



Microplastics in the marine environment: development of a new citizen science tool

Elora Briola^a, Solene Cleraux^b, Bruno Dumontet^c, Ana Luzia Lacerda^d, Mikaël Kedzierski^{a,*}

^a Université Bretagne Sud, UMR CNRS 6027, IRDL, F-56100, Lorient, France

^b Geo-Ocean, Univ Bretagne Sud, Univ Brest, CNRS, Ifremer, UMR6538, 5600, Vannes, France

^c Expédition MED, 4 Allée des Avettes C.P., 56230, Questembert, France

^d Littoral Environnement et Sociétés (LIENSs), UMR 7266, CNRS – La Rochelle Université, La Rochelle, France

Traduction Française des textes

Les différentes illustrations, (graphiques, cartes ,.. sont à consulter dans la version d'origine)

Microplastiques dans l'environnement marin : développement d'un nouvel outil de science citoyenne

Elora Briola^a, Solène Cleraux^b, Bruno Dumontet^c, Ana Luzia Lacerda^d, Mikaël Kedzierski^{a,}, Marine Pollution Bulletin 232 (2026) 120084.*

Résumé

La pollution par les microplastiques représente une menace mondiale pour tous les écosystèmes marins. La **science citoyenne** offre une méthode précieuse pour surveiller leur présence et leur distribution. Cependant, les bénévoles n'ont pas toujours accès à des techniques de laboratoire coûteuses et complexes, comme la **spectroscopie Raman ou FTIR**, pour identifier avec précision les microplastiques.

L'objectif de cette étude était :

1. **Développer un protocole simple, peu coûteux et adaptable sur le terrain** permettant aux bénévoles d'identifier et de quantifier les microplastiques en les distinguant des matières organiques et non plastiques **grâce à leur comportement à la fusion**.
2. **Étudier la composition polymérique** des échantillons.

Un **support céramique dédié** et une **méthode de vérification thermique** ont été développés et testés en laboratoire avant des essais sur le terrain. Les échantillons ont été collectés à l'aide d'un **filet Manta** lors des campagnes **2024 et 2025 d'Expédition MED** en mer Méditerranée, suivis d'un tamisage humide, d'une caractérisation visuelle et d'une analyse par déformation thermique. Le **taux d'erreur d'identification** a été déterminé en mesurant la proportion de particules visuellement sélectionnées comme microplastiques mais qui n'ont pas fondu lors de la vérification thermique.

Les essais impliquant **39 bénévoles** ont montré que la méthode de vérification par fusion **réduit efficacement les erreurs d'identification**, diminuant ainsi la surestimation des particules de microplastiques. En **2024, 926 particules** ont été testées avec un **taux d'erreur de 4,6 %**. En **2025, 3 421 particules** ont été analysées, avec un taux d'erreur plus élevé (**8,8 %**), en raison d'une

concentration plus importante de microplastiques et d'une proportion accrue de particules de très petite taille (ex. < 2,5 mm).

Des **citoyens scientifiques** issus de milieux sociodémographiques variés ont appliqué avec succès le protocole sur le terrain après une formation encadrée, démontrant que les bénévoles peuvent contribuer de manière significative à la **collecte et à l'analyse des microplastiques** en fournissant des résultats **précis et comparables** à ceux obtenus en laboratoire. Dans l'ensemble, cette approche offre une **méthode fiable et accessible** pour améliorer la qualité des données dans la recherche sur les microplastiques en science citoyenne.

Introduction

La pollution plastique est un problème environnemental **mondial**, présent dans tous les milieux, des sols (Chae et An, 2018) aux profondeurs océaniques (Zhu et al., 2024), en passant par l'atmosphère (Allen et al., 2022). Depuis les années 1970, la production mondiale de plastique est passée de **47 millions de tonnes à plus de 400 millions de tonnes en 2022** (Anon, 2023), et **79 % de ces déchets ne sont pas correctement gérés** (Liu et al., 2025), ce qui entraîne leur accumulation dans l'environnement. Les déchets plastiques peuvent persister pendant des **décennies, voire des siècles** (Chamas et al., 2020), se dégradant par des processus mécaniques, chimiques et biologiques dont l'intensité varie en fonction de la composition chimique du plastique (Corcoran, 2022). Cette dégradation conduit à la formation de **microplastiques (MP, 1 à 5 000 µm, Gesamp, 2016)**, de formes, couleurs et compositions polymériques variées, que l'on retrouve dans tous les environnements, des zones urbaines (Setälä et al., 2022) aux habitats marins (do Sul et Costa, 2014).

Dans ce contexte, la **mer Méditerranée** est l'une des mers les plus polluées au monde, avec environ **0,31 million de tonnes de déchets plastiques** y entrant chaque année (**850 tonnes/jour**, Segur et Sonke, 2025). Ce niveau élevé de pollution résulte de sa **géographie semi-fermée** et de l'**intensité des activités humaines** (densité de population élevée, pêche, tourisme) (Cincinelli et al., 2019). Des études montrent que le **polyéthylène (PE)** et le **polypropylène (PP)** sont les polymères les plus courants à la surface de la Méditerranée, car leur faible densité leur permet de flotter, tandis que des polymères plus denses comme le **polystyrène (PS)**, le **chlorure de polyvinyle (PVC)**, le **polyamide (PA)** et le **téréphtalate de polyéthylène (PET)** ont tendance à couler (Guo et Wang, 2019 ; Kedzierski et al., 2022). Les études sur les MP en surface ont principalement été menées dans la **partie nord de la Méditerranée**, mais des **lacunes importantes subsistent dans la région sud** (Terzi et al., 2024), avec peu ou pas de données disponibles pour des pays comme le Maroc, la Tunisie, l'Algérie, la Libye et la Syrie (Chatziparaskeva et al., 2022).

La **science citoyenne** offre une approche importante pour combler ce déséquilibre. Impliquer les **communautés locales** dans l'échantillonnage et la surveillance permet d'accéder à des **zones sous-échantillonnées** et d'établir un **suivi à long terme**, en particulier là où les ressources scientifiques sont limitées (Catarino et al., 2023 ; Ershova et al., 2021 ; Hidalgo-Ruz et Thiel, 2015 ; Jones et al., 2025). De plus, l'implication du public dans les projets scientifiques contribue à une **meilleure sensibilisation** à la pollution par les microplastiques, y compris ses **impacts environnementaux et sanitaires** (Dowarah et al., 2022 ; Garcia-Vazquez et Garcia-Ael, 2021). Cet engagement peut également déboucher sur le développement d'**actions pratiques et de solutions futures**, y compris des initiatives communautaires et des changements politiques (Hossain, 2024 ; Li et al., 2025).

La participation des citoyens à la recherche scientifique s'est principalement concentrée sur le **signalement de la distribution et de la composition des macro- et mésoplastiques** trouvés sur les

plages et le long des côtes (Hidalgo-Ruz et Thiel, 2015). En revanche, les études sur les **microplastiques impliquant la science citoyenne** se concentrent davantage sur les **plages et les sédiments** (Carbery et al., 2020 ; Nel et al., 2020 ; Pasolini et al., 2023 ; Walther et al., 2024) que sur les **eaux de surface** (De Haan et al., 2022 ; Setälä et al., 2022).

Cependant, des **préoccupations ont été soulevées quant à la fiabilité des résultats obtenus par la science citoyenne** (Aceves-Bueno et al., 2017 ; van der Velde et al., 2017), soulignant l'importance des **procédures de vérification** pour minimiser les erreurs et améliorer la qualité des données. Un problème majeur se pose lors de l'**identification visuelle des MP**, qu'elle soit réalisée à l'œil nu ou à l'aide d'un stéréomicroscope, car la **grande variété de formes et de couleurs**, ainsi que le **degré de dégradation des particules**, peuvent conduire à une **sous-estimation ou une surestimation des résultats** (Song et al., 2015). Pour y remédier, la plupart des projets de science citoyenne précédents ont **limité la participation des bénévoles à la collecte d'échantillons**, laissant toutes les analyses ultérieures aux chercheurs en laboratoire.

En laboratoire, plusieurs **techniques analytiques avancées** sont utilisées. Les **méthodes spectroscopiques**, notamment la **spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR)** et la **spectroscopie Raman**, sont largement employées pour détecter les MP en fonction de leur **composition chimique** (Dong et al., 2023). Les **méthodes de coloration par fluorescence**, utilisant des colorants comme le **Nile Red (NR)** ou l'**iDye Pink**, sont également appliquées pour une détection visuelle supplémentaire. L'**analyse thermique** offre une approche alternative en identifiant les MP par leur **dégradation thermique**, qui entraîne la transition des MP de l'état solide à l'état liquide. Les techniques thermiques peuvent fournir des informations détaillées sur la composition, comme la **pyrolyse couplée à la chromatographie en phase gazeuse et à la spectrométrie de masse (py-GC/MS, Peñalver et al., 2020)** et la **calorimétrie différentielle à balayage (DSC, Lee et al., 2024)**, ou servir de **méthodes de détection visuelle rapide**, comme dans le cas du **test de l'aiguille chaude** (Beckingham et al., 2023).

Toutes ces techniques analytiques avancées sont **efficaces en conditions de laboratoire contrôlées**, mais leur **coût élevé** (Ribeiro et al., 2024), leur **temps d'analyse long** (la coloration peut prendre de 30 minutes à deux jours, Shruti et al., 2022), leur **dépendance à des équipements spécialisés** et la **nécessité d'opérateurs expérimentés** les rendent **inadaptées à une utilisation dans des projets de science citoyenne**.

Pour surmonter ces limitations, cette étude propose une **approche alternative** combinant l'**identification visuelle** avec une **technique thermique simplifiée**, s'appuyant sur la méthode précédemment explorée par **Kedzierski et al. (2021)**. Cela permet aux participants de **vérifier directement leurs observations sur le terrain**. Cette combinaison garantit que les bénévoles ne sont pas exclus du processus analytique, tout en **améliorant la fiabilité des données**.

À notre connaissance, un tel **protocole basé sur le terrain n'a jamais été mis en œuvre dans la recherche sur les microplastiques en science citoyenne**.

L'objectif de ce projet était de développer un **protocole simple, peu coûteux et adaptable sur le terrain** pour la science citoyenne, permettant d'**identifier et de quantifier les MP** en les distinguant des matières organiques sur la base de leur **température de fusion**. En particulier, les objectifs étaient :

1. **Concevoir et fabriquer un support dédié** pour la manipulation des échantillons.
2. **Développer une technique de confirmation par chauffage** en utilisant une exposition contrôlée en temps et température, basée sur des tests préliminaires en laboratoire.

3. **Tester le protocole complet** dans des conditions de terrain avec des bénévoles de différentes associations environnementales.

Matériel et méthodes

Développement d'un nouveau support expérimental en céramique

Conception et fabrication

La couleur **rose** a été choisie pour le développement du nouveau support expérimental. Cette couleur est **peu observée en mer** et augmente la **visibilité des particules transparentes et blanches** (Martí et al., 2020). La plaque en argile a été **moulée manuellement** à partir d'argile rose (Solargil®) pour former un carré plat de **70 × 70 mm** avec une épaisseur de **5 mm**. Des **cavités** ont été soigneusement pressées à la surface à l'aide d'un **tampon imprimé en 3D**, conçu avec SolidWorks (Howard, 2008), pour créer des cavités uniformes (**2 mm de profondeur**) permettant de placer les échantillons (voir les fichiers **.STL** dans les matériaux supplémentaires). Cette structure permet **l'analyse simultanée de 105 MP**. Après moulage, les plaques en argile ont été **séchées à température ambiante pendant 48 heures**, puis **cuites dans un four** (Nabertherm LHT 08/16) selon un programme de température contrôlé. Le processus de cuisson a commencé à **0 °C** et a été porté à **110 °C** à une vitesse de **100 °C/h**, avec un **temps de maintien d'1 heure**. La température a ensuite été augmentée en deux étapes successives : de **110 °C à 600 °C** et de **600 °C à 1 000 °C**, chacune avec une vitesse de chauffe de **200 °C/h** et un temps de maintien d'**1 heure**. Ces étapes de chauffage sont **fondamentales pour le traitement de la céramique**, impliquant :

- La **déshydratation des molécules d'eau**.
- La **carbonisation de la matière organique**.
- Enfin, le **processus de vitrification**, qui réduit la porosité et augmente la **résistance mécanique** (Dong et al., 2021 ; Johnson et al., 1988).

Cela garantit que les plaques en céramique sont **suffisamment robustes pour résister à des chauffages répétés**.

Comportement thermique du support céramique

Pour évaluer le **comportement thermique** des plaques en céramique dans les conditions utilisées lors des expériences de fusion des MP, le **transfert de chaleur** entre la source de chauffage et le nouveau support a été mesuré à l'aide de **trois thermocouples** (TC-08 Data Logger) et de **trois plaques en céramique différentes**. Les thermocouples ont été placés :

- Au **centre** de la plaque.
- Aux **extrémités droite et gauche**.

La température a été enregistrée **toutes les 30 secondes** sur une période de **30 minutes de chauffage** pour déterminer le temps nécessaire pour atteindre **200 °C**, qui englobe les températures de fusion du **PE (108–158 °C)** et du **PP (165–169 °C)** (Callister Jr et Rethwisch, 2020).

De plus, la **distribution thermique** sur les plaques a été enregistrée à l'aide d'une **caméra thermique (FLIR)**. Quatre plaques en céramique ont été placées sur une **plaque chauffante électrique de 50 × 50**

cm (Fisherbrand™ Isotemp™ Aluminium-Top Hotplate) préchauffée à **200 °C**, et une vidéo thermique a été enregistrée pendant **5 minutes**. Cette procédure a été répétée **deux fois**, ce qui a donné un **échantillon total de 8 plaques en céramique analysées**.

Étalonnage de la méthode de fusion

Collecte des échantillons de microplastiques

Dans le but de valider les **paramètres clés du protocole**, tels que la **température optimale** et la **durée d'exposition à la chaleur**, des MP ont été utilisés pour effectuer les **premières étapes des expériences en laboratoire**. Les particules de MP ont été collectées sur la **plage de Guidel Plage, en Bretagne sud, France (47,76802 °N, 3,52923 °O)** en **mars 2025**. Leur **composition chimique** a été déterminée à l'aide d'un **spectromètre infrarouge à transformée de Fourier à réflexion totale atténuée (ATR-FTIR Vertex70v, Bruker)**. Tous les spectres ont été enregistrés en mode **absorbance** dans la région **4 000–600 cm⁻¹**, avec une résolution de **4 cm⁻¹** et **16 balayages**. Chaque particule a été placée sur une **cellule en diamant de germanium (ATR Golden Gate)** pour être analysée (Kedzierski et al., 2019). Le spectre obtenu a été comparé au **spectre de référence** de l'étude de **Kedzierski et al. (2022)** pour identifier la composition polymérique des particules de MP. Comme les particules de **PE et PP** constituent la **majorité des MP collectés à la surface des océans** (Cincinelli et al., 2019), des MP appartenant à ces catégories chimiques ont été sélectionnés pour les tests suivants.

Validation de la température de fusion à l'aide de la DSC

Une **analyse par calorimétrie différentielle à balayage (DSC)** a été réalisée pour déterminer la **température de fusion exacte (T_m)** des MP, afin de compléter les observations de l'expérience visuelle de fusion et d'évaluer les **différences potentielles entre les particules pures et les particules environnementales dégradées**. Un **DSC3 Mettler Toledo** a été utilisé pour obtenir la température de fusion de **deux particules pures de PE et PP et quatre particules environnementales** (masse moyenne : **PE = 6,5 ± 0,3 mg** et **PP = 6,2 ± 0,3 mg**). Chaque particule, d'un poids d'environ **6 mg**, a été placée dans un **creuset en aluminium**. Les mesures ont été effectuées sous **atmosphère d'azote (N₂)** avec un débit de **50 ml/min** et un gradient de température allant de **-50 °C à 200 °C**, avec une vitesse de chauffage de **10 °C/min**.

Premier test de fusion : microplastiques de plage

Une expérience de fusion, à l'aide d'une **plaque chauffante**, a été menée pour préciser la **température optimale de fusion**. Pour chaque polymère (PE et PP), **15 fragments de MP** de la plage de Guidel Plage, de différentes couleurs et mesurant **3,87 ± 0,67 mm**, ont été placés individuellement dans une cavité de la plaque en céramique pour être photographiés dans une **boîte à lumière (Havox® HPB-80D)**. L'appareil photo (Nikon D850, AF-S VR Micro-Nikkor 105 mm f/2,8G IF-ED, ISO : 100, ouverture : f/3,2, vitesse d'obturation : 1/80) a été placé au-dessus de la boîte à lumière et fixé à un **statif de copie (KAISER RS2 XA Copy Stand, 40 × 50 cm)**. Ensuite, les plaques en céramique ont été placées sur une **plaque chauffante électrique** pour être chauffées. Partant de **130 °C** (température de fusion du PE, Callister Jr et Rethwisch, 2020), la température a été augmentée par **paliers de 10 °C** jusqu'à **220 °C**. À chaque température, la plaque en céramique a été maintenue pendant **20 minutes** avant d'être photographiée. Avec toutes les images obtenues, la **surface des MP** a été mesurée à l'aide du logiciel **ImageJ/FIJI** (Schindelin et al., 2012) pour calculer la **différence de déformation à chaque température**.

2 Essai pré-terrain : application du test de fusion aux microplastiques méditerranéens par des citoyens scientifiques en conditions de laboratoire

Échantillonnage des microplastiques

L'eau de surface a été échantillonnée dans le **nord-est de la mer Méditerranée** dans le cadre des activités de **science participative** de l'association **Expédition MED** (www.expeditionmed.eu) du **1er au 24 juillet 2024**. Un total de **10 échantillons** ont été collectés pour cette expérience à l'aide d'un **filet Manta avec un maillage de 330 µm**, avec une **ouverture rectangulaire de 60 × 20 cm** (Fig. 1). L'échantillonnage a été réalisé dans des **conditions calmes**, avec un **état de la mer de 1 à 2** et une **force du vent entre 0 et 2 sur l'échelle de Beaufort**. Le filet a été remorqué à une **vitesse moyenne de 2,625 ± 0,3 nœuds** pendant **30 minutes**. Un **débitmètre à hélice** a été fixé à l'ouverture, et le **volume filtré moyen** de chaque trait de filet Manta était de **318,50 ± 35 m³**. Entre chaque échantillon, le filet Manta a été rincé avec de **l'eau environnementale**. Les échantillons ont ensuite été transférés dans des **bocaux en plastique** et conservés dans un **mélange eau/éthanol (50/50, v/v)** pour être envoyés plus tard à **l'Institut de Recherche Dupuy de Lôme (IRD, Lorient, France)** pour analyse.

Extraction et caractérisation

Les échantillons de MP collectés ont d'abord été **tamisés par voie humide** pour séparer les particules en fonction de leur classe de taille. Une **cascade de tamis en acier inoxydable** avec quatre tailles de mailles différentes a été utilisée (**> 5 mm, 2–5 mm, 1–2 mm, 0,315–1 mm**) (Hidalgo-Ruz et al., 2012). Le tamisage par voie humide a été réalisé sous une **hotte à flux laminaire** avec **3 L d'eau distillée**. Les particules correspondant aux classes de taille **2–5 mm et 1–2 mm** ont ensuite été **comptées et classées** sous un **stéréomicroscope (Stemi 305, Carl Zeiss)** en fonction de leur **forme et couleur**, tandis que les particules de **0,315–1 mm** ont été stockées dans des **boîtes de Petri** avec de l'eau distillée pour une analyse future. Chaque boîte de Petri a été photographiée pour la **mesure des particules** à l'aide d'**ImageJ/Fiji**, et toutes les particules de chaque échantillon ont été **pesées** à l'aide d'une **balance analytique (XS205DU, Mettler Toledo)**. De plus, la **composition chimique de 112 particules** a été déterminée par **ATR-FTIR**, comme décrit précédemment.

Pour **minimiser les risques de contamination**, une **blouse de laboratoire en coton 100 %** et des **gants en nitrile** ont été portés, et les **vêtements synthétiques sous la blouse** ont été évités. Le **poste de travail** et tout l'**équipement** ont été nettoyés avec de **l'eau distillée, de l'éthanol et/ou de l'acétone**. Le **support d'échantillon pour l'analyse FTIR** a été nettoyé après chaque **10 mesures**. Les échantillons ont été **recouverts de papier aluminium**. Des **matériaux non plastiques (acier et verre)** ont été utilisés, une **blanc de procédure de laboratoire** a été réalisée, et les **seules particules de contamination détectées** provenaient des **éponges** utilisées pour nettoyer les matériaux.

Chauffage et analyse d'images

Pour chaque échantillon, le **nombre de particules identifiées par le bénévole comme étant des MP potentiels** a été compté (N). Pour réduire la charge de travail du processus de vérification et accélérer l'analyse pour le bénévole, une **approche d'échantillonnage partiel** a été appliquée. Pour les échantillons contenant **plus de 100 particules**, le nombre de MP à vérifier par le processus de

vérification par fusion a été déterminé à l'aide d'équations adaptées de Kedzierski et al. (2019) (Méthode supplémentaire S1 et tableau S1).

Pour chaque échantillon, les particules ont été **placées manuellement dans des cavités individuelles** de la plaque en céramique à l'aide d'une **pince métallique**. La plaque en céramique a été **photographiée avant le chauffage**, puis placée sur une **plaque préchauffée à 200 °C pendant 20 minutes**. Pendant la vérification par fusion, il convient de **faire attention à ne pas inhaler les fumées générées**. À cet égard, nous recommandons de **travailler dans un endroit bien ventilé** et d'**éviter de rester à proximité immédiate pendant le processus de chauffage**. Il est également conseillé de travailler sous une **hotte à flux laminaire**, si disponible, ou de porter un **respirateur adapté aux vapeurs de solvants**. De plus, les particules doivent être **manipulées avec soin** pour éviter leur dispersion par le vent dans des conditions **extérieures ou à bord**. La **déformation des particules** a été **observée visuellement** et notée à **5, 10, 15 et 20 minutes** pour enregistrer la progression de la fusion des particules. Après chauffage, la plaque en céramique a été retirée, laissée refroidir à température ambiante, puis replacée dans la boîte à lumière pour être photographiée. Les **deux images obtenues** (avant et après chauffage) ont été analysées avec le logiciel **Fiji** pour confirmer l'observation visuelle des particules **totale**ment fondues.

3 Mise en œuvre de la science citoyenne

Le **protocole développé en conditions de laboratoire** a été testé sur le terrain avec des **citoyens scientifiques**. Les bénévoles ont reçu le **même matériel** que celui utilisé en laboratoire, des **documents de support** et une **fiche de données** pour garantir la qualité des données (Hidalgo-Ruz et Thiel, 2015). Les documents de support comprenaient :

1. Un **guide de protocole simplifié et clair**.
2. Un **guide d'identification photographique des catégories de formes de MP**.
3. Une **feuille pour rapports de résultats**.

Avant l'expérience, une **démonstration des différentes étapes** a été présentée pour garantir la **standardisation**.

À la fin de chaque essai, un **questionnaire** a été créé pour recueillir des informations sur les participants et identifier les **améliorations potentielles du protocole**. Le questionnaire comportait **deux questions ouvertes et treize questions fermées**, organisées en **quatre catégories principales** :

- **Données sociodémographiques.**
- **Expérience.**
- **Motivation.**
- **Difficultés liées au protocole** (Tableau supplémentaire S2).

Essai pré-terrain avec une association locale

Un **essai pré-terrain préliminaire du protocole**, avec la participation de **11 bénévoles** des associations **Objectif Dune, Observatoire du Plancton et Les Mains dans le Sable**, a été mené à **Gavres, en Bretagne sud, France (47,69662 °N, 3,35308 °O)** en **mai 2025**. L'objectif était de **mettre en œuvre le protocole**

avec des bénévoles pour la première fois, d'identifier les difficultés potentielles et d'évaluer les étapes à améliorer avant l'essai final. Pour cette analyse, les bénévoles ont reçu **six échantillons préparés** (Tableau 1), chacun contenant de **l'eau distillée avec une concentration contrôlée de MP et de particules organiques et inorganiques naturelles**. Les MP collectés sur la plage de Guidel Plage (voir section 2.2.1) ont été **mesurés et classés individuellement** en fonction de leurs **caractéristiques morphométriques**. Des **matériaux naturels supplémentaires**, notamment des **algues, du bois flotté et des fragments de coquillages**, ont été incorporés pour simuler des **conditions de terrain réalistes**.

Tableau 1 : Contenu de chaque échantillon préparé, incluant des **concentrations contrôlées de microplastiques**, ainsi que des **particules organiques et inorganiques naturelles** (GP = plage de Guidel).

Échantillon	MP (nombre)	Abondance de PE	Abondance de PP	Matériel naturel (nombre)
GP25-01	10	7	3	10
GP25-02	10	6	4	100
GP25-03	50	39	11	50
GP25-04	100	64	36	10
GP25-05	100	72	28	100
GP25-06	50	32	18	10

Essai final sur le terrain avec Expédition MED

L'essai final du protocole a été réalisé du **5 au 8 août 2025**, lors de la **campagne 2025 organisée par l'association Expédition MED**, avec **19 échantillons collectés et analysés par 28 bénévoles** (Fig. 1). L'échantillonnage a suivi les méthodes décrites dans la section 3, avec une **vitesse de remorquage de $2,94 \pm 0,4$ nœuds** dans des **conditions maritimes modérées** (force du vent 3, état de la mer 3). Un **léger ajustement** a été apporté aux **classes de taille des tamis**, en utilisant **2,5–5 mm et 1–2,5 mm** au lieu de **2–5 mm et 1–2 mm**.

Analyse des données

Les données ont été présentées sous forme de **moyennes $\pm$ erreurs standards**. Avant l'analyse, les données ont été testées pour la **normalité et l'homogénéité**. Des **tests de Wilcoxon par paires** ont été effectués pour déterminer :

- La **température de fusion optimale** pour deux polymères différents (PE et PP).
- La **distribution de la température** au sein de chaque plaque en céramique (**variations intra-plaque**) dans **cinq emplacements spatiaux** (en bas à droite, en bas à gauche, au centre, en haut à droite, en haut à gauche).

Pour comparer les différences entre les plaques (**variations inter-plaques**) à chaque emplacement spatial, des **tests de Kruskal-Wallis** ont été réalisés sur les **huit plaques en céramique**.

Pour évaluer la **précision d'identification des bénévoles**, les particules ont été catégorisées en fonction de leur réponse à la **méthode de vérification par fusion** comme suit :

- **Vrais positifs (VP)** : Particules identifiées comme microplastiques par les bénévoles et **confirmées comme plastiques** (c'est-à-dire qu'elles ont fondu pendant le test).
- **Faux positifs (FP)** : Particules identifiées comme microplastiques par les bénévoles et **non confirmées** (c'est-à-dire qu'elles n'ont pas fondu).

Lors de l'**essai pré-terrain préliminaire**, la **quantité initiale de MP dans chaque échantillon était connue**, permettant le calcul des **faux négatifs (FN)**, définis comme des particules **identifiées comme non-MP par les bénévoles mais qui étaient en réalité du plastique**. Les **vrais négatifs (VN)** étaient définis comme des particules **identifiées comme non-MP et confirmées comme non plastiques**.

En revanche, pour les **échantillons 2024 et 2025 d'Expédition MED**, les **faux négatifs et vrais négatifs n'ont pas été considérés**, car seules les particules **identifiées comme MP par les bénévoles** lors du tri ont été retenues pour l'analyse.

Un **taux d'erreur** a ensuite été calculé comme la proportion de **faux positifs par rapport à toutes les particules identifiées comme MP par les bénévoles** :

$$\text{Taux d'erreur} = \frac{FP}{VP + FP} \times 100$$

où **VP + FP** correspond au **nombre total de particules initialement identifiées comme MP par les bénévoles**.

Pour tenir compte de l'**échantillonnage partiel** (voir section 2.3.3) dans les échantillons répertoriés dans le **tableau supplémentaire S1**, un **score d'ajustement** a été calculé pour estimer le **nombre total de vraies particules analysées**. Le score d'ajustement a été défini comme le **ratio entre le nombre total de particules identifiées comme MP (N) et les particules sous-échantillonnées (n) analysées pour la vérification par fusion** :

$$\text{Score d'ajustement} = \frac{N}{n}$$

Lorsque **toutes les particules d'un échantillon ont été vérifiées** et qu'**aucun sous-échantillonnage n'a été appliqué**, le score d'ajustement était **égal à 1**. Pour les cas sous-échantillonnés, le **nombre de MP ajustés** a ensuite été estimé en divisant le **nombre de particules confirmées par fusion (VP)** par ce **score d'ajustement** :

$$\text{MP ajustés} = \frac{VP}{\text{Score d'ajustement}}$$

Cet ajustement a garanti que les **résultats de vérification** étaient **représentatifs de l'échantillon complet**.

Des **tests de corrélation de Kendall** ont été réalisés pour examiner les différences dans les **moyennes des faux positifs** par rapport à l'**abondance initiale de particules identifiées comme MP**. Des **tests de**

Wilcoxon (pour les données non paramétriques) et des **tests t** (pour les données paramétriques) ont été effectués pour évaluer les différences dans les **moyennes des faux positifs** entre les **classes de taille**. Toutes les analyses statistiques ont été réalisées à l'aide de **R 4.3.2** (R Core Team, 2020), avec un **seuil $\alpha = 0,05$** pour évaluer la **significativité statistique**.

Résultats

1 Optimisation du protocole

Température et durée d'exposition optimales

La **température de fusion moyenne** mesurée à l'aide de la **DSC** variait de **108 °C à 158 °C** pour les particules de **PE** collectées sur la plage de Guidel, tandis que celle du **PP** se situait entre **165 °C et 169 °C**. Ces valeurs correspondent étroitement à celles de la **littérature scientifique** (Lynch et al., 2024 ; Majewsky et al., 2016 ; Sorolla-Rosario et al., 2022) et montrent que, sur cet aspect particulier, **peu de différences existent entre les échantillons environnementaux et de référence**.

La **déformation des particules de MP de PE et PP** étudiées sous une **chaleur croissante** pour déterminer la température de fusion des deux polymères a montré le **même schéma global**. La **déformation de surface des particules de PE** commence à des **températures plus basses** (Fig. S1a), avec des déformations **statistiquement significatives** observées entre **140 °C et 150 °C**, et entre **150 °C et 160 °C** ($p = 0,02$ et $p = 0,04$, respectivement). Après **160 °C**, les particules ont atteint leur **déformation maximale**, sans aucun changement supplémentaire observé. En comparaison, l'**altération des particules de PP** commence à des **températures plus élevées** (Fig. S1b), avec une déformation **statistiquement significative** entre **180 °C et 190 °C** ($p = 0,04$). Il est important de noter que **aucune des particules polymères testées n'a présenté de température de fusion supérieure à 200 °C**. Cette température a donc été choisie comme **température maximale pour le protocole de fusion**.

Les **tests de Wilcoxon par paires** ont révélé des **différences significatives** ($p < 0,05$) entre les **emplacements intra-plaque**, indiquant une **hétérogénéité dans la distribution de la température**. Par exemple, à **30 minutes**, la température moyenne enregistrée sur les **trois plaques en céramique testées** était de **190 ± 11 °C**, mesurée par le **capteur central**. Le capteur droit a atteint **188 ± 21 °C**, tandis que le capteur gauche est resté plus bas à **174 ± 8,1 °C** (Fig. 2). En moyenne, la **position centrale** est **8,55 °C plus chaude** que les bords. De plus, les **tests de Kruskal-Wallis** ont également montré des **différences inter-plaques extrêmement significatives** ($p < 0,001$) sur tous les emplacements, indiquant une **forte variabilité entre les plaques**. Ces variations dans la **distribution de la température**, observées à la fois au sein des **plaques en céramique individuelles (variations intra-plaque)** et entre les **différentes plaques (variations inter-plaques)**, reflètent les **irrégularités inhérentes au processus de fabrication artisanale** du support en céramique.

Malgré ces irrégularités, **toutes les MP ont fondu en moins de 20 minutes** (Fig. 2). Toutes les particules de **PE ont fondu rapidement en moins de 5 minutes**, tandis que les particules de **PP ont fondu après**, nécessitant entre **8 et 16 minutes** pour fondre complètement. Ces résultats indiquent que la température atteinte était **suffisante pour dépasser les points de fusion des deux polymères**. Par conséquent, une **durée de chauffage de 20 minutes à 200 °C** est **adéquate** pour garantir une **fusion complète des particules de PE et PP**.

✓ Validation du protocole en laboratoire : application aux échantillons d'Expédition MED (2024)

Des **plastiques** ont été trouvés dans tous les échantillons ($n = 10$) d'Expédition MED (année 2024). Un total de **926 particules visuellement identifiées comme des MP potentiels** ont été collectées. L'abondance de plastiques par échantillon variait de **6 à 320 particules**, où la **classe de taille 1–2 mm** était la **plus abondante (64 %)**, suivie de celles dans la plage **2–5 mm (30 %)** (Fig. S2a). La **catégorie de forme prédominante** dans tous les échantillons était les **fragments (50,4 %)**, suivis des **films (38 %)**, des **filaments (7,4 %)** et des **mousses (4 %)** (Fig. S2b). Les filaments étaient présents dans tous les échantillons sauf un. **Onze couleurs** ont été notées, avec deux nouvelles couleurs ajoutées (rose et gris), tandis que le **transparent** était la **couleur la plus courante (54 %)**, suivi du **blanc (21 %)**. Les autres couleurs représentaient **moins de 10 %** (Fig. S2c). Au total, **trois polymères distincts** ont été identifiés par **analyse ATR-FTIR** : le **PE** et le **PP** étaient les **polymères les plus abondants (64 % et 30 %, respectivement)**, suivis du **PS (6 %)** (Fig. S2d).

Toutes les particules identifiées comme des **MP potentiels** ont été testées selon le **protocole de fusion** pour valider leur identification. En conséquence, **883 particules ont fondu** et **43 sont restées non fondues**, indiquant la présence d'**erreurs d'identification visuelle**, ce qui donne un **taux d'erreur de 4,64 %** (Fig. 3).

Parmi les **43 particules restantes**, certaines (**46,5 %**) ont été **visuellement identifiées comme des débris organiques**. Ces particules n'ont montré **aucune déformation visible ni changement de couleur**, suggérant une **mauvaise identification** lors du processus de tri initial, probablement en raison de leur **similitude de forme et de couleur** avec les autres MP.

Une autre partie correspondait à des **MP (53,5 %)** qui étaient **visuellement identifiables en raison d'un léger changement de couleur ou de taille**. La plupart de ces **particules de MP non fondues** étaient des **fragments noirs et des films transparents**. Leur persistance est probablement due à un **contact insuffisant avec la surface en céramique chauffée**, ce qui limite le transfert de chaleur et empêche une **fusion complète**.

Concernant la **classe de taille**, le **taux d'erreur moyen** pour les **2–5 mm** était de **$0,06 \pm 0,08$** et pour les **1–2 mm** de **$0,04 \pm 0,04$** , sans **différence significative entre les groupes ($W = 55$, $n = 20$, $p = 0,72$)**. De même, aucune **différence significative** n'a été trouvée entre le **taux d'erreur** et l'**abondance des particules ($Z = 0,03$, $n = 20$, $p = 0,067$)**, allant de **0 % dans l'échantillon contenant le moins de particules** à **0,04 % dans l'échantillon avec la plus forte abondance**.

La plupart des particules (**66 %**) ont fondu **dans les cinq premières minutes**, suivies de **25 % en dix minutes** et de **4 % entre 15 et 20 minutes** (Fig. S3). Ces résultats indiquent que la plupart de l'échantillon était composée de **PE**, qui fond en **moins de cinq minutes**, avec une **plus petite portion de PP**, nécessitant **plus de cinq minutes** pour fondre, comme montré dans la section précédente. Cette interprétation est **cohérente avec les résultats FTIR** (Fig. S2d).

2 Essai pré-terrain préliminaire dans le cadre du protocole de science citoyenne

Lors de l'**essai pré-terrain en mai 2025**, un total de **120 particules** collectées sur la plage de Guidel ont été analysées par des bénévoles. Les bénévoles ont analysé des échantillons contenant des **quantités connues de MP**, identifiant **122 particules comme MP** dans tous les échantillons. Après le **protocole de fusion**, **75 particules ont fondu** et **47 sont restées non fondues**. Sur la base du **nombre initial de**

MP, le **taux de faux négatifs** était de **37,5 %**, correspondant à un **taux de récupération** de **62,5 %**. Cependant, les **comptages visuels rapportés par les bénévoles** étaient **constamment plus élevés** que le **nombre réel de particules initialement présentes** (Fig. 4). Cela indique que la **perte de particules pendant le tamisage** était **plus que compensée par la mauvaise identification des débris non plastiques** lors du tri visuel (faux positifs). Par conséquent, les résultats montrent une **tendance à la surestimation de l'abondance des MP**.

Les **plus grandes erreurs d'identification** se sont produites dans les échantillons **GP25-3 et GP25-6** (Fig. 4), qui contenaient le **plus grand nombre de MP (n = 50)**. Cependant, l'**interaction entre le taux de faux négatifs et les comptages initiaux de particules** dans les échantillons (c'est-à-dire, MP mélangés avec du matériel naturel) **n'était pas statistiquement significative (tous p > 0,1)**, probablement en raison de la **petite taille de l'échantillon (n = 4)**. Concernant la **taille des particules**, un **taux d'erreur moyen plus élevé** a été noté dans la fraction **1–2 mm ($0,515 \pm 0,360$)**, par rapport à **$0,215 \pm 0,255$** dans la fraction **2–5 mm**, mais aucune **différence significative** n'a été observée (**t = 1,3619, n = 4, p = 0,227**).

Concernant les **temps de fusion**, la majorité des particules identifiées comme MP ont fondu **en moins de cinq minutes (59 %)**, suivies de **23 % en dix minutes**, **14 % en quinze minutes** et **4 % en vingt minutes** (Fig. S4). Les résultats des bénévoles reflètent le **schéma global de composition polymérique**. Le **PE est resté le polymère dominant**, avec une **légère sous-estimation** par rapport au **comptage initial de 84 %**, tandis que le **PP représentait 41 %**, avec une **légère surestimation** par rapport au **comptage initial de 36 %**.

3 Essai final sur le terrain avec Expédition MED 2025

Des **MP ont été trouvés dans tous les échantillons** collectés à la surface de la mer Méditerranée en **2025 (n = 19)**, avec une **abondance de plastiques** allant de **1 à 594 particules**. Un total de **3 648 particules identifiées comme des plastiques potentiels** ont été collectées, dont **227 appartenaient à la classe de taille > 5 mm** (mésoplastiques et macroplastiques), et **3 421 particules étaient des MP potentiels**. Parmi les MP, les particules de la **classe de taille 1–2,5 mm** étaient les **plus abondantes (65 %)**, suivies de celles de la **classe 2,5–5 mm (27 %)** (Fig. S5a). La **catégorie de forme prédominante** dans tous les échantillons était les **fragments (60,5 %)**, suivis des **films (29 %)**, des **filaments (9 %)**, des **mousses (1 %)** et des **granulés (0,5 %)** (Fig. S5b). Concernant la couleur, le **transparent était la couleur la plus courante (37 %)**, suivi du **blanc (20 %)**. Le noir, le multicolore, le jaune, le vert, le bleu et l'orange représentaient **moins de 10 % chacun**, tandis que le marron et le rose représentaient **moins de 5 %** (Fig. S5c).

Parmi les **3 421 particules testées**, **3 119 ont fondu** pendant l'étape de **vérification par chauffage**, ne laissant que **302 particules non fondues**, correspondant à un **taux d'erreur de 8,8 %**. Cependant, **49,1 % de ces particules restantes** ont été **visuellement identifiées comme des microplastiques** (c'est-à-dire des films transparents et des filaments colorés) qui n'avaient **pas fondu en raison d'un contact insuffisant avec la plaque en céramique chauffée**.

Certains échantillons (**EM25-13, EM25-41 et EM25-21**), qui présentaient les **concentrations les plus élevées de MP** et les **particules les plus petites**, ont montré les **plus grandes différences** entre les particules **initialement identifiées comme MP** et celles **confirmées comme MP après le test de fusion** (Fig. 5). La plupart des particules ont fondu **en moins de dix minutes (85 %)** (Fig. S6). Cependant, aucune **différence significative** n'a été trouvée entre :

- Le **taux de faux positifs** et la **classe de taille (W = 187,5, p = 0,62)**.

- Le **taux de faux positifs** et l'**abondance initiale de particules** ($Z = 0,7$, $p = 0,4$).

Discussion

1 Un nouvel outil de détection des microplastiques pour aider la science citoyenne

L'**identification visuelle des MP** est sujette aux **faux positifs**, en particulier dans les échantillons avec une **abondance élevée de particules**, car c'est une étape **longue et donc sujette à l'erreur humaine** (Song et al., 2015). Des **observations similaires** ont été faites dans notre étude, dans la mesure où le **taux d'erreur d'identification** sous une **loupe binoculaire** avait tendance à être **plus fréquent dans les échantillons contenant plus de 400 particules par échantillon**, ainsi que dans les **particules de la classe de taille 1,0–2,5 mm**.

De plus, la **teneur élevée en matière organique** observée pendant les **mois de printemps et d'été**, en particulier le **plancton** (Collignon et al., 2014 ; Collignon et al., 2012), a rendu le **processus de tri plus difficile** en augmentant le **nombre de particules non plastiques** dans les échantillons. En particulier, les **fragments transparents de Posidonia oceanica**, très répandus en mer Méditerranée (Alomar et al., 2024 ; Stipcich et al., 2024), ont été **fréquemment mal identifiés par les bénévoles comme des films de MP transparents**. D'autres matériaux naturels comme les **cristaux de sel** ont également été **parfois confondus avec des plastiques** par les bénévoles en raison de leurs **formes irrégulières et de leur couleur blanche**.

Des matériaux confondants similaires, comme le **charbon et le quartz**, ont été largement signalés comme causant une **surestimation des concentrations de MP**, allant de **20 % à 70 %**, en l'absence d'**analyse de vérification** (Eriksen et al., 2014 ; Hidalgo-Ruz et al., 2012 ; Lenz et al., 2015 ; Löder et al., 2015). Ces facteurs confirment la **nécessité d'un outil simple** pour aider les bénévoles à **confirmer la nature des particules collectées** de manière **simple et peu coûteuse**. Ces observations ont conduit au **développement d'un outil fiable pour la détection des MP** dans cette étude.

Le **développement de la plaque en céramique** a été motivé par la nécessité d'un **support** qui :

- **Facilite l'observation individuelle des particules.**
- **Résiste à des températures élevées.**
- **Reste peu coûteux, accessible et reproductible.**

Cela répond aux **limites des matériaux couramment utilisés** dans la recherche sur les MP :

- Les **boîtes de Petri**, qui **ne séparent pas les particules**.
- Les **microplaques**, qui sont **en plastique** (Kedzierski et al., 2019).

Pour cette étude, **plus de 80 plaques en céramique** ont été produites et testées, démontrant une **stabilité thermique** et atteignant une température **proche de 200 °C**. Malgré quelques **limitations mineures**, les plaques en céramique offrent **plusieurs avantages clés** d'un point de vue technique :

- Le **nouveau support** permet une **organisation claire des particules**.
- Il **résiste à une exposition répétée à haute température jusqu'à 200 °C sans déformation**.

- Il peut être **chauffé jusqu'à 900 °C** (Geng et Sun, 2018), permettant l'étude de **polymères avec des points de fusion plus élevés**.
- Sa **conception est entièrement personnalisable** : la taille des cavités et l'épaisseur de la plaque peuvent être ajustées pendant la fabrication pour répondre à des **exigences expérimentales spécifiques**.
- Il est fabriqué à partir d'un **matériau peu coûteux et accessible** (environ **0,04 € de coût matériel par plaque en céramique**).
- **Les bénévoles des associations environnementales, des écoles ou des groupes communautaires** peuvent **participer activement à la fabrication de ces plaques**.

Par conséquent, le **support en plaque céramique** représente une **alternative fiable, durable et adaptable** pour un projet de science citoyenne sur l'**identification des MP**.

Par rapport à d'autres **méthodes de vérification thermique** comme le **test de l'aiguille chaude**, notre approche présente des **avantages significatifs** :

1. Le protocole offre un **temps d'analyse modéré** et est particulièrement adapté aux **environnements marins très pollués**, comme la mer Méditerranée, où **plus de 400 particules** peuvent être présentes dans un seul échantillon.
2. Alors que le **test de l'aiguille chaude** est limité à la **détection des MP un par un**, ce qui prend beaucoup de temps pour de **grands ensembles de particules**, notre approche permet de travailler **directement sur 105 particules par plaque en céramique**. Cela convient bien aux projets de science citoyenne, où les bénévoles analysent généralement **un à deux échantillons de filet Manta avec des dizaines ou des centaines de plastiques par jour**.

Cependant, une **limitation des campagnes sur le terrain (Expédition MED 2024 et 2025)** est que le **taux de faux négatifs n'a pas pu être calculé**. Contrairement à l'essai pré-terrain, les **échantillons marins réels contiennent une quantité inconnue et élevée de débris non plastiques**, ce qui les rend **difficiles à analyser à bord**. À l'avenir, un **sous-ensemble de ces particules non sélectionnées** pourrait être collecté et analysé pour **quantifier le taux de faux négatifs**.

Parmi les **autres limitations du protocole identifiées à ce stade**, il est possible de mentionner les **variations des temps de fusion observées**. Ces phénomènes pourraient s'expliquer par :

- Les **irrégularités de fabrication des plaques en céramique**.
- Les **différences de composition polymérique** (par exemple, la présence d'impuretés ou d'additifs) (Majewsky et al., 2016 ; Rodríguez Chialanza et al., 2018 ; Sorolla-Rosario et al., 2022).
- La **forme des particules**.

Ce dernier aspect semble être le **principal facteur de confusion**. En effet, en raison de leur forme, des particules comme les **filaments** ont parfois une **surface de contact très faible avec le substrat en céramique**, ce qui peut entraîner un **retard ou une fusion incomplète**. Pour atténuer ce problème, des **techniques de placement**, comme **aplatir les filaments pour maximiser la surface de contact**, pourraient améliorer la fusion. De plus, un **couvercle** pourrait être intégré dans les **conceptions futures**.

Néanmoins, malgré cette **variabilité**, le protocole reste **fiable**. Par conséquent, l'intégration d'une **étape de vérification par fusion rapide** a permis de **réduire les faux positifs**, faisant chuter le **taux d'erreur à seulement 8,8 %**.

Notre méthode a été spécialement conçue pour les **principaux polymères rencontrés à la surface de l'eau** (Cincinelli et al., 2019), notamment le **PE et le PP**. Elle permet la **détection des particules plastiques en 20 minutes à une température de 200 °C**. Dans notre expérience, **plus de 60 % des particules ont fondu dans les cinq premières minutes**, avec une **fraction supplémentaire fondant en dix minutes**, fournissant une **estimation rapide de l'abondance de PE et PP**, respectivement.

Bien que le ciblage du **PE et du PP** soit en accord avec la **composition dominante des eaux de surface méditerranéennes**, cela représente une **limitation lors de la comparaison des jeux de données avec des études de laboratoire** qui analysent une **diversité polymérique plus large**. Cependant, la **flexibilité de cette vérification thermique** permet des **adaptations futures**. Par exemple, l'introduction d'un **point d'observation intermédiaire à environ deux minutes** pourrait permettre une **classification plus fine** en distinguant le **polyéthylène basse densité (LDPE ; 109–110 °C)** et le **polyéthylène haute densité (HDPE ; 125–139 °C)** (Lee et al., 2024 ; Sorolla-Rosario et al., 2022). De plus, le protocole peut être étendu pour inclure des **polymères avec des températures de fusion plus élevées**, comme le **PA (220,56 ± 0,49 °C, Lee et al., 2024)**. Dans ce cas, l'étape de chauffage peut être effectuée à des **températures plus élevées**, car la plaque chauffante utilisée permet de régler jusqu'à **400 °C** (c'est-à-dire la température utilisée pour nettoyer nos plaques en céramique) et au-delà.

Notre approche **garantit la fiabilité des travaux basés sur la science participative**. Elle démontre que les **initiatives de science citoyenne**, lorsqu'elles sont combinées à des **étapes de vérification basées sur des méthodologies rigoureuses développées par des scientifiques**, peuvent générer des **données robustes et dignes de confiance**. Par conséquent, les **jeux de données collectés sur le terrain** peuvent être **directement comparés** à ceux produits par la **recherche en laboratoire**, renforçant ainsi la **valeur scientifique de la science citoyenne dans la surveillance des MP en surface de la mer**.

2 Retour d'expérience sur le travail avec les bénévoles

Participation et faisabilité

Le protocole a été mis en œuvre dans **quatre associations environnementales différentes** et testé par **39 bénévoles** âgés de **moins de 18 ans à plus de 65 ans**, issus de **milieux sociodémographiques variés** (Tableau S3). Certains participants avaient une **expérience préalable** dans des projets de science citoyenne, tandis que d'autres non. Néanmoins, **tous les bénévoles** ont été capables de **comprendre et de suivre avec succès les instructions du protocole**, démontrant qu'il **ne nécessite pas de compétences préexistantes** et est **accessible à un large éventail de participants**.

Certains **défis** ont été observés lors de **deux étapes plus complexes** :

1. **La catégorisation des MP**, qui était **peu familière à de nombreux participants (50 % ont déclaré n'avoir aucune expérience préalable)**.
2. **Déterminer quand une particule avait réellement fondu**, car les particules présentent des **comportements différents pendant le chauffage**, comme :
 - **Rétrécissement.**

- **Changement de forme ou de surface** sans **liquéfaction complète**.

Les **différences de performance** entre l'**essai pré-terrain** (où les bénévoles n'avaient qu'un **seul après-midi de formation**) et l'**essai final** (qui a bénéficié d'une **semaine complète de pratique**) soulignent le **rôle crucial de la formation** pour réduire les **taux d'erreur d'identification des MP** dans ces tâches plus complexes. Des **résultats similaires** ont été rapportés dans l'étude de **van der Velde et al. (2017)**, où il a été observé que des **formations sur plusieurs jours** dans la **collecte des déchets marins** produisent de **meilleures performances** que les sessions d'une seule journée.

Les **difficultés et les performances des participants** soulignent l'importance d'une **formation structurée, en présentiel**, avec :

- **Des démonstrations.**
- **Un soutien.**
- **Des exercices pratiques sur le terrain.**

Ces éléments sont **essentiels pour minimiser les erreurs** et garantir une **qualité élevée des données** (Kawabe et al., 2022). En plus de la formation, des **étapes de validation simples**, comme :

- **Avoir un participant expérimenté.**
- **Associer les participants pour croiser les observations.**

peuvent **améliorer davantage la robustesse et la fiabilité des données** (Balázs et al., 2021).

Il est important de noter que les bénévoles ont trouvé le protocole **facile à suivre** et ont **apprécié l'activité elle-même**. Beaucoup étaient motivés par :

- **L'opportunité d'apprendre de nouvelles compétences.**
- **Contribuer à un projet scientifique.**
- **S'engager dans la protection de l'environnement.**

En maintenant les activités de terrain **ludiques, engageantes et gérables**, les participants à la science citoyenne sont **plus susceptibles de rester engagés**, ce qui permet des **programmes de surveillance répétés et à grande échelle** (van Noordwijk et al., 2021). Dans l'ensemble, ces résultats suggèrent que le protocole est **faisable**, capable de produire des **résultats robustes**, et offre également une **nouvelle expérience positive et motivante** pour les participants.

Limites

Certaines **variations de température** ont été observées lors de l'utilisation des **plaques en céramique**, en particulier entre les **positions centrale et périphérique**, en raison d'un **contact inégal avec la source de chauffage**. Des **améliorations dans la production** devraient être apportées pour **minimiser les irrégularités de fabrication** affectant l'**épaisseur et la planéité des plaques**. En particulier, des **améliorations pendant le processus de séchage** seront cruciales pour améliorer la qualité des plaques en céramique, car de **grandes quantités d'eau sont éliminées**, entraînant une **perte de masse et une contraction du matériau** (Zaccaron et al., 2024). Potentiellement, le fait de **placer la plaque en céramique sur une grille de refroidissement** et d'**ajouter un objet léger sur la plaque** pourrait

améliorer l'**aplatissement**, permettant la **diffusion de l'eau et l'évaporation en surface** (Zaccaron et al., 2021).

Impliquer des personnes qui peuvent **ne pas avoir d'exposition préalable aux pratiques scientifiques** est **extrêmement précieux**, mais cela s'accompagne également de **défis**. De nombreux participants peuvent **sous-estimer la quantité de temps, d'attention et d'énergie** nécessaires pour accomplir des tâches complexes. La **fatigue des bénévoles** était l'une des **principales limitations** rencontrées lors du travail avec la science citoyenne. Des activités comme :

- **Le halage du filet Manta.**
- **L'identification de petites particules dans des conditions climatiques difficiles.**

nécessitent **des efforts et de la concentration**, et la fatigue peut entraîner une **attention réduite** et, très probablement, une **augmentation des taux d'erreur**. Les **facteurs démographiques** jouent également un rôle, car les **bénévoles plus âgés** peuvent rencontrer **plus de difficultés** avec des tâches nécessitant une **acuité visuelle ou une force physique** par rapport aux **participants plus jeunes**.

Pour aider à surmonter ces limitations, des alternatives comme :

- **Utiliser une loupe fixe de grande taille**, plutôt qu'un stéréomicroscope, qui peut **provoquer le mal de mer chez certains participants**.

peuvent rendre l'**identification visuelle moins exigeante physiquement**. Pour maintenir une **qualité élevée des données** et réduire le risque d'**abandon des bénévoles**, il est conseillé de **diviser les activités complexes** en des tâches qui prennent **moins de temps et d'efforts** (Rambonnet et al., 2019). En particulier, les bénévoles devraient **faire tourner leurs rôles et changer d'activité toutes les 30 minutes** pour éviter la fatigue liée à l'exécution de la même tâche pendant de **longues périodes**.

Une autre **limitation clé** était les **conditions environnementales**. En effet, il est bien connu que lors de la **collecte des MP flottants en mer**, des paramètres comme :

- **La vitesse du vent.**
- **La hauteur des vagues.**
- **La présence de matériel organique.**

peuvent **affecter significativement** l'échantillonnage avec un **filet Manta** (Setälä et al., 2022). Des **vitesse de bateau dépassant 3 nœuds** peuvent **déstabiliser le Manta**, tandis que des **hauteurs de vagues élevées** peuvent faire **sortir intermittamment le débitmètre de l'eau de surface**, entraînant des **estimations inexactes du volume total filtré** (Pasquier et al., 2022). Ces défis étaient **particulièrement présents** lors de la **campagne 2025 d'Expédition MED** en mer Méditerranée, où nous avons rencontré des **états de mer allant jusqu'à 1,0 m**, et où il est connu que les vagues peuvent atteindre des **hauteurs allant jusqu'à 1,25 m** (Barbariol et al., 2021).

Lors de l'**analyse des particules qui peuvent être des MP**, la **vérification par fusion doit être effectuée à l'extérieur du bateau** pour éviter de **respirer les fumées toxiques** qui pourraient être produites lorsque les particules fondent. De plus, il est **plus sûr de travailler avec la plaque chauffante dans des conditions calmes**. Par conséquent, une **manipulation et une manipulation prudentes dans des conditions extérieures** sont **essentiels**, en particulier sous **de forts vents**, pour éviter la **perte de particules** en raison de leur **faible poids** (Liu et al., 2025). Alternativement, la **vérification par fusion** peut être effectuée à l'intérieur d'une **boîte transparente** pour **minimiser la perte de particules**.

Par conséquent, des **conditions météorologiques calmes** garantiront à la fois :

- **La précision de la collecte des échantillons.**
- **L'analyse par les bénévoles** en réduisant leur **demande physique**.

3 Résultats des missions en mer Méditerranée

Amélioration du potentiel des campagnes de science citoyenne

L'une des **leçons clés** tirées de ce nouveau protocole est que cette **étape de vérification**, qu'elle soit **sur terre ou en mer**, permet la **production de jeux de données finalisés en seulement quelques mois**. En revanche, d'autres études de science citoyenne (De Haan et al., 2022 ; Jones et al., 2025 ; Nel et al., 2020 ; Pasolini et al., 2023 ; Setälä et al., 2022 ; Walther et al., 2024), qui s'appuient sur des **analyses de laboratoire par des chercheurs**, montrent un **délai plus long entre l'échantillonnage et la publication des données** (Fig. 6).

Dans notre cas, les **données collectées et analysées sur le terrain** lors de la **campagne 2025 d'Expédition MED** en mer Méditerranée ont été **traitées en seulement deux mois** :

- **Un mois dédié à l'échantillonnage et à l'acquisition des données sur le terrain.**
- **Un mois pour analyser les résultats.**

Cette **dépendance à l'analyse d'experts en laboratoire**, plutôt qu'à une **analyse directe sur le terrain par des bénévoles formés**, peut **prolonger les délais des projets** en raison de la nécessité de :

- **Transport et stockage des échantillons**, un processus qui **augmente le risque de perte de particules ou de dégradation des échantillons** (Isobe et al., 2019).
- **L'analyse et la gestion des données sur les MP**, qui peuvent être **longues**.

Cela se traduit souvent par des **retards de plusieurs années**, en particulier dans les **projets de surveillance à long terme** (Danopoulos et al., 2023). De plus, l'obtention d'une **haute résolution spatiale** nécessite un **échantillonnage intensif** sur de **multiples sites**. Lorsqu'il est combiné avec une **analyse en laboratoire**, ces **contraintes de temps** peuvent limiter à la fois :

- **Le nombre d'échantillons qui peuvent être traités.**
- **L'étendue géographique qui peut être surveillée** (Stock et al., 2020).

Ce **délai** complique également l'**interprétation des tendances temporelles** de la concentration des MP en surface de la mer. Par conséquent, les **concentrations rapportées** décrivent généralement des **conditions passées** plutôt que **l'état de l'environnement au moment de la publication**.

En comparaison, le **protocole développé** permet aux **données collectées en 2025 d'être présentées dans la même année**, fournissant une **représentation à jour de l'état actuel des concentrations de MP**. Cela est particulièrement **critique**, car la **distribution des MP varie dans le temps** en raison de :

- **L'impact des conditions hydrodynamiques.**
- **La circulation saisonnière** influençant leur transport (Kukulka et al., 2012 ; Pedrotti et al., 2022 ; Zayen et al., 2020).

- **Leur abondance** impactée par :
 - Les **apports fluviaux**.
 - Les **événements épisodiques** comme les tempêtes et les inondations.
 - Le **tourisme saisonnier** (Cincinelli et al., 2019 ; Philip et al., 2025).

Surveillance par les citoyens scientifiques des microplastiques flottants à la surface de la mer Tyrrhénienne

Les **citoyens scientifiques** ont assuré une **surveillance efficace** de l'**abondance et de la distribution des MP flottants** sur une **vaste zone géographique** lors de l'**expédition 2025 en Méditerranée**. L'analyse de **19 échantillons** a fourni des informations sur la **variabilité spatiale** au sein de la **mer Tyrrhénienne**. La **distribution observée des MP** était **très hétérogène**, avec des **différences claires entre les stations**. Par exemple, des **abondances élevées** ont été enregistrées le long de la **côte corse**, tandis que des **concentrations plus faibles** ont été observées dans les **eaux du sud-est de la Sardaigne** (Fig. 7).

La **concentration moyenne des MP flottants**, dans la **classe de taille 1–5 mm**, enregistrée lors de l'**expédition MED 2025** était de **0,9 ± 1,01 particules/m³**. Cette valeur est **plus élevée** que celles rapportées dans des **études précédentes** dans la même région (Baini et al., 2018 ; Fossi et al., 2016 ; Panti et al., 2015 ; Pedrotti et al., 2022 ; Pittura et al., 2022). Un **facteur important** à considérer est la **différence dans les classes de taille rapportées** entre les études. La plupart des **recherches de surveillance** mesurent les MP dans des **plages de taille plus larges**, généralement de **juste en dessous de 5 mm** jusqu'à la **limite de détection inférieure imposée par la taille du maillage du filet (0,2 mm)** (Tableau 2).

Pittura et al. (2022) ont étendu leur analyse à des particules **aussi petites que 0,01 mm**, ce qui a été possible grâce à la **détection par FTIR**. En revanche, **Pedrotti et al. (2022)** ont rapporté des **concentrations plus élevées**, mais celles-ci incluaient une **plage de taille beaucoup plus large**, allant des particules **supérieures à 20 mm** jusqu'à **0,3 mm**. Dans notre cas, **toutes les particules inférieures à 1 mm ont été exclues** pour simplifier le **flux de travail des bénévoles**. Bien que les particules de la **classe 0,3–1 mm** puissent être **analysées directement sur le terrain**, car elles sont **toujours visibles à l'aide d'un stéréomicroscope ou d'une loupe**, cela nécessiterait **beaucoup plus de temps et d'efforts**, et l'**identification visuelle seule** reste limitée sans le soutien de **techniques de laboratoire avancées**.

Une **si grande variation dans les définitions des classes de taille** complique les **comparaisons directes entre les études**. Pour **harmoniser les résultats** et permettre des **comparaisons plus précises entre les études**, des **approches de mise à l'échelle mathématiques**, comme l'**équation de Koelmans** (Koelmans et al., 2020 ; Kooi et al., 2021), peuvent être appliquées pour **normaliser les concentrations** sur différentes plages de taille.

Parmi les études, une **caractéristique cohérente** qui permet la comparaison est la **dominance des particules en forme de fragments**, qui restent les **formes de MP les plus courantes** signalées en mer Méditerranée (Baini et al., 2018 ; Fossi et al., 2016 ; Panti et al., 2015 ; Pedrotti et al., 2022 ; Pittura et al., 2022). De plus, le **transparent et le blanc** étaient les **couleurs les plus fréquemment signalées** lors des campagnes **2024 et 2025 d'Expédition MED**, une variable non décrite dans les **études précédemment citées** mais reconnue comme **globalement dominante** dans l'environnement marin (Martí et al., 2020).

Des **points chauds distincts** de concentrations de MP ont été identifiés le long de la **côte nord-est de la Corse**, se chevauchant avec la zone influencée par le « **gyre de Capraia** », un **système de courants** précédemment décrit comme une **zone d'accumulation potentielle de déchets marins** (Fossi et al., 2017). De même, le **canal de Corse** a été identifié comme une **zone majeure d'accumulation** où les **schémas de circulation** favorisent la **rétenion des déchets** (Baudena et al., 2022 ; Caldwell et al., 2020 ; Pedrotti et al., 2022 ; Suaria et al., 2016). Ces **caractéristiques hydrodynamiques** expliquent probablement les **abondances élevées de particules** enregistrées lors de l'**expédition MED 2025**, qui **correspondent étroitement aux concentrations élevées** observées lors de l'**expédition Tara 2014** entreprise dans la même région (Pedrotti et al., Fig. 7). La **cohérence de ces résultats** entre deux campagnes indépendantes souligne la **persistance de ce point chaud de MP dans le temps**. Cependant, des **résultats contrastés** ont été obtenus lors de l'**expédition 2024**, avec une **station à proximité montrant des concentrations beaucoup plus faibles**. Ces différences peuvent s'expliquer par des **conditions océanographiques variables d'une année à l'autre**, comme :

- **Le vent.**
- **Les vagues.**
- **Les courants.**

Pour mieux comprendre ces **fluctuations temporelles**, il est nécessaire d'effectuer un **échantillonnage répété aux mêmes stations dans le temps**.

Des **concentrations élevées de MP** ont également été collectées le long de la **côte sud-est de la Corse**, qui est probablement influencée et **transportée par le gyre cyclonique** dans le **nord de la mer Tyrrhénienne**, comme décrit par **Fossi et al. (2017)**. Ce gyre pousse les **débris flottants** vers le **détroit de Corse**, une zone précédemment signalée au cours des **années passées comme un point chaud d'accumulation de plastique** (Pedrotti et al., 2022).

Au-delà des **facteurs océanographiques**, les **activités anthropiques** doivent également être prises en compte lors de l'examen de la **distribution des MP**. Le **tourisme intense** (c'est-à-dire **1,3 milliard d'arrivées dans le monde**), qui est un **moteur économique majeur** dans la région et est évalué à **3,4 milliards de dollars**, contribue également à la **pollution plastique** (Organisation mondiale du tourisme, 2024). Jusqu'à **80 % des déchets marins** sur les **îles et plages méditerranéennes** ont été attribués aux **activités liées au tourisme** (Grelaud et Ziveri, 2020 ; Mejjad et al., 2022). Nos résultats ont également révélé des **concentrations de MP près des grandes villes côtières**, notamment :

- **Fiumicino.**
- **Bastia.**
- **Bonifacio.**
- **Palerme.**
- **Olbia (Fig. 7).**

où les **ports animés** et le **trafic maritime intense** contribuent de manière significative aux **sources de pollution locales** (Liubartseva et al., 2018).

Cette étude a démontré la **faisabilité et la valeur scientifique** d'un **protocole simplifié** pour la **surveillance des MP flottants** grâce à la **science citoyenne**. En intégrant une **étape de vérification par chauffage rapide** et le **développement de plaques en céramique reproductibles**, le protocole a permis un **criblage efficace des polymères sur le terrain** et a **réduit les faux positifs**, garantissant que les **données générées par les bénévoles** sont **directement comparables** à celles produites par des **analyses de laboratoire**. L'approche s'est avérée **particulièrement adaptée** aux **polymères de surface les plus abondants** trouvés dans l'**océan mondial**, le **PE et le PP**, tout en restant **accessible et peu coûteuse**, facilitant ainsi une **surveillance à grande échelle et à long terme**.

L'**application sur le terrain** lors de l'**expédition MED 2025** a mis en évidence la capacité des **citoyens scientifiques** à collecter des **données significatives** à une **échelle géographique large**. Les résultats ont révélé une **distribution très hétérogène des MP**, avec des **points chauds cohérents identifiés** dans le **canal de Corse et le nord-est de la Corse**, en **alignement avec les précédentes campagnes scientifiques** comme l'**expédition TARA**. Cela renforce la **fiabilité des jeux de données générés par les citoyens** pour faire avancer notre compréhension de la **variabilité spatiale de la pollution par les MP**.

Néanmoins, des **limitations** ont été observées, notamment :

- **La fatigue des bénévoles.**
- **Les contraintes environnementales pendant l'échantillonnage.**
- **L'incapacité à identifier les types de polymères au-delà du PE et du PP.**

Ces défis soulignent l'importance :

- D'une **formation structurée**.
- De la **rotation des tâches**.
- De la **planification des expéditions dans les conditions environnementales les plus favorables**.
- D'une **vérification complémentaire en laboratoire** lorsque une **précision analytique plus élevée** est requise.

Dans l'ensemble, cette étude montre que la **science citoyenne peut compléter la recherche traditionnelle sur les MP**, notamment en **réduisant les délais liés à l'analyse en laboratoire et à la publication des données**. Bien que cette **méthode peu coûteuse** ne puisse pas **remplacer les instruments analytiques avancés**, elle fournit une **alternative de criblage rapide sur le terrain**. En fournissant des **jeux de données presque en temps réel**, ce protocole **améliore la capacité à suivre les tendances temporelles** et **renforce le rôle de la science citoyenne dans la surveillance environnementale**.



Déclaration de contribution des auteurs (CRediT)

- **Elora Briola** : Rédaction – premier jet, Validation, Méthodologie, Investigation, Analyse formelle, Curation des données.
- **Solène Cleraux** : Rédaction – révision et édition, Ressources.
- **Bruno Dumontet** : Ressources, Administration du projet, Acquisition de financement.

- **Ana Luzia Lacerda** : Rédaction – révision et édition, Ressources, Administration du projet, Investigation.
 - **Mikaël Kedzierski** : Rédaction – révision et édition, Supervision, Administration du projet, Méthodologie, Acquisition de financement, Conceptualisation.
-

Déclaration de conflits d'intérêts

Les auteurs déclarent **ne pas avoir de conflits d'intérêts financiers ou personnels connus** qui pourraient avoir influencé le travail rapporté dans cet article.

Remerciements

Nous remercions sincèrement **tous les bénévoles** des associations **Objectif Dune, Observatoire du Plancton, Les Mains dans le Sable et Expédition MED** pour leur **participation précieuse** à cette étude.

Les auteurs reconnaissent le soutien de l'**Agence nationale de la recherche française (ANR)** dans le cadre de la **convention de subvention n° ANR-23-SARP-0011**.

Données supplémentaires

Les **données supplémentaires** de cet article peuvent être consultées en ligne à l'adresse suivante : <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2026.120084>.

Disponibilité des données

Les données seront **mises à disposition sur demande**.

Références bibliographiques

(Les références ont été conservées en anglais pour faciliter la vérification et la citation.)