DMG, de grandes calottes glaciaires couvraient de vastes zones de l'HN: l'inlandsis laurentien (LIS : Laurentide Ice Sheet) qui recouvrait une bonne partie du continent nord-américain et l'inlandsis Européen (EIS : European Ice Sheet) (e.g., Ehlers and Gibbard, 2004) (Fig. 1a). Au fur et à mesure que ces calottes se retiraient durant la Terminaison 1, de larges quantités d'icebergs et d'eaux douces ont été délivrées à l'Atlantique Nord (e.g., Clark et al., 2001; Denton et al., 2010). Cela a entraîné le ralentissement de l'AMOC pendant plusieurs millénaires, notamment durant deux événements froids entre ~ 18,2 et 14,7 ka BP (Heinrich Stadial 1; HS1) et entre ~ 12,7 et 11,7 ka BP (Younger Dryas, YD) (e.g., McManus et al., 2004; Hall et al., 2006). Au cours du DMG et de la Terminaison 1, l'AMOC a subi des changements majeurs. Plusieurs études suggèrent que l'eau profonde de l'Atlantique Nord (NADW) a été remplacée en partie par une masse d'eau froide et pauvre en éléments nutritifs, l'eau intermédiaire glaciaire de l'Atlantique Nord (GNAIW), dominante au-dessus de ~2000 m (e.g., Lynch-Stieglitz et al., 2007; Marson et al., 2015) (Fig. 1). La GNAIW surplombait une masse d'eau plus riche en nutriments et présente sous ~2000 m de profondeur, l'analogue glaciaire de l'eau de fond Antarctique (AABW) (Fig. 1). Au cours de HS1, un ralentissement significatif de l'intensité de l'AMOC a été suggéré (McManus et al., 2004). Depuis lors, des études plus récentes ont montré un schéma plus complexe soulignant l'importance des eaux intermédiaires dans ses réorganisations. En effet, des études ont suggéré que les eaux intermédiaires antarctiques (AAIW) ont pu pénétrer jusqu'aux hautes latitudes de l'Atlantique Nord pendant HS1 et le YD rivalisant avec la GNAIW entre ~1000 et 2500 m de profondeur (Rickaby and Elderfield, 2005; Thornalley et al., 2010). Une étude récente dans le Golfe de Gascogne (GdG) (MD99-2328 ; Fig. 1), montrant des eaux intermédiaires chaudes et bien oxygénées avec une courantologie active durant HS1,

plaiderait en faveur d'une contribution d'origine méridionale des eaux intermédiaires (Mojtahid et al., 2017).

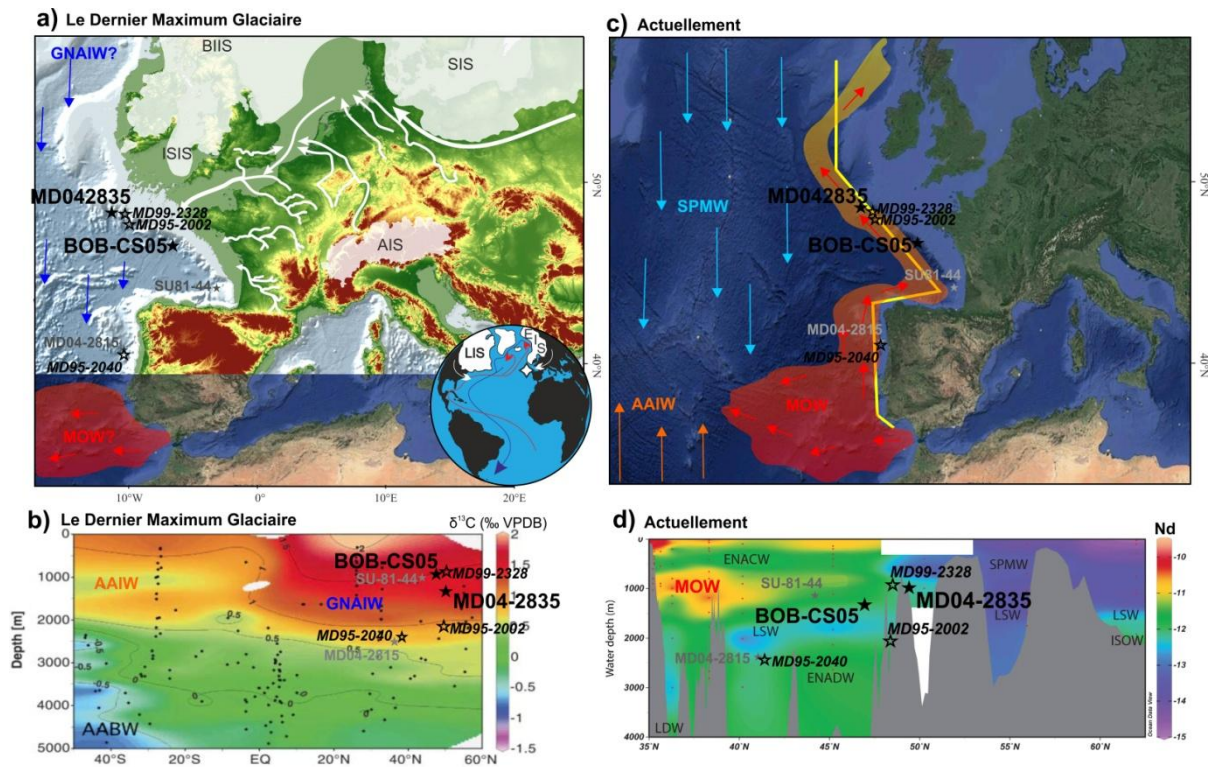


Figure 1: a) Figure modifiée de (Toucanne et al., 2015) montrant la paléogéographie en Europe occidentale avec l'extension maximale de la EIS (incluant la SIS et la BIIS) ainsi que le réseau hydrographique du paléofleuve Manche (flèche blanche) pendant le DMG. L'étendue hypothétique de la MOW (Mediterranean Outflow Waters) (en rouge) ainsi que l'influence de la GNAIW (flèches bleues) sont indiquées pour des profondeurs d'eaux intermédiaires (~1000 m). En bas à droite, un schéma simplifié de la circulation de l'océan Atlantique, avec les eaux de surface se dirigeant vers le nord (flèches rouges) et la voie de retour des eaux profondes (flèches bleues). ISIS : Irish Sea Ice Stream ; AIS : Alpine Ice Sheet ; b) La répartition du $\delta^{13}\text{C}$ des foraminifères benthiques dans l'Atlantique ouest et central pendant le DMG (Lynch-Stieglitz et al., 2007). ; c) Configuration actuelle de la marge du Golfe de Gascogne et de la péninsule Ibérique. L'étendue actuelle de la circulation de la MOW le long de l'Atlantique nord-est est indiquée (modifiée de (Iorga and Lozier, 1999)). Les flèches bleues, indiquant l'influence actuelle de la SPMW (Subpolar Mode Waters) et de la AAIW, sont données à titre indicatif pour des profondeurs d'eaux intermédiaires (~1000 m) d'après (Dubois-Dauphin et al., 2017). Le trait jaune indique le transect des mesures ϵNd de (Dubois-Dauphin et al., 2017) présenté dans la figure 1d ; d) Figure modifiée (Dubois-Dauphin et al., 2017) présentant les valeurs interpolées de ϵNd de l'eau de mer le long d'un transect latitudinal (trait jaune fig. 1c). LSW: Labrador Sea Water; ISOW: Iceland-Scotland Overflow Water; ENACW: East North Atlantic Central Water; LDW: Lower Deep Water; ENADW: East North Atlantic Deep Water. Le positionnement de nos carottes selon leurs latitudes et profondeurs respectives est donné à titre indicatif dans les figures b et d.

Afin de mieux cerner cette problématique, il apparaît donc nécessaire de renforcer les connaissances sur la dynamique des eaux intermédiaires et leur évolution au cours de la dernière déglaciation, particulièrement dans la partie orientale de l'Atlantique et à des latitudes moyennes où les données sont encore peu abondantes. Le Golfe de Gascogne ainsi que la marge ibérique constituent des zones clés à cause de l'influence simultanée de la LIS et de la EIS (e.g., Mojtahid et al., 2005; Eynaud et al., 2007; Toucanne et al., 2010) (Fig. 1).

Ce projet tentera donc de répondre à deux objectifs spécifiques :

- **Effectuer une reconstitution spatio-temporelle robuste des masses d'eaux intermédiaires (~ 500 - 2000 m de profondeur) dans les moyennes latitudes de l'Atlantique nord-est au cours des derniers ~30 ka.**
- **Comprendre le rôle de l'AMOC et plus particulièrement des masses d'eaux intermédiaires dans les oscillations climatiques rapides de la dernière déglaciation.**

5. Résumé du projet de thèse

Les tendances climatiques globales observées sur la fin du XX^{ème} siècle, ou leur projection pour la fin du XXI^{ème}, masquent une réalité complexe avec des structures régionales marquées et une intégration dans le temps de fluctuations qui trouvent souvent leurs origines dans les échanges entre l'hydrosphère, la cryosphère et l'atmosphère. Ces derniers demeurent mal compris, et notamment leur rôle dans le contrôle du climat. Dans ce contexte global, le projet de thèse se focalise sur les moyennes latitudes de l'Atlantique nord-est (Golfe de Gascogne et marge ibérique) et a pour but général de comprendre le rôle de la circulation océanique et notamment des masses d'eaux intermédiaires dans les oscillations climatiques rapides pendant la dernière période de fonte massive des calottes glaciaires. Cette reconstitution spatio-temporelle s'effectuera à l'aide d'une approche multiproxies (outils micropaléontologiques, géochimiques et sédimentologiques) des caractéristiques physiques et écologiques des masses d'eaux intermédiaires.

Méthodologie : La réalisation de ce projet s'appuiera sur les dernières avancées réalisées sur les traceurs paléocéanographiques de température, salinité, oxygénation, productivité (e.g., $\delta^{18}\text{O}$, Mg/Ca, Mn/Ca des foraminifères benthiques et planctoniques, assemblages des foraminifères et kystes de dinoflagellés, fonctions de transfert), pression environnementale (analyses XRF), courantologie (granulométrie, particulièrement l'indice « sortable silts »), et origine des masses d'eau (ϵNd , $\delta^{13}\text{C}$ dans les tests de foraminifères). Une approche expérimentale est également prévue sur la calibration en laboratoire du proxy Sr/Ca sur les foraminifères benthiques comme traceur de l'origine des masses d'eau. Ce projet est basé sur quatre carottes sédimentaires préalablement partiellement étudiées et sélectionnées sur la base de la qualité sédimentologique de leur enregistrement sur les périodes de temps étudiées et de leur positionnement géographique dans l'axe du trajet des eaux intermédiaires au niveau de la pente continentale (Fig. 1).

Profil de l'étudiant : Une expérience en paléocéanographie et en micropaléontologie, de préférence sur les foraminifères benthiques, est nécessaire. Le travail de détermination taxonomique sous loupe binoculaire demande méticulosité et rigueur. Une excellente pratique écrite et orale de l'Anglais est fortement recommandée.

Cadre financier de la thèse : Cette thèse s'insère dans le cadre de deux projets pilotés par M. Mojtahid (TANDEM : Téléconnexions entre les principaux modes de variabilité climatique des bassins Atlantique Nord-Est et Méditerranéen - Financement Région Pays de la Loire, 2019-2021, et STING : Suivi Temporel et spatial des masses d'eaux INtermédiaires dans le Golfe de Gascogne au cours du dernier cycle climatique - Financement INSU LEFE, 2019-2021).

6. Partenariat

Samuel TOUCANNE, chercheur IFREMER, UR Géosciences Marines, Laboratoire Géophysique et Enregistrements Sédimentaires, BP70, 29280 Plouzaé, France

Frédérique EYNAUD, Maître de conférences, UMR CNRS 5805 EPOC (Environnements et Paléoenvironnements Océaniques et Continentaux), Université de Bordeaux, France

Aurélie Penaud, Maître de conférences, Université de Brest et Laboratoire Géosciences Océan, CNRS UMR 6538, Institut Universitaire Européen de la Mer, France

Elisabeth MICHEL, CR, Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (LSCE-IPSL), Domaine du CNRS, Bât.12, 91198 Gif-sur-Yvette, France

7. Références bibliographiques

- Clark, P.U., Marshall, S.J., Clarke, G.K.C., Hostetler, S.W., Licciardi, J.M., Teller, J.T., 2001. Freshwater Forcing of Abrupt Climate Change During the Last Glaciation. *Science* 293, 283–287. <https://doi.org/10.1126/science.1062517>
- Clark, P.U., Shakun, J.D., Baker, P.A., Bartlein, P.J., Brewer, S., Brook, E., Carlson, A.E., Cheng, H., Kaufman, D.S., Liu, Z., Marchitto, T.M., Mix, A.C., Morrill, C., Otto-Bliesner, B.L., Pahnke, K., Russell, J.M., Whitlock, C., Adkins, J.F., Blois, J.L., Clark, J., Colman, S.M., Curry, W.B., Flower, B.P., He, F., Johnson, T.C., Lynch-Stieglitz, J., Markgraf, V., McManus, J., Mitrovica, J.X., Moreno, P.I., Williams, J.W., 2012. Global climate evolution during the last deglaciation. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 109, E1134–E1142. <https://doi.org/10.1073/pnas.1116619109>
- Denton, G.H., Anderson, R.F., Toggweiler, J.R., Edwards, R.L., Schaefer, J.M., Putnam, A.E., 2010. The Last Glacial Termination. *Science* 328, 1652–1656. <https://doi.org/10.1126/science.1184119>
- Dubois-Dauphin, Q., Colin, C., Bonneau, L., Montagna, P., Wu, Q., Van Rooij, D., Reverdin, G., Douville, E., Thil, F., Waldner, A., Frank, N., 2017. Fingerprinting Northeast Atlantic water masses using neodymium isotopes. *Geochim. Cosmochim. Acta* 210, 267–288. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2017.04.002>
- Ehlers, J., Gibbard, P.L., 2004. Quaternary Glaciations—Extent and Chronology. Part 2: North America. *Dev. Quat. Sci.* 2.
- Eynaud, F., Zaragosi, S., Scourse, J.D., Mojtahid, M., Bourillet, J.F., Hall, I.R., Penaud, A., Locascio, M., Reijonen, A., 2007. Deglacial laminated facies on the NW European continental margin: The hydrographic significance of British-Irish Ice Sheet deglaciation and Fleuve Manche paleoriver discharges: CONTINENTAL MARGIN LAMINATED FACIES. *Geochem. Geophys. Geosystems* 8, Q06019. <https://doi.org/10.1029/2006GC001496>
- Hall, I.R., Moran, S.B., Zahn, R., Knutz, P.C., Shen, C.-C., Edwards, R.L., 2006. Accelerated drawdown of meridional overturning in the late-glacial Atlantic triggered by transient pre-H event freshwater perturbation. *Geophys. Res. Lett.* 33, L16616. <https://doi.org/10.1029/2006GL026239>
- Iorga, M.C., Lozier, M.S., 1999. Signatures of the Mediterranean outflow from a North Atlantic climatology: 1. Salinity and density fields. *J. Geophys. Res. Oceans* 104, 25985–26009. <https://doi.org/10.1029/1999JC900115>
- Lynch-Stieglitz, J., Adkins, J.F., Curry, W.B., Dokken, T., Hall, I.R., Herguera, J.C., Hirschi, J.J.-M., Ivanova, E.V., Kissel, C., Marchal, O., Marchitto, T.M., McCave, I.N., McManus, J.F., Mulitza, S., Ninnemann, U., Peeters, F., Yu, E.-F., Zahn, R., 2007. Atlantic Meridional Overturning Circulation During the Last Glacial Maximum. *Science* 316, 66–69. <https://doi.org/10.1126/science.1137127>
- Marson, J.M., Mysak, L.A., Mata, M.M., Wainer, I., 2015. Evolution of the deep Atlantic water masses since the last glacial maximum based on a transient run of NCAR-CCSM3. *Clim. Dyn.* 1–13. <https://doi.org/10.1007/s00382-015-2876-7>
- McManus, J.F., Francois, R., Gherardi, J.-M., Keigwin, L.D., Brown-Leger, S., 2004. Collapse and rapid resumption of Atlantic meridional circulation linked to deglacial climate changes. *Nature* 428, 834–837. <https://doi.org/10.1038/nature02494>
- Milankovitch, M., 1941. Canon of Insolation and the Ice-Age Problem (in German). Special Publications of the Royal Serbian Academy 132, 484 pp.
- Mojtahid, M., Eynaud, F., Zaragosi, S., Scourse, J., Bourillet, J.-F., Garlan, T., 2005. Palaeoclimatology and palaeohydrography of the glacial stages on Celtic and Armorican margins over the last 360 000 yrs. *Mar. Geol.* 224, 57–82. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2005.07.007>
- Mojtahid, M., Toucanne, S., Fentimen, R., Barras, C., Le Houedec, S., Soulet, G., Bourillet, J.-F., Michel, E., 2017. Changes in northeast Atlantic hydrology during Termination 1: Insights from Celtic margin's benthic foraminifera. *Quat. Sci. Rev.* 175, 45–59. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2017.09.003>
- Rahmstorf, S., 2002. Ocean circulation and climate during the past 120,000 years. *Nature* 419, 207–214. <https://doi.org/10.1038/nature01090>
- Rickaby, R.E., Elderfield, H., 2005. Benthic (*C. wuellerstorfi*) d18O, d13C and Cd/Ca in sediment core NEAP 4K across the last deglaciation. *Suppl. Rickaby REM Elderfield H 2005 Evid. High-Latit. N. Atl. Var.*

- Antarct. Intermed. Water Flow Last Deglaciation *Geochem. Geophys. Geosystems* 65 Q05001
Doi10.1029/2004GC000858. <https://doi.org/10.1594/PANGAEA.832162>
- Rogerson, M., Rohling, E.J., Bigg, G.R., Ramirez, J., 2012. Paleoceanography of the Atlantic-Mediterranean exchange: Overview and first quantitative assessment of climatic forcing. *Rev. Geophys.* 50, RG2003. <https://doi.org/10.1029/2011RG000376>
- Rohling, E.J., Bryden, H.L., 1994. Estimating past changes in the eastern Mediterranean freshwater budget, using reconstructions of sea level and hydrography. *Proc. K. Ned. Akad. Van Wet.* 97, 201–217.
- Shakun, J.D., Clark, P.U., He, F., Marcott, S.A., Mix, A.C., Liu, Z., Otto-Bliesner, B., Schmittner, A., Bard, E., 2012. Global warming preceded by increasing carbon dioxide concentrations during the last deglaciation. *Nature* 484, 49–54. <https://doi.org/10.1038/nature10915>
- Thornalley, D.J.R., Elderfield, H., McCave, I.N., 2011. Reconstructing North Atlantic deglacial surface hydrography and its link to the Atlantic overturning circulation. *Glob. Planet. Change* 79, 163–175. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2010.06.003>
- Thornalley, D.J.R., Elderfield, H., McCave, I.N., 2010. Intermediate and deep water paleoceanography of the northern North Atlantic over the past 21,000 years. *Paleoceanography* 25, PA1211. <https://doi.org/10.1029/2009PA001833>
- Toucanne, S., Soulet, G., Freslon, N., Silva Jacinto, R., Dennielou, B., Zaragosi, S., Eynaud, F., Bourillet, J.-F., Bayon, G., 2015. Millennial-scale fluctuations of the European Ice Sheet at the end of the last glacial, and their potential impact on global climate. *Quat. Sci. Rev.* 123, 113–133. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2015.06.010>
- Toucanne, S., Zaragosi, S., Bourillet, J.-F., Marieu, V., Cremer, M., Kageyama, M., Van Vliet-Lanoe, B., Eynaud, F., Turon, J.-L., Gibbard, P.L., 2010. The first estimation of Fleuve Manche palaeoriver discharge during the last deglaciation: Evidence for Fennoscandian ice sheet meltwater flow in the English Channel ca 20-18 ka ago. *Earth Planet. Sci. Lett.* 290, 459–473. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2009.12.050>
- Tzedakis, P.C., Crucifix, M., Mitsui, T., Wolff, E.W., 2017. A simple rule to determine which insolation cycles lead to interglacials. *Nature* 542, 427–432. <https://doi.org/10.1038/nature21364>
- van Aken, H.M., 2000. The hydrography of the mid-latitude Northeast Atlantic Ocean: II: The intermediate water masses. *Deep Sea Res. Part Oceanogr. Res. Pap.* 47, 789–824. [https://doi.org/10.1016/S0967-0637\(99\)00112-0](https://doi.org/10.1016/S0967-0637(99)00112-0)