

Foraminifères benthiques de haute mer sur un site de déchets industriels de bauxite dans le canyon Cassidaigne (nord-ouest de la Méditerranée): dix mois après l'arrêt du déversement de boue rouge

Comptes Rendus Géosciences 352 (2020) 87 – 101

Christophe Fontanier ; Briony Mamo ; Déborah Mille ; Pauline Duros ; Olivier Herlory

(traduction post-éditée par N. Bacaër, suggestions d'amélioration : nicolas.bacaer@ird.fr)



Résumé

Lors d'une étude environnementale réalisée à l'automne 2016, des faunes foraminiférales benthiques vivantes (colorées) ont été étudiées dans 16 stations échantillonnées dans le canyon Cassidaigne (nord-ouest de la mer Méditerranée) et ses environs et situées entre 265 et 2500 m de profondeur. Pendant de nombreuses décennies, des résidus de bauxite industrielle de boue rouge se sont drainés dans le canyon via un tuyau sous-marin, provoquant des perturbations physiques et une contamination chimique. En janvier 2016, l'élimination des déchets solides a cessé et a été remplacée par le déversement d'un effluent liquide de faible densité. Nos observations écologiques à la station de 725 m de profondeur la plus proche de la conduite sous-marine du canyon Cassidaigne montrent la plus forte concentration d'espèces opportunistes et une diversité benthique fortement altérée. Aux quinze autres stations, les stocks permanents de foraminifères et la diversité simple diminuent avec la diminution de l'apport alimentaire au fond marin et l'augmentation de la profondeur de l'eau. Là, la composition des foraminifères avec une contribution mineure d'espèces tolérantes au stress fait écho aux modèles méso-oligotrophes globaux d'un écosystème relativement stable.

1. Introduction

Les foraminifères des grands fonds (Eukaryota, Rhizaria) constituent un groupe écologique important de la méiofaune benthique (voir la revue de [Gooday 2003 ; Zeppilli et al. 2015]). En milieu naturel, leurs schémas fauniques (stocks sur pied, diversité, microhabitat) sont contrôlés par de nombreux paramètres physico-chimiques. Le flux de matière organique atteignant le fond marin est l'une de leurs contraintes écologiques les plus importantes [Gooday 2003]. Le flux de matière organique agit indirectement comme un facteur écologique limitant lorsqu'il induit une hypoxie temporaire ou à long terme dans les sédiments ou dans les eaux de fond Fontanier et al. [2014], Gooday et al. [2000], Kurbjewiet coll. [2000], Schumacher et al. [2007]. Les écoulements gravimétriques de sédiments passant le long des canyons sous-marins actifs peuvent fournir des détritiques organiques et des particules inorganiques à l'océan profond. Les faunes foraminiférales vivant dans ces habitats naturellement perturbés sont caractérisées soit par différents stades de colonisation survenant après des perturbations physiques (ex. Turbidité), soit par des phases d'équilibre liées à l'accumulation progressive de matière organique (ex: eutrophisation) [Duros et al. 2011 , 2013 ; Fontanier et coll. 2008 a , b ; Hess et Jorissen 2009 ; Hess et coll. 2005; Koho et coll. 2007 , 2008]. En raison de leur cycle de vie relativement court, les changements environnementaux peuvent être rapidement enregistrés via un changement d'assemblage foraminiféral. Par conséquent, les foraminifères sont des candidats idéaux pour la surveillance du stress environnemental lié aux activités humaines Schönfeld et al. [2012], Zeppilli et al. [2015].

Entre 1967 et 2015, des résidus de bauxite (notamment de la boue rouge) ont été déversés dans le Canyon Cassidaigne par la raffinerie d'alumine de Gardanne (Sud-Est de la France) (voir revue de Dauvin [2010]).

La boue rouge de bauxite (une combinaison d'effluent liquide et de solide résiduel) a été évacuée par un tuyau sous-marin et rejetée à une profondeur d'eau de 320 m, à environ 8 km au large de la côte. Ce matériau sédimentaire s'est répandu le long de l'axe du canyon Cassidaigne et sur ses flancs latéraux à de grandes profondeurs (> 2000 m) [Dauvin 2010 ; Fabri et coll. 2013 ; Fontanier et coll. 2012 , 2015]. La couverture totale de boue rouge rejetée a été estimée à plus de 900 km². En janvier 2016, la dispersion des boues rouges a cessé et les déchets industriels sont désormais tamisés et la fraction solide stockée à terre (voir <https://alteo-environnement-gardanne.fr/-Fabrication-et-stockage> pour plus d'informations). Depuis, seuls les effluents liquides résiduels ont été rejetés de la sortie du pipeline dans le canyon Cassidaigne. Ce liquide, caractérisé par une densité inférieure à l'eau de mer ambiante, se dilue au fur et à mesure qu'il remonte la colonne d'eau.

Des études environnementales ont été menées au cours des cinq dernières décennies afin d'élucider l'impact de la boue rouge sur le métazoaire benthos des grands fonds [Bourcier 1969 ; Bourcier et Zibrowius 1973 ; Bourcier et coll. 1993 ; Fabri et coll. 2013 ; Vitiello et Vivier 1974 ; Vivier 1978 a , b]. Ces enquêtes ont montré que, près de la sortie de la canalisation, la contamination hydro-sédimentaire liée à l'inondation de matière boueuse rouge (c.-à-d. Taux de sédimentation élevé) empêchait la méiofaune benthique et la macrofaune le long de l'axe du canyon. Dans les zones environnantes, la macrofaune normale avec des suspensions et des dépôts nourriciers a pu se développer, malgré la présence d'une fine couche de boue rouge. Fontanier et coll. [2012] a mené une étude écologique des faunes foraminiférales de deux stations situées à 725 m et 1528 m le long de l'axe du canyon Cassidaigne (nord-ouest de la Méditerranée) (croisière ESSROV, octobre 2011). Sur les deux sites étudiés, les sédiments étaient fortement contaminés par le fer, le titane, le vanadium et le chrome par rapport aux sédiments hémipélagiques normaux. À la station moins profonde située près de la sortie du tuyau, la communauté vivante de foraminifères benthiques était caractérisée par une très faible diversité (seulement trois espèces) et par la dominance inhabituelle de *Gyroidina umbonata* (Silvestri, 1898) et *Bulimina marginata* d'Orbigny, 1826. La perturbation physique liée au dépôt de boue rouge était probablement le principal paramètre hydro-sédimentaire empêchant l'établissement d'une faune diversifiée. À l'inverse, la faune foraminiférale vivante du site plus profond était typique des conditions oligo-mésotrophes régnant dans les milieux naturels. Là, les résidus de bauxite n'avaient aucun impact environnemental sur les faunes foraminiférales. Près d'un an plus tard (septembre 2012), quatorze stations situées entre 288 et 2432 m de profondeur d'eau à une proximité variable de la sortie du tuyau ont été échantillonnées [Fontanier et al. 2015]. En raison d'un carottage plus étendu, Fontanier et al. [2015] a évalué l'impact de la dispersion de la boue rouge dans le canyons Cassidaigne, non le long de son axe mais sur ses flancs, et sa zone environnante (canyons adjacents et bassin profond). Des dépôts de boue rouge ont été observés dans les canyons Cassidaigne et Planier jusqu'à ~2000 m (zone de couverture ~900 km²). La diversité, la composition et les schémas de stocks permanents des faunes foraminiférales de cette zone représentaient des assemblages principalement limités par des conditions méso-oligotrophes globales. La réduction des détritiques organiques sédimentaires avec une profondeur d'eau variable et la contrainte écologique déterminée par les courants de fond ont généré des changements graduels dans les communautés foraminiférales, quelle que soit la présence de boue rouge. Par rapport à l'axe du canyon étudié par Fontanier et al. [2012], il n'y avait pas d'impact environnemental évident des résidus de bauxite dispersés sur la biodiversité benthique lors de la période d'échantillonnage (septembre 2012).

En septembre et octobre 2016, quatre ans après la dernière enquête foraminiférale dans le canyon de Cassidaigne et ses environs (septembre 2012), et dix mois après l'arrêt du déversement de boue rouge (janvier 2016), des prélèvements de carottes plus étendus que ceux précédemment réalisés par Fontanier et coll. [2012 , 2015] ont été collectés dans le cadre d'une enquête statutaire. Les communautés de foraminifères ont été échantillonnées à 16 stations situées entre 265 et 2 500 m avec une proximité variable de la sortie du tuyau (figure 1 ; tableau 1). La plupart de ces sites se trouvent dans la zone géographique où des résidus historiques de bauxite ont été précédemment détectés [Dauvin 2010 ; Fontanier et coll.2012 , 2015]. L'objectif principal de notre étude est de déterminer les schémas écologiques (indices de diversité et composition faunique) des milieux benthiques quelques mois après l'arrêt de la dispersion des déchets solides dans le canyon Cassidaigne.

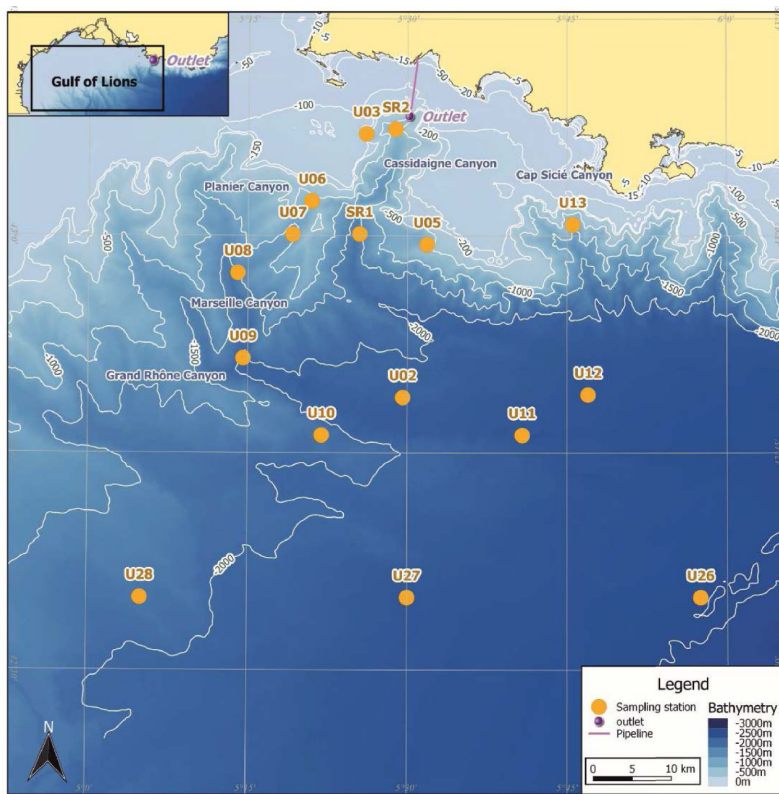


Figure 1. Bathymétrie, zone d'étude et localisation des 16 stations échantillonnées lors de la campagne océanographique 2016 (automne 2016).

Tableau 1. Profondeur de l'eau, coordonnées et paramètres physiographiques de toutes les stations échantillonnées lors de la croisière océanographique 2016 (automne 2016)

Station	Date d'échantillonnage	Latitude	Longitude	Profondeur (m)	Paramètres	Distance de la sortie du pipeline (km)	Détection visuelle des dépôts de boue rouge
U03	31/08/2016	43° 07.05' N	05° 26,11' E	292	Tête du canyon de Cassidaigne	5.9	Couche superficielle brun rougeâtre (plusieurs cm)
SR2	02/09/2016	43° 07.31' N	05° 28,88' E	747	Axe du canyon Cassidaigne	2.4	Sédiment brun rougeâtre
U05	03/09/2016	42° 59.40' N	05° 31,85' E	751	Flanc Est du Canyon Cassidaigne	17.3	Non
SR1	02/09/2016	43° 00.13' N	05° 25,49' E	1553	Axe du canyon Cassidaigne	16.3	Couche superficielle brun rougeâtre (plusieurs cm)
U13	22/09/2016	43° 00.78' N	05° 45,54' E	952	Branche ouest du canyon du Cap-Sicié	25	Non
U06	01/09/2016	43° 02.34' N	05° 21,00' E	605	Tête de la branche Est du Planier Canyon	16.6	Couche superficielle brun rougeâtre (plusieurs cm)
U07	01/09/2016	43° 00.09' N	05° 19,21' E	1056	Branche orientale du canyon du Planier	21.2	Couche superficielle brun rougeâtre (plusieurs cm)
U08	02/10/2016	42° 57.43' N	05° 14,04' E	1530	Axe du Planier Canyon	29.7	Couche superficielle brun rougeâtre (plusieurs cm)
U09	01/10/2016	42° 51.53' N	05° 14,58' E	1968	Axe du Planier Canyon	37.5	Couche superficielle brun rougeâtre (plusieurs cm)
U10	30/09/2016	42° 49.22' N	05° 21,95' E	1800	Connexion entre les canyons de Marseille et de Planier	42.3	Taches brun rougeâtre à la surface des sédiments
U02	30/09/2016	42° 48.83' N	05° 29,58' E	2100	Connexion entre les canyons de Marseille et de Planier	36	Taches brun rougeâtre à la surface des sédiments
U11	03/09/2016	42° 46.22' N	05° 40,80' E	2222	Liaison entre Marseille / Planier et Canyons de Cassidaigne	43.3	Couche superficielle brun rougeâtre (cm)
U12	07/10/2016	42° 49.01' N	05° 46,97' E	2290	Liaison entre Marseille / Planier et Canyons de Cassidaigne	42.3	Taches brun rougeâtre à la surface des sédiments
U28	04/10/2016	42° 35.00' N	05° 05,00' E	1758	Pente inférieure entre les canyons du Petit Rhône et du Grand Rhône	72	Non
U27	02/10/2016	42° 35.00' N	05° 30,00' E	2250	Bassin profond	61.6	Non
U26	07/10/2016	42° 35.00' N	05° 57,50' E	2432	Bassin profond	72	Non

2. Zone d'étude

Le canyon Cassidaigne jouxte l'est du golfe du Lion et la mer Ligure (nord-ouest de la Méditerranée) (figure 1 encart). La tête de canyon de 200 m de profondeur borde la baie de Cassis à une distance de seulement 7 km de la côte et se caractérise par un axe étroit de canyon (1 km de largeur) (Figure 1).

Le Courant Nord (NC), qui forme la branche nord du Courant cyclonique Liguro-Provençal (LPC), suit la marge continentale de la côte provençale (France) à la côte de la Catalogne (Espagne) [Béthoux et Prieur 1983 ; Millot 1990]. Le CN détermine les schémas généraux de circulation des eaux de surface. Sous les eaux de surface (> 200 m), se répand l'eau intermédiaire levantine modifiée (LIW), qui se caractérise par un maximum de salinité (~38,5) et un maximum de température relative (> 13°C). Les eaux profondes de la Méditerranée occidentale (WMDW) se trouvent sous le LIW avec une limite diffusive à 500–800 m [Béthoux et Prieur 1983 ; Béthoux et coll. 2002]. Il se caractérise généralement par une température (~13°C) et une salinité assez homogènes (38,40–38,45) [Béthoux et Prieur 1983 ; Béthoux et coll. 2002].

Notre étude actuelle est basée sur des carottes de sédiments collectées à bord du N / R Félix lors de la campagne océanographique de suivi, qui a eu lieu en septembre et octobre 2016. Seize stations ont été échantillonnées dans et autour du canyon Cassidaigne (tableau 1 ; figure 1). Quatorze de ces stations, commençant par «U», ont déjà été étudiées par Fontanier et al. [2015] et les deux stations restantes, SR1 et SR2, correspondent approximativement aux sites d'échantillonnage étudiés par Fontanier et al. [2012]. Les stations U03 (292 m) et U05 (751 m) sont situées à la tête et sur le flanc est du canyon Cassidaigne. Les stations SR2 (747 m) et SR1 (1553 m) sont situées le long de l'axe du canyon Cassidaigne. Les stations U06 – U09 se trouvent le long du canyon Planier entre ~600–2000 m de profondeur d'eau. Les deux stations U02 et U10 sont situées le long de la vallée profonde où convergent les canyons affluents de Marseille et du Planier (> 1800 m). Les U11 et U12 (> 2200 m) sont sous l'influence du système Marseille / Planier / Cassidaigne Canyon. U28, U27 et U26 représentent un transect bathymétrique de l'interfluve entre les canyons du Petit Rhône et du Grand Rhône (~1750 m) vers le bassin profond (~2400 m). La station U13 est située dans la branche ouest du canyon du Cap-Sicié (France), à moins de 7 km de la côte et à environ 25 km au sud-est de la sortie de la canalisation.

Conformément aux études précédentes de Fontanier et al. [2012, 2015], des sédiments de surface brun rougeâtre ont été observés dans la plupart des stations, fournissant (avec d'autres preuves physico-chimiques) des preuves qualitatives concernant la dispersion géographique et historique des résidus de bauxite (tableau 1 ; [CREOCEAN 2018]). Seules les stations U05 (725 m), U13 (958 m), U28 (1758 m), U27 (2250 m) et U26 (2432 m) n'étaient pas contaminées par des dépôts de boue rouge. Sédiments de surface (intervalle de 0 à 4 cm) La teneur en titane (Ti), considérée comme un proxy géochimique de la dispersion de la boue rouge [Dauvin 2010], correspond relativement bien aux observations visuelles de l'interface sédiment-eau (Figure 2). Des valeurs de Ti extraordinairement élevées ont été enregistrées à la station SR2 (~32 000 µg/g DW) et dans une moindre mesure à la station SR1 (~20 500 µg/g DW) confirmant que les résidus de bauxite s'accumulaient préférentiellement le long de l'axe du canyon Cassidaigne. À titre de comparaison, la teneur en Ti de la boue rouge dispersée du pipeline avant janvier 2016 était de ~70 000 µg/g DW [SAFEGE 2011]. Les couches néphéloïdes et les écoulements gravimétriques de sédiments sont considérés comme les principaux processus hydro-sédimentaires responsables du transfert du matériau dérivé de la bauxite de la sortie du pipeline le long de l'axe du canyon Cassidaigne [Dauvin 2010 ; Fabri et coll. 2013 ; Fontanier et coll. 2012, 2015]. Des valeurs de Ti modérées à élevées ont été enregistrées dans la plupart des autres stations dans les canyons adjacents (entre 3300 et 4400 µg/g DW) même à de grandes profondeurs (~5100 µg/g DW à la station U10, 1800 m). Comme suggéré par Fontanier et al. [2015], les courants ascendants et descendants épisodiquement forts de la région, associés à un transfert efficace de sédiments par la gravité et les écoulements de suspension, pourraient déclencher une large couverture spatiale des sédiments naturels et chargés de Ti. En revanche, les échantillons des stations U05 (725 m) et U13 (958 m) ont donné une teneur en Ti relativement faible (respectivement ~3400 et ~3100 µg/g DW) (Figure 2) [Fontanier et al. 2012, 2015]. Comme déjà discuté dans Fontanier et al. [2015], les deux stations U05 et U13 sont situées dans des zones de canyons non accessibles par les résidus de bauxite (Figure 2). Les stations U11 (2222 m), U12 (2290 m) et U02 (2100 m) situées au niveau des liaisons plus profondes entre les canyons de Marseille, Planier et Cassidaigne, présentent également une faible teneur en Ti (entre 2700 et 3100 µg/g DW). Les sites U28, U27 et U26, situés à plus de 60 km de la sortie du pipeline à des profondeurs supérieures à 1700 m, présentent logiquement une teneur en Ti proche des niveaux de fond naturels (<2400 µg/g DW), un ordre de grandeur inférieur à la station SR2 fortement contaminée.

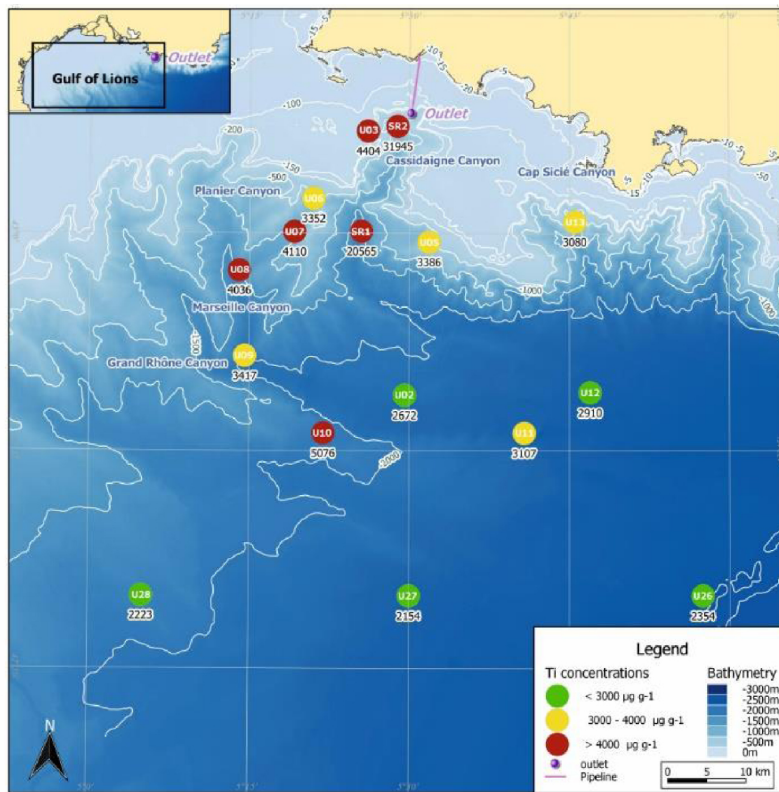


Figure 2. Teneur en titane (Ti) dans les sédiments de surface (intervalle de 0 à 4 cm) recueillis à 16 stations (croisière océanographique 2016, automne 2016). La teneur en Ti est indiquée à l'aide d'un code couleur à 3 classes). Ces données sont extraites du rapport d'enquête de CREOCEAN (CREOCEAN, 2018).

3. Matériel et méthodes

Cette étude constitue un instantané des conditions écologiques prévalant en septembre / octobre 2016 dans le canyon Cassidaigne et ses environs. De nombreux travaux sur les foraminifères vivants ont été réalisés dans le golfe du Lion et dans la mer Ligure avant notre étude actuelle [Bizon et Bizon 1984 ; Contreras-Rosales et coll. 2012 ; De Rijk et coll. 2000 ; Fontanier et coll. 2008 a , b , 2015 ; Goineau et coll. 2012 , 2011 ; Schmiedl et coll. 2000]. Ils fournissent des informations fiables sur ce à quoi nous pouvons nous attendre en termes d'abondance et de distribution naturelles des foraminifères dans la région. De plus, une réponse foraminiférale à la pollution par la boue rouge dans l'axe du canyon Cassidaigne a déjà été documentée par Fontanier et al. [2012]. Ce travail et d'autres articles récents concernant la recolonisation des foraminifères dans les canyons [Duros et al. 2011 , 2013 ; Hess et Jorissen 2009 ; Hess et coll. 2005] fournissent une base fiable pour évaluer l'impact potentiel de la dispersion de la boue rouge sur la biodiversité foraminiférale et sa résilience potentielle depuis janvier 2016, date à laquelle la dispersion de la boue rouge a cessé).

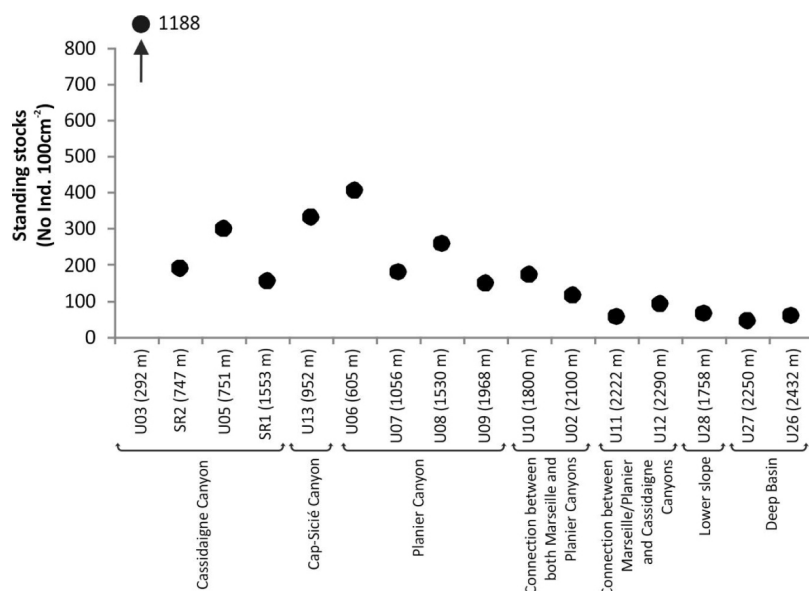


Figure 3. Stocks sur pied (No. Ind. 100 cm⁻²) de faunes foraminiférales vivantes (colorées) aux 16 stations étudiées. Les stations sont disposées à la fois selon le réglage physiographique et la profondeur croissante.

3.1. Échantillons

Les échantillons de sédiments ont été prélevés avec un carottier multiple de type Barnett équipé de tubes en plexiglas (9,3 mm de diamètre interne, surface de 68 cm²) [Barnett et al. 1984]. Le carottier multiple a permis d'échantillonner les centimètres les plus élevés de la colonne de sédiments, les eaux de fond sus-jacentes et une interface sédiments-eau relativement intacte. Il a été déployé une fois à chaque station. Une carotte de chaque site a été utilisée pour cette étude foraminiférale. Les carottes ont été coupées horizontalement tous les 0,5 cm à partir de l'interface sédiment-eau (SWI) jusqu'à 2 cm. En raison de contraintes météorologiques (forte houle), le multicoreur n'a pas pu être déployé aux stations U13 (952 m), U12 (2290 m) et U26 (2432 m). Là, des échantillons de sédiments ont été prélevés avec un carottier USNEL (surface de 2500 cm²). Un tube en plexiglas (diamètre interne 9,3 cm, surface de 68 cm²) a été utilisé pour sous-échantillonner une carotte de sédiment. Les 2 cm supérieurs ont été coupés de manière similaire aux carottes Barnett pour les analyses foraminiférales. Tous les biais méthodologiques potentiels liés à l'échantillonnage des foraminifères avec un carottier ont été discutés précédemment par Fontanier et al. [2015]. Pour comprendre la variabilité globale de l'écosystème, des triplicats sont recommandés sur chaque site d'échantillonnage [Schönfeld et al. 2012]. Malgré cela, la plupart des articles écologiques étudiant les communautés de foraminifères vivant en haute mer (colorées) n'utilisent qu'un seul noyau par site. Pour faciliter des comparaisons efficaces entre des travaux antérieurs de ce type, nous n'avons également utilisé qu'un seul noyau par site. Néanmoins, les lecteurs doivent considérer nos observations et interprétations avec soin, car elles peuvent être biaisées par une variabilité spatiale potentielle (échelle cm à m) que nous ne pouvons pas entièrement expliquer avec nos ensembles de données.

3.2. Analyse foraminiférale benthique

À bord, des échantillons de sédiments dédiés à l'étude des foraminifères ont été transférés dans des flacons de 250 cm³ remplis d'éthanol à 95% contenant 2 g/L de colorant Rose Bengale, couramment utilisé pour identifier les foraminifères vivants [Murray et Bowser 2000 ; Walton 1952]. Tous les échantillons ont été secoués doucement pendant plusieurs minutes pour obtenir un mélange homogène. Un mois après la croisière, ils ont été tamisés sur un 125 µm tamis et les résidus de tamis ont été stockés dans de l'éthanol à 95%. Des foraminifères bien colorés (toutes les chambres à l'exception de la coloration finale rose vif) ont été triés dans des échantillons humides et stockés dans des lames Plummer. Des critères de coloration stricts ont été appliqués et les individus douteux sans tests parfaitement colorés n'ont pas été inclus. Des taxons agglutinés et miliolid non transparents ont été cassés à de nombreuses reprises pour l'inspection de l'intérieur du test. La plupart des foraminifères vivants ont été identifiés au niveau des espèces. Toutes les données générées ou analysées au cours de cette étude sont incluses dans cet article publié (voir le matériel supplémentaire). À chaque station, nous avons calculé des indices de diversité incluant la diversité simple S

(représentant le nombre d'espèces), l'indice de Shannon H' (log base e), la richesse des espèces rares E (S 35) et l'indice de dominance D [Hayek et Buzas 1997 ; Murray 2006]. Ces indices étaient basés sur des dénombrements de spécimens colorés des quatre horizons de profondeur analysés dans chaque carotte. Les données du recensement sont disponibles sur demande auprès du premier auteur de cette publication.

4. Résultats

4.1. Stocks sur pied et diversité des foraminifères

Les stocks de foraminifères sur pied variaient entre ~50 (U27, 2250 m) et ~1190 (U03, 265 m) individus de 100 cm^{-2} (figure 2). Les valeurs étaient inférieures (<100 individus 100 cm^{-2}) à des profondeurs supérieures à 2200 m par rapport aux stations moins profondes. La diversité simple (S) variait entre 7 (U26, 2500 m) et 61 (U03, 265 m) espèces (figure 3). La diversité diminue généralement avec l'augmentation de la profondeur de l'eau, avec des valeurs de S inférieures à 12 espèces en dessous de 2200 m. Les seules exceptions ont été enregistrées aux stations SR2 (747 m) et SR1 (1553 m) situées le long de l'axe du canyon Cassidaigne où seuls 13 et 11 taxons ont été identifiés respectivement. L'indice de Shannon H' et la richesse en espèces rares E (S 30) ont suivi la même tendance (Figure 3) car les valeurs étaient faibles aux stations de plus de 2 200 m de profondeur par rapport aux sites plus peu profonds. Encore une fois, les stations SR2 et SR1 étaient des exceptions avec de faibles valeurs de H' ($<1,8$) et E (S 30) (<7) correspondant à la très faible diversité simple et à la forte dominance. Les valeurs de l'indice de dominance D et de l'indice de Shannon étaient inversement liées.

4.2. Composition de la faune

A la tête du canyon Cassidaigne (station U03, 292 m), *Melonis barleeanus* (Williamson, 1858) (32%) et *Valvulineria bradyana* (Fornasini, 1900) (18%) dominaient la faune vivante (Figure 4). Le long de l'axe du canyon Cassidaigne (station SR2, 747 m), *Bulimina marginata* d'Orbigny, 1826 (50%) et *Gyroidina altiformis* Stewart & Stewart, 1930 (27%) étaient dominantes. A la même profondeur sur le flanc est du canyon Cassidaigne (station U05, 751 m), *Bigenerina nodosaria* d'Orbigny, 1826 (16%) et *Rosalina bradyi* (Cushman, 1915) (16%) étaient la faune vivante la plus abondante. A la station SR1 (1553 m) située le long de l'axe du canyon Cassidaigne, la faune foraminiférale était dominée par *Uvigerina mediterranea* Hofker, 1932 (43%), *Uvigerina peregrina* Cushman, 1923 (19%) et *Hoeglundinaelegans* (d'Orbigny, 1826) (15%). Dans le canyon Sicié, et le long de l'axe du canyon Planier (<2000 m de profondeur d'eau), *M. barleeanus* était dominant avec une contribution relative comprise entre 10% et 30% aux deux stations U08 (1530 m) et U13 (952 m) respectivement . *Globobulimina affinis* (d'Orbigny, 1839) était abondante (16%) dans le canyon de Sicié (station U13, 952 m). *Uvigerina mediterranea* Hofker, 1932 et *Uvigerina peregrina* Cushman, 1923 étaient tous deux des composants importants ($> 10\%$) aux stations U06, U07, U08 et U10 (entre 605 et 1800 m). Plus profond que 2000 m, *Nodellum membranaceum* (Brady, 1879) était l'espèce dominante avec des pourcentages compris entre 11% (U09, 1968 m) et 83% (U26, 2432 m) (Figure 4) et *Lagenammina calcarea agglutiné* (Cushman, 1947) et *Thurammina albicans* (Brady, 1879) étaient des taxons secondaires.

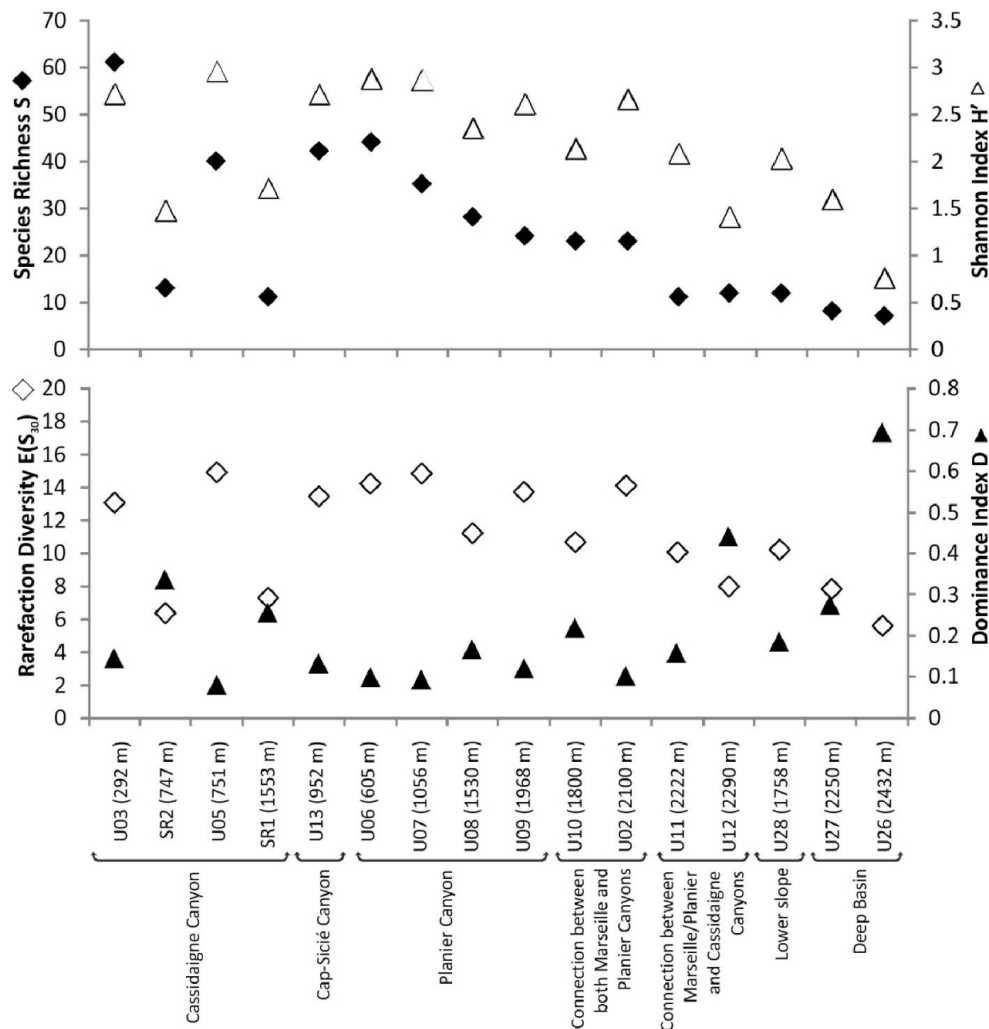


Figure 4. Diversité simple S, indice de diversité de Shannon H', richesse en espèces rares E (S₃₀) et indice de dominance D des faunes foraminiférales vivantes (colorées) aux 16 stations étudiées. Les stations sont disposées à la fois selon le réglage physiographique et la profondeur croissante.

5. Discussion

5.1. Contrôle trophique naturel sur les faunes foraminiférales dans les environs du canyon Cassidaigne (Figure 5)

Comme déjà discuté par Fontanier et al. [2015], sur la base d'échantillons prélevés en septembre 2012, toutes les stations sauf SR2 et SR1 situées dans l'axe du canyon Cassidaigne, présentent une diminution à la fois de la densité et de la diversité (S) des foraminifères avec la profondeur de l'eau (figures 3 et 4). Des faunes foraminiférales de faible diversité sont documentées dans le bassin plus profond et sur la pente inférieure distale par rapport à des communautés plus diversifiées d'autres stations moins profondes. Cette tendance est probablement liée à la rareté naturelle de la nourriture (c.-à-d. De la matière organique sédimentaire) à des profondeurs variables, ce qui fait écho (1) à la diminution naturelle de la productivité primaire exportée (c.-à-d. Phytodétritus frais) avec l'augmentation de la profondeur de l'eau et (2) la diminution naturelle l'advection de composés organiques dégradés des zones néritiques vers les stations de bassin profond [Fontanier et al. 2015].

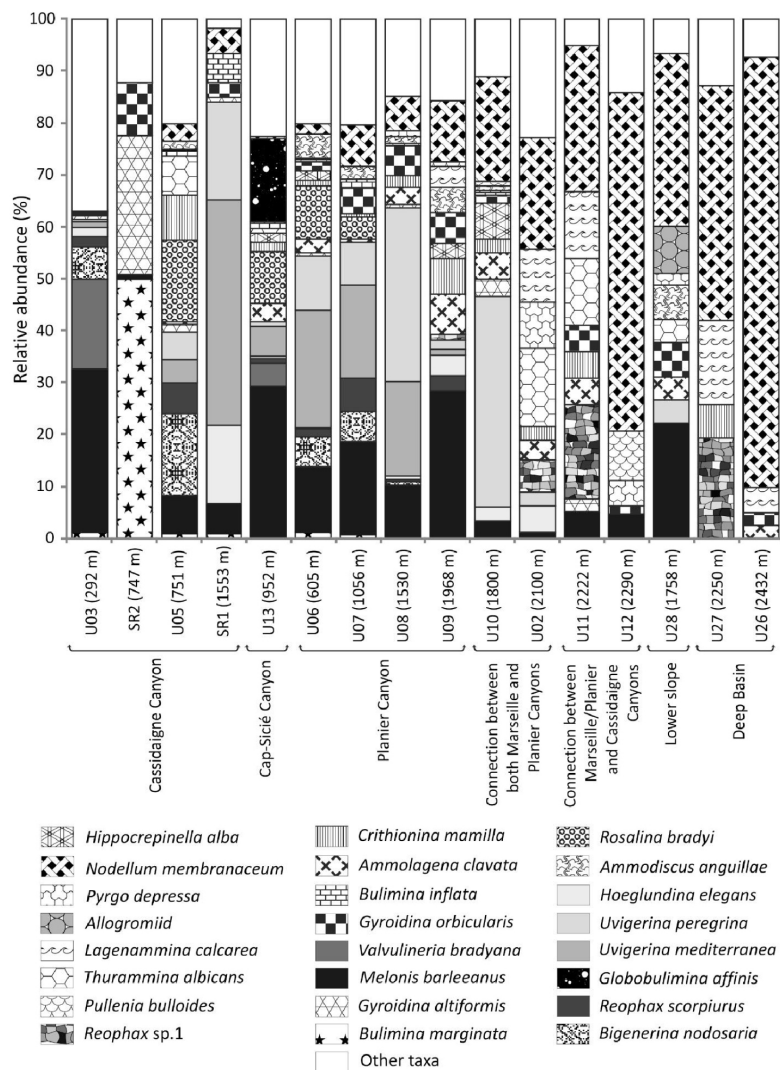


Figure 5. Composition des faunes foraminiférales vivantes benthiques (colorées) aux 16 stations étudiées. Seules les principales espèces (au moins > 5% sur un site) sont illustrées. Les stations sont disposées à la fois en fonction du réglage physiographique et de l'augmentation de la profondeur.

La composition faunistique des communautés foraminiférales isolées confirme le rôle majeur de l'apport en matière organique sur l'état écologique des écosystèmes benthiques. Par exemple, *Melonis barleeanus* est une espèce majeure dans les stations entre 290-2000 m où l'apport sédimentaire global de matière organique est considéré comme relativement élevé [Fontanier et al. 2015]. En conséquence, ce taxon est abondant dans les environnements mésotrophes et bien oxygénés [Caralp 1989 a, b ; Duros et coll. 2011, 2013 ; Fontanier et coll. 2002, 2003, 2005, 2008 a, b ; Koho et coll. 2007 ; Kurbjewit et coll. 2000 ; Licari et coll. 2003 ; Schmiedl et coll. 2000]. Dans les pentes ouvertes et les canyons, *M. barleeanus* se développe généralement dans des microhabitats profonds sous l'interface sédiment-eau où il se nourrit de matière organique dégradée. Cela confirme l'hypothèse que la plupart des stations bathyales sont caractérisées par l'apport de composés organiques de faible qualité, probablement transportés latéralement par les courants le long des pentes. En outre, la co-occurrence de *U. mediterranea* et *U. peregrina* est en accord avec les faunes bathyales décrites en Méditerranée occidentale. Ces uvigérinidés sont généralement décrits comme des espèces infauniques peu profondes capables de se nourrir de débris organiques relativement frais dans les écosystèmes mésotrophes [Contreras-Rosales et al. 2012 ; De Rijk et coll. 2000 ; Duros et coll. 2011, 2013 ; Eberwein et Mackensen 2006 ; Fontanier et coll. 2002, 2003, 2006, 2008 b ; Koho et coll. 2007, 2008 ; Schmiedl et coll. 2000]. *Uvigerina peregrina* est considérée comme une espèce opportuniste se nourrissant de phytodétritus fraîchement exporté dans des environnements de canyons et de pentes, tandis que *U. mediterranea* est un taxon réactif capable de croître et de se reproduire lorsque la nourriture est disponible dans les sédiments de surface [Duros et al. 2011, 2013 ; Fontanier et coll. 2003]. Pour résumer, le fait que l'association faunique *M. barleeanus* et uvigérinidés a été découverte à l'origine lors du biosurveillance de l'automne 2012 [Fontanier et al. 2015], qui prévaut toujours à l'automne 2016, montre que les conditions mésotrophes au sein des systèmes de canyons adjacents au canyon Cassidaigne sont indépendantes des résidus de bauxite. De plus, la dominance de l'espèce *V. bradyana* du plateau extérieur / haut du bathyal avec *M. barleeanus* à la

station la moins profonde U03 (292 m) indique un écosystème enrichi en détritiques organiques [Fontanier et al. 2002 ; Goineau et coll. 2011 ; Hess et Jorissen 2009 ; Langezaal et coll. 2006]. C'est une espèce commune dans les assemblages fauniques riches et diversifiés rencontrés dans les environnements de tête de canyon où il n'y a pas de redépôt des sédiments [Hess et Jorissen 2009]. La cooccurrence de *M. barleeanus* et de *V. bradyana* suggère que des conditions méso-eutrophes prévalent à la station la moins profonde. La présence remarquable de *R. bradyi* aux stations U05 (751 m), U13 (952 m) et U06 (U06) est discutable. Ce taxon eurysalé est abondant dans les zones néritiques avec une préférence pour un mode de vie épiphyte et / ou épilithique dans les environnements internes du plateau [Fontanier et al. 2008 a]. Bien qu'ils soient attachés à la végétation, les individus de cette espèce peuvent être transportés par les courants de fond dans les canyons [Fontanier et al. 2008 a]. Par conséquent, l'apparition de *R. bradyi* sur nos sites d'échantillonnage souligne en outre une connexion naturelle source-puits en termes d'approvisionnement organique et de transfert de sédiments entre les environnements de pente supérieure et les étagères adjacentes plus profondes. À l'automne 2012, la dominance de *Globobulimina* spp. et une teneur en matières organiques relativement élevée (1,4% DW) a suggéré une focalisation préférentielle des composés organiques à la station U13 [Fontanier et al. 2015], un site situé dans la branche ouest du canyon du Cap Sicié à seulement 7 km de la côte. À l'automne 2016, *Globobulimina* spp. reste une composante substantielle (20%) de l'assemblage de faune vivante après *M. barleeanus*. Ce genre est considéré comme un taxon hautement spécialisé capable de se nourrir de détritiques organiques de faible qualité qui s'accumulent dans les dépressions eutrophiées du canyon [Fontanier et al. 2005 , 2008 a]. Sous 2000 m, la communauté foraminiférale est dominée par *N. membranaceum* , *P. depressa*, *L. calcarea*, *Thurammina albicans* Brady, 1879 et *Pullenia bulloides* (d'Orbigny, 1846). De même, ces observations coïncident avec les schémas fauniques de l'automne 2012 et la teneur en carbone organique des sédiments de surface [Fontanier et al. 2015]. Tous les taxons mentionnés ci-dessus sont typiques des bassins oligotrophes de la Méditerranée occidentale [Bizon et Bizon 1984; De Rijk et coll. 2000 ; Fontanier et coll. 2008 b , 2012 , 2015]. Cela suggère que nos sites d'échantillonnage plus profonds (> 2000 m) sont affectés par un apport limité de composés organiques, probablement lié à la productivité primaire exportée ou à l'advection latérale de restes de phyton retransformés.

5.2. Résilience écologique discutable le long de l'axe du canyon Cassidaigne

À l'automne 2012, un site d'échantillonnage de 725 m de profondeur était caractérisé par une faune de très faible diversité ($S = 3$ et $H' = 0,76$) et dominé par les espèces opportunistes et tolérantes au stress *Gyroidina umbonata* et *Bulimina marginata* [Fontanier et al. 2012]. Considérées comme des taxons pionniers, les espèces trouvées sur ce site indiquent une intense pollution hydro-sédimentaire due au dépôt de boue rouge le long de l'axe du canyon Cassidaigne. Nos résultats de l'automne 2016 sur le site SR2 (747 m), situé très près du site de l'automne 2012, montrent que la diversité s'est accrue ($S = 13$; $H' = 1,67$). *Bulimina marginata* domine, contribuant à 50% de la faune vivante. Ce taxon est documenté comme une espèce opportuniste vivant dans les environnements du plateau extérieur et des pentes supérieures, aux stades précoces et avancés de recolonisation dans les canyons actifs (par exemple [Fontanier et al. 2003 ; Goineau et al. 2011 ; Hess et Jorissen 2009 ; Hess et al. 2005 ; Langezaal et al. 2006]. *Gyroidina altiformis* constitue 27% de la communauté vivante et est généralement un contributeur très faible (<1%) aux faunes bathyales foraminiférales en Méditerranée occidentale al., 2013; Sea and the Océan Atlantique du Nord-Est (par exemple, [Duros et al. 2011 , 2013; Fontanier et coll. 2002 , 2008 a , b , 2015]). Sa dominance avec *B. marginata* à la station SR2 peut souligner sa capacité exceptionnelle en tant qu'espèce pionnière dans une première étape de recolonisation des sédiments après un stress environnemental extrême prolongé. Comme décrit par Anschutz et al. [2002] et Hess et al. [2005] dans le canyon du Cap Breton (nord-est de l'Atlantique), le rétablissement biotique global de la faune foraminiférale était incomplet deux ans après le récent dépôt de turbidité. Ainsi, dans notre zone d'étude, à peine 10 mois après un changement historique de la nature des déchets industriels rejetés dans la région (du rejet de boue rouge dense au rejet d'effluent liquide), il est assez naturel de documenter à la station SR2 une recolonisation en cours. caractérisé par une faune de faible diversité. Dans la figure 6 , nous illustrons la proportion de taxons foraminiféraux opportunistes tolérants au stress qui ont été documentés comme recolonisateurs potentiels de zones fraîchement perturbées (*Psammosphaera* spp., *Saccamina* spp., *Technitella* spp., *R. scorpiurus*, *Quinqueloculina seminula* (Linnaeus, 1758), *G. umbonata* , *B. marginata*) [Fontanier et al. 2012 , 2013 ; Hess et Jorissen 2009 ; Hess et Kuhnt 1996 ; Hess et coll. 2005 ; Kaminski 1985]. Nous avons ajouté *G. altiformis* à ce groupe comme taxon potentiel tolérant au stress. À la station SR2, les taxons opportunistes et pionniers constituent plus de 80% de la faune, ce qui indique qu'une communauté stressée se remet d'un bouleversement de l'écosystème. Pourtant, à toutes les stations sauf SR2, les recolonisateurs opportunistes

représentent moins de 5% des faunes vivantes (Figure 6) où les foraminifères benthiques se développent dans des écosystèmes relativement stables et les conditions trophiques naturelles contrôlent la diversité, la densité et la composition.

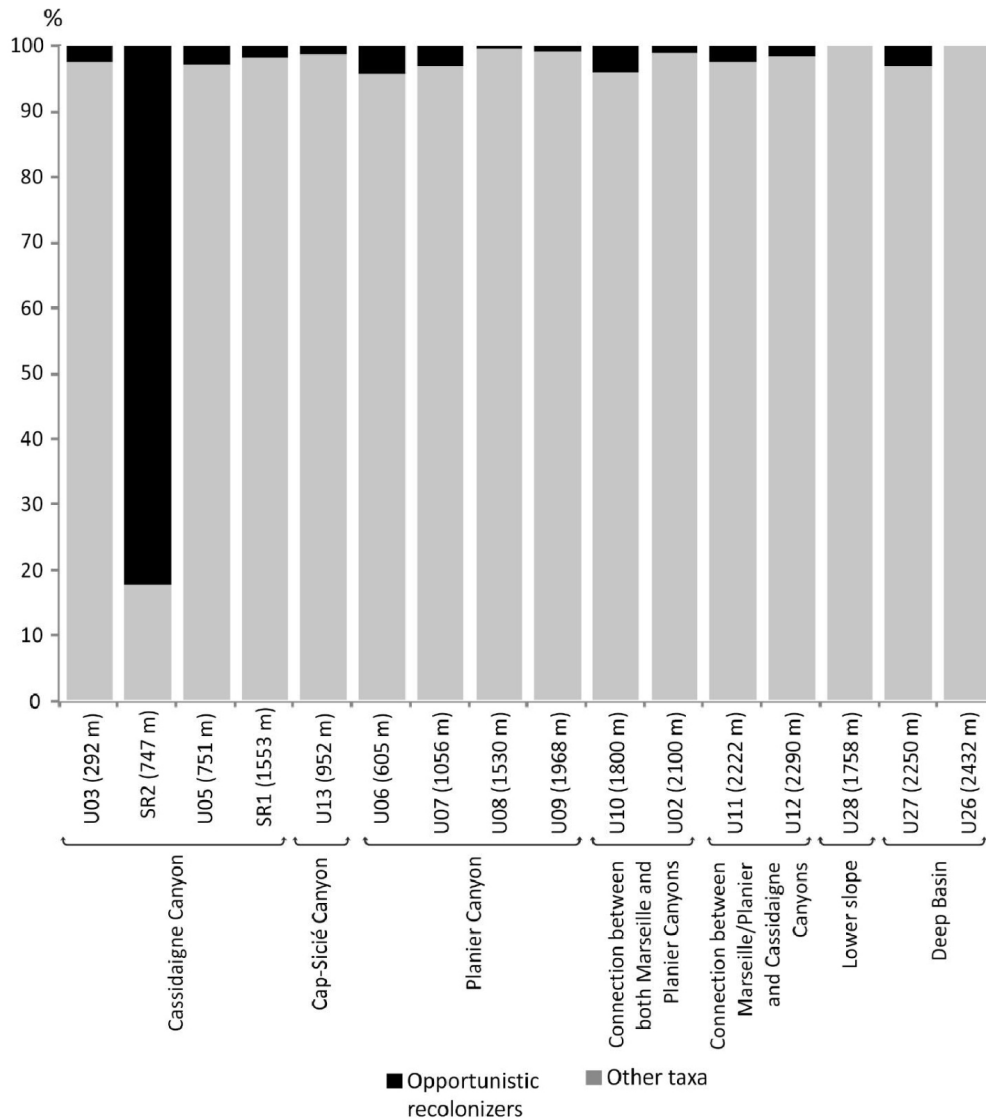


Figure 6. Abondance relative (%) de taxons foraminiféraux opportunistes et tolérants au stress qui sont considérés comme des recoloniseurs potentiels de zones fraîchement perturbées (*Psammospaera* spp., *Saccammina* spp., *Technitella* spp., *Quinqueloculina* séminula , *Gyroidina umbonata*, *Gyroidina altiformis*, *Bulimina marginata*).

6. Conclusions

À l'automne 2016, dix mois après la fin de la dispersion de la boue rouge dans le canyon Cassidaigne, des communautés foraminiférales ont été échantillonnées à 16 stations situées entre 265 et 2 500 m de profondeur d'eau à une proximité variable de la sortie du tuyau. Nos observations écologiques à la station de 725 m (station SR2) située la plus proche de la conduite sous-marine le long de l'axe du canyon Cassidaigne montrent la plus forte concentration d'espèces opportunistes et tolérantes au stress *Bulimina marginata*, communément identifié comme un recoloniseur de zones perturbées. Aux quinze autres stations, les stocks permanents de foraminifères et la diversité simple (S) diminuent avec l'augmentation de la profondeur de l'eau et la diminution de l'apport alimentaire au fond marin. Là, la composition des foraminifères est caractérisée par une contribution mineure d'espèces tolérantes au stress, faisant écho aux modèles méso-oligotrophes globaux d'écosystèmes relativement stables. Notre étude montre clairement que la diversité des foraminifères à proximité de la sortie du tuyau dans le canyon Cassidaigne reste altérée.

Remerciements

Nous remercions les membres d'équipage du R / V «FéliX» (IXBLUE) et tous les participants scientifiques de la croisière océanographique 2016. CF (premier auteur de cet article) et PD ont réalisé des analyses foraminiférales dans le cadre d'un contrat industriel liant financièrement le groupe de recherche FORAM (<http://www.foram.eu.com>) et CREOCEAN (<http://www.creocean.fr>) à ALTEO. À l'été 2018, ALTEO a autorisé CF à utiliser les données foraminiférales pour cette publication. L'ensemble de données Titanium généré au cours de la présente étude ne sont pas accessibles au public en raison des contraintes contractuelles liant CREOCEAN à ALTEO ALUMINA mais sont disponibles auprès de l'auteur correspondant et des co-auteurs travaillant dans CREOCEAN sur demande raisonnable. Enfin, nous tenons à remercier les deux réviseurs pour leurs commentaires sur le premier manuscrit.

Données supplémentaires

Des informations complémentaires pour cet article sont disponibles sur le site Web de la revue sous <https://doi.org/10.5802/crgeos.5> ou auprès de l'auteur.

Bibliographie

- [Anschutz et al., 2002] P. Anschutz; F. J. Jorissen; G. Chaillou; R. Abu-Zied; C. Fontanier Recent turbidite deposition in the eastern Atlantic: early diagenesis and biotic recovery, *J. Mar. Res.*, Volume 60 (2002), pp. 835-854
- [Barnett et al., 1984] P. R. O. Barnett; J. Watson; D. Connely A multiple corer for taking virtually undisturbed sample from shelf, bathyal and abyssal sediments, *Oceanol. Acta*, Volume 7 (1984), pp. 399-408
- [Bizon and Bizon, 1984] G. Bizon; J. J. Bizon Les foraminifères des sédiments profonds, *Ecologie des microorganismes en Méditerranée occidentale 'ECOMED': Ecologie des foraminifères en Méditerranée nord-occidentale* (J. J. Bizon; P. F. Burolet, eds.), Association Française des Techniciens du Pétrole, Paris, 1984, pp. 103-139
- [Bourcier and Zibrowius, 1973] M. Bourcier; H. Zibrowius Les boues rouges déversées dans le canyon de la cassidaigne (région de marseille). Observations en soucoupe plongeante SP350 (juin 1971) et résultats de dragages, *Tethys*, Volume 4 (1973), pp. 811-842
- [Bourcier et al., 1993] M. Bourcier; G. Stora; M. Gerino Réponse du macrobenthos d'un canyon sous-marin méditerranéen à des apports particuliers telluriques et anthropiques, *C. R. Acad. Sci. Paris III*, Volume 316 (1993), pp. 191-196
- [Bourcier, 1969] M. Bourcier Ecoulement des boues rouges dans le canyon de la Cassidaigne (décembre 1968), *Tethys*, Volume 1 (1969), pp. 79-782
- [Béthoux and Prieur, 1983] J.-P. Béthoux; L. Prieur Hydrologie et circulation en Méditerranée Nord-Occidentale, *Petrole et techniques*, Volume 229 (1983), pp. 25-34
- [Béthoux et al., 2002] J.-P. Béthoux; X. Durrieu de Madron; F. Nyffeler; D. D. Tailliez Deep water in the western Mediterranean: peculiar 1999 and 2000 characteristics, shelf formation hypothesis, variability since 1970 and geochemical inferences, *J. Mar. Syst.*, Volume 33–34 (2002), pp. 117-131
- [Caralp, 1989a] H. M. Caralp Abundance of *Bulimina exilis* and *Melonis barleeanum*: relationship to the quality of marine organic matter, *Geo-Mar. Lett.*, Volume 9 (1989a), pp. 37-43
- [Caralp, 1989b] H. M. Caralp Size and morphology of benthic foraminifer *Melonis barleeanum*: relationships with marine organic matter, *J. Foraminifer. Res.*, Volume 19 (1989b), pp. 235-245
- [Contreras-Rosales et al., 2012] L. A. Contreras-Rosales; K. A. Kohoa; I. A. P. Duijnstea; H. C. de Stigter; R. García; E. Koning; E. Epping Living deep-sea benthic foraminifera from the Cap de Creus Canyon (western Mediterranean): Faunal–geochemical interactions, *Deep-Sea Res. I*, Volume 64 (2012), pp. 22-42
- [CREOCEAN, 2018] CREOCEAN, 2018 (Usine d'alumine de Gardanne, Etude et suivi de l'impact des rejets sur le milieu marin. Synthèse globale, Suivi 2016–2017, 28 p)
- [Dauvin, 2010] J. C. Dauvin Towards an impact assessment of bauxite red mud waste on the knowledge of the structure and functions of bathyal ecosystems: the example of the Cassidaigne Canyon (north-western Mediterranean Sea), *Mar. Pollut. Bull.*, Volume 60 (2010), pp. 197-206
- [De Rijk et al., 2000] S. De Rijk; F. J. Jorissen; E. J. Rohling; S. R. Troelstra Organic flux control on bathymetric zonation of Mediterranean benthic foraminifera *Mar. Micropaleontology*, Volume 40 (2000), pp. 151-166

- [Duros et al., 2011] P. Duros; C. Fontanier; E. Metzger; A. Pusceddu; F. Cesbron; H. C. de Stigter; S. Bianchelli; R. Danovaro; F. J. Jorissen Live (stained) benthic foraminifera in the Whittard Canyon, Celtic margin (NE Atlantic), *Deep-Sea Res. I*, Volume 58 (2011), pp. 128-146
- [Duros et al., 2013] P. Duros; C. Fontanier; E. Metzger; F. Cesbron; B. Deflandre; S. Schmidt; R. Buscail; S. Zaragosi; P. Kerhervé; S. Rigaud; F. J. Jorissen Live (stained) benthic foraminifera from the Cap-Ferret Canyon (Bay of Biscay, NE Atlantic): a comparison between the canyon axis and the surrounding areas, *Deep-Sea Res. I*, Volume 74 (2013), pp. 98-114
- [Eberwein and Mackensen, 2006] A. Eberwein; A. Mackensen Regional primary productivity differences off Morocco (NW-Africa) recorded by modern benthic foraminifera and their stable carbon isotopic composition, *Deep-Sea Res. I*, Volume 53 (2006), pp. 1379-1405
- [Fabri et al., 2013] M.-C. Fabri; L. Pedel; L. Beuck; F. Galgani; D. Hebbeln; A. Freiwald Megafauna of vulnerable marine ecosystems in French mediterranean submarine canyons: spatial distribution and anthropogenic impacts, *Deep-Sea Res. II*, Volume 104 (2013), pp. 184-207
- [Fontanier et al., 2002] C. Fontanier; F. J. Jorissen; L. Licari; A. Alexandre; P. Anschutz; P. Carbonel Live benthic foraminiferal faunas from the Bay of Biscay: faunal density, composition, and microhabitats, *Deep-Sea Res. I*, Volume 49 (2002), pp. 751-785
- [Fontanier et al., 2003] C. Fontanier; F. J. Jorissen; G. Chaillou; C. David; P. Anschutz; V. Lafon Seasonal and interannual variability of benthic foraminiferal faunas at 550 m depth in the Bay of Biscay, *Deep-Sea Res. I*, Volume 50 (2003), pp. 457-494
- [Fontanier et al., 2005] C. Fontanier; F. J. Jorissen; G. Chaillou; P. Anschutz; C. Griveaud Live foraminiferal faunas from a 2800 m deep lower canyon station from the Bay of Biscay: faunal response to focusing of refractory organic matter, *Deep-Sea Res. I*, Volume 52 (2005), pp. 1189-1227
- [Fontanier et al., 2006] C. Fontanier; F. J. Jorissen; P. Anschutz; G. Chaillou Seasonal variability of foraminiferal faunas at 1000 m depth in the Bay of Biscay, *J. Foraminifer. Res.*, Volume 36 (2006), pp. 61-76
- [Fontanier et al., 2008a] C. Fontanier; F. J. Jorissen; E. Geslin; S. Zaragosi; S. Duchemin; M. Laversin; M. Gaultier Live dead foraminiferal faunas from the Saint-Tropez Canyon (Bay of Fréjus): observations based on in situ and incubated cores, *J. Foraminifer. Res.*, Volume 38 (2008a), pp. 137-156
- [Fontanier et al., 2008b] C. Fontanier; F. J. Jorissen; B. Lansard; A. Mouret; R. Buscail; S. Schmidt; P. Kerhervé; F. Buron; S. Zaragosi; G. Hunault; E. Ernoult; C. Artero; P. Anschutz; C. Rabouille Live (stained) foraminiferal faunas from open slope environments separating submarine canyons in the Gulf of Lions (NW Mediterranean): diversity, density and microhabitats, *Deep-Sea Res. I*, Volume 55 (2008b), pp. 1532-1553
- [Fontanier et al., 2012] C. Fontanier; M.-C. Fabri; R. Buscail; L. Biscara; K. Koho; G. J. Reichart; D. Cossa; S. Galaup; G. Chabaud; L. Pigot Deep-sea foraminifera from the Cassidaigne Canyon (NW Mediterranean): assessing the environmental impact of bauxite red mud disposal, *Mar. Pollut. Bull.*, Volume 64 (2012), pp. 1895-1910
- [Fontanier et al., 2013] C. Fontanier; E. Metzger; B. Deflandre; C. Waelbroeck; M. Jouffreau; N. Leflock; F. J. Jorissen; H. Etcheber; S. Bichon; G. Chabaud; D. Poirier; A. A. Grémare Live (stained) benthic foraminifera off Walvis Bay (Namibia): a deep-sea ecosystem under the influence of benthic nepheloid layer, *J. Foraminifer. Res.*, Volume 43 (2013), pp. 50-66
- [Fontanier et al., 2014] C. Fontanier; P. Duros; T. Toyofuku; K. Oguri; K. A. Koho; R. Buscail; A. Grémare; O. Radakovitch; B. Deflandre; L. J. De Nooijer; S. Bichon; S. Goubet; I. Ivanovsky; G. Chabaud; C. Menniti; G. J. Reichart; H. Kitazato Living (stained) deep-sea foraminifera off Hachinohe (NE Japan, Western Pacific): environmental interplay in oxygen-depleted ecosystems, *J. Foraminifer. Res.*, Volume 44 (2014), pp. 281-299
- [Fontanier et al., 2015] C. Fontanier; L. Biscara; B. Mamo; E. Delord Deep-sea benthic foraminifera in an area around the Cassidaigne Canyon (NW Mediterranean) affected by bauxite discharges, *Mar. Biodiv.*, Volume 45 (2015), pp. 371-382
- [Goineau et al., 2011] A. Goineau; C. Fontanier; F. J. Jorissen; B. Lansard; R. Buscail; A. Mouret; P. Kerhervé; S. Zaragosi; E. Ernoult; C. Artéro; P. Anschutz; E. Metzger; C. Rabouille Live (stained) benthic foraminifera from the Rhône prodelta (Gulf of Lions, NW Mediterranean): environmental controls on a river-dominated shelf, *J. Sea Res.*, Volume 65 (2011), pp. 58-75
- [Goineau et al., 2012] A. Goineau; C. Fontanier; F. Jorissen; R. Buscail; P. Kerhervé; C. Cathalot; A. M. Pruski; F. Lantoine; S. Bourgeois; E. Metzger; E. C. R. Legrand Temporal variability of live (stained) benthic foraminiferal faunas in a river-dominated shelf – faunal response to rapid changes of

the river influence (Rhône prodelta, NW Mediterranean), *Biogeosci. Disc.*, Volume 8 (2012), pp. 9033-9086

- [Gooday et al., 2000] A. J. Gooday; J. M. Bernhard; L. A. Levin; S. B. Suhr Foraminifera in the Arabian Sea oxygen minimum zone and other oxygen-deficient settings: taxonomic composition, diversity, and relation to metazoan faunas, *Deep-Sea Res. II*, Volume 47 (2000), pp. 24-54
- [Gooday, 2003] A. J. Gooday Benthic Foraminifera (Protista) as Tools in Deep-water Palaeoceanography: Environmental Influences on Faunal Characteristics, *Adv. Mar. Biol.*, Volume 46 (2003), pp. 1-90
- [Hayek and Buzas, 1997] L. E. C. Hayek; M. A. Buzas Surveying Natural Populations, Columbia University Press, New York, 1997
- [Hess and Jorissen, 2009] S. Hess; F. J. Jorissen Distribution patterns of living benthic foraminifera from Cap Breton canyon, Bay of Biscay: faunal response to sediment instability, *Deep-Sea Res. I*, Volume 56 (2009), pp. 1555-1578
- [Hess and Kuhnt, 1996] S. Hess; W. Kuhnt Deep-sea benthic foraminiferal recolonization of the 1991 Mt. Pinatubo ash layer in the South China Sea, *Mar. Micropaleontol.*, Volume 28 (1996), pp. 171-197
- [Hess et al., 2005] S. Hess; F. J. Jorissen; V. Venet; R. Abu-Zied Benthic foraminiferal recovery after recent turbidite deposition in Cap Breton Canyon (Bay of Biscay), *J. Foraminifer. Res.*, Volume 35 (2005), pp. 114-129
- [Kaminski, 1985] M. A. Kaminski Evidence for control of abyssal agglutinated foraminiferal community structure by substrate disturbance, *Mar. Geol.*, Volume 66 (1985), pp. 113-131
- [Koho et al., 2007] K. A. Koho; T. J. Kouwenhoven; H. C. de Stigter; G. van der Zwaan Benthic foraminifera in the Nazaré canyon, Portuguese continental margin: sedimentary environments and disturbance, *Mar. Micropaleontol.*, Volume 66 (2007), pp. 27-51
- [Koho et al., 2008] K. A. Koho; R. García; H. C. de Stigter; E. Epping; E. Koning; T. J. Kouwenhoven; G. J. van der Zwaan Sedimentary labile organic carbon and pore water redox control on species distribution of benthic foraminifera: a case study from Lisbon-Setúbal canyon (southern Portugal), *Prog. Oceanogr.*, Volume 79 (2008), pp. 55-82
- [Kurbjeweit et al., 2000] F. Kurbjeweit; G. Schmiedl; R. Schiebel; C. Hemleben; O. Pfannkuche; K. Wallman; P. Schäfer Distribution biomass and diversity of benthic foraminifera in relation to sediment geochemistry in the Arabian Sea, *Deep-Sea Res. II*, Volume 47 (2000), pp. 2913-2955
- [Langezaal et al., 2006] A. M. Langezaal; F. J. Jorissen; B. Braun; G. Chaillou; C. Fontanier; P. Anschutz; G. J. van der Zwaan The influence of seasonal processes on geochemical profiles and foraminiferal assemblages on the outer shelf of the Bay of Biscay, *Cont. Shelf Res.*, Volume 26 (2006), pp. 1730-1755
- [Licari et al., 2003] L. N. Licari; S. Schumacher; F. Wenzhöfer; M. Zabel; A. Mackensen Communities and microhabitats of living benthic foraminifera from the tropical east Atlantic: impact of different productivity regimes, *J. Foraminifer. Res.*, Volume 33 (2003), pp. 10-31
- [Millot, 1990] C. Millot The Gulf of Lions' hydrodynamics, *Cont. Shelf Res.*, Volume 10 (1990), pp. 884-895
- [Murray and Bowser, 2000] J. W. Murray; S. S. Bowser Mortality, protoplasm decay rate, and reliability of staining techniques to recognise 'living' foraminifera: a review, *J. Foraminifer. Res.*, Volume 30 (2000), pp. 66-70
- [Murray, 2006] J. W. Murray Ecology and Applications of Benthic Foraminifera, Cambridge University Press, New York, 2006
- [SAFEGE, 2011] SAFEGE, 2011 (Rejets en mer des effluents du centre de production d'alumine de Gardanne. Synthèse et analyse bibliographique)
- [Schmiedl et al., 2000] G. Schmiedl; F. de Bovée; R. Buscail; B. Charrière; C. Hemleben; L. Medernach; P. Picon Trophic control of benthic foraminiferal abundance and microhabitat in the bathyal Gulf of Lions, western Mediterranean Sea, *Mar. Micropaleontol.*, Volume 40 (2000), pp. 167-188
- [Schumacher et al., 2007] S. Schumacher; F. J. Jorissen; D. Dissard; K. E. E. Larkin; A. J. Gooday Live (Rose Bengal stained) and dead benthic foraminifera from the oxygen minimum zone of the Pakistan continental margin (Arabian Sea), *Mar. Micropaleontol.*, Volume 62 (2007), pp. 45-73
- [Schönfeld et al., 2012] J. Schönfeld; E. Alve; E. Geslin; F. Jorissen; S. Korsun; S. Spezzaferri The FOBIMO (FORaminiferal BIo-MONitoring) initiative—Towards a standardised protocol for soft-bottom benthic foraminiferal monitoring studies, *Mar. Micropaleontol.*, Volume 94–95 (2012), pp. 1-13 (group motF)

- [Vitiello and Vivier, 1974] P. Vitiello; M. H. Vivier Données quantitatives sur la méiofaune d'une zone profonde de déversements industriels, Bulletin de l'Union des Océanographes de France, Volume 6 (1974), pp. 13-16
- [Vivier, 1978a] M. H. Vivier Conséquences d'un déversement de boue rouge d'alumine sur le méiobenthos profond (canyon de Cassidaigne, Méditerranée), Tethys, Volume 8 (1978a), pp. 249-262
- [Vivier, 1978b] M. H. Vivier Influence d'un déversement industriel profond sur la nématofaune (canyon de Cassidaigne, Méditerranée), Tethys, Volume 8 (1978b), pp. 307-321
- [Walton, 1952] W. R. Walton Techniques for recognition of living foraminifera, Contrib. Cushman Lab. Forum Res., Volume 3 (1952), pp. 56-60
- [Zeppilli et al., 2015] D. Zeppilli; J. Sarrazin; D. Leduc; P. Martinez Arbizu; D. Fontaneto; C. Fontanier; A. J. Gooday; R. M. Kristensen; V. N. Ivanenko; M. V. Sørensen; A. Vanreusel; J. Thébault; M. Mea; N. Allio; T. Andro; A. Arvigo; J. Castrec; M. Danielo; V. Foulon; R. Fumeron; L. Hermabessiere; V. Hulot; T. James; R. Langonne-Augen; T. Le Bot; M. Long; D. Mahabror; Q. Morel; M. Pantalos; E. Pouplard; L. Raimondeau; A. Rio-Cabello; S. Seite; G. Traisnel; K. Urvoy; T. Van Der Stegen; M. Weyand; D. Fernandes Is the meiofauna a good indicator for climate change and anthropogenic impacts?, Mar. Biodiv., Volume 45 (2015), pp. 505-535