

## Schémas de transport et contexte hydrodynamique de la campagne HIPPOCAMPE en Mer Méditerranée occidentale

### **Contexte et problématique :**

Les écosystèmes marins pélagiques subissent de nombreuses perturbations liées à l'activité humaine, notamment l'exposition aux éléments chimiques toxiques (contaminants). Cette exposition se traduit en particulier par l'assimilation de ces contaminants par les organismes marins et leur accumulation/transfert au sein du réseau trophique. Ces processus de bioaccumulation peuvent aboutir à des niveaux de contamination élevés chez les espèces marines exploitées, et induire *in fine* des effets néfastes sur la qualité environnementale, la santé, et l'activité socio-économique.

Le plancton marin, qui est à la base du réseau trophique pélagique, est constitué d'une multitude d'organismes de tailles et de structures très variées, incluant le phytoplancton, le zooplancton et les bactéries. Il représente 98% de la biomasse des océans et occupe une place centrale dans l'écosystème et les cycles biogéochimiques marins. Des études récentes ont mis en exergue les fortes interactions entre les compartiments « atmosphère », « océan » et « plancton » dans le cycle des contaminants, ainsi que le rôle majeur du plancton comme voie d'entrée de ces derniers dans la chaîne alimentaire pélagique, éventuellement jusqu'aux échelons trophiques supérieurs (Jurado et al., 2008; Berrojalbiz et al., 2011; Banaru et al., 2014; Tiano et al., 2014; Strady et al., 2015; Tao et al., 2018).

Cependant, plusieurs inconnues limitent notre compréhension et notre évaluation du rôle potentiel du plancton qui agirait comme une « pompe biologique à contaminants ». Ces incertitudes résident notamment dans les zones de dépôts des contaminants provenant de l'atmosphère, ainsi que dans la distribution horizontale des contaminants océaniques (de diverses origines, e.g. atmosphériques, terrigènes, fluviales, etc...). Ces prérequis sont fondamentaux à l'étude des processus d'accumulation et de transfert de ces contaminants au sein des réseaux planctoniques qui restent mal compris. En effet nous ignorons encore les contributions des dépôts atmosphériques versus celles des contaminants océaniques dissous, l'importance relative des origines diverses de contaminants, ainsi que la relation entre le type d'habitat pélagique, la structuration en taille du plancton et les niveaux de contamination observés du biota ([Fig. 1](#)).

### **Objectifs du stage :**

A l'aide d'outils numériques et de modélisation appliqués à des données satellitaires et des ré-analyses, les objectifs de ce stage sont de caractériser le contexte hydrodynamique de la campagne HIPPOCAMPE. Ces analyses concerneront plusieurs échelles de temps et d'espace qui se focaliseront sur la fenêtre échantillonnée tout en étudiant le contexte historique et grande échelle. Cela permettra de fournir des informations cruciales qui, via la formulation d'hypothèses suivi de leur évaluation, aideront à l'interprétation des observations in-situ collectées lors de la campagne. Ces diagnostics « physiques » calculés à partir de modèles et d'observations satellitaires aideront l'interprétation des profils CTD observés, des biomasses et les distributions en classes de taille du plancton et des concentrations en contaminants (HAPs et éléments traces métalliques) mesurées dans les eaux de surface, le plancton mais aussi les dépôts atmosphériques, récoltés à bord pendant la campagne et à

Terre au Nord (Marseille) et au Sud (Sfax) de la Méditerranée, avant, pendant et après la campagne.

Nos principaux questionnements sont : 1) Les structures méso-échelles (tourbillons, fronts, filaments, etc...) ont-elles une influence sur les niveaux de production planctonique et les teneurs en contaminants observés aux différentes stations ? 2) Existe-t-il une relation entre les niveaux de production planctonique, les teneurs en contaminants et l'historique des masses d'eau, en particulier au regard de l'exposition de la masse d'eau à des apports terrestres, des dépôts atmosphériques et des apports maritimes ? 3) L'origine des masses d'eau et les schémas de mélange peuvent-ils rendre compte du fait que les stations côtières ne présentent pas forcément les concentrations en contaminants les plus élevées ? 4) Peut-on identifier les dépôts atmosphériques comme source principale de contaminants dans les zones du large ?

Une des premières tâches du stage consistera donc à caractériser les structures méso-échelles et les schémas horizontaux de transport à la surface et à plusieurs profondeurs du bassin Nord-ouest Méditerranéen. Ces travaux permettront de co-localiser les stations d'échantillonnage sur des cartes dynamiques de tourbillons et fronts océaniques, ainsi que d'estimer le mélange horizontal autour de chaque station (e.g. Della Penna and Gaube, 2019). Un deuxième sous-objectif concerne l'évaluation des origines (« backward-in-time ») et des destinations (« forward-in-time ») des masses d'eau échantillonnées. Il s'agira de formuler de manière précise les hypothèses qui seront testées et évaluées en comparant la caractérisation physique de la circulation marine avec les concentrations, et leurs distributions spatiales, observées dans l'eau, dans les particules et dans le plancton de contaminants d'intérêt. Ces contaminants sont les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAPs tels que le naphthalène, le phénanthrène, le fluorène et le pyrène) et les éléments traces métalliques (comme le mercure, plomb, cuivre, nickel, zinc, manganèse, fer, titane...). Ils ont majoritairement un comportement non conservatif dans l'eau de mer car soumis à des processus biotiques et abiotiques (i.e., interactions avec la matière organique dissoute, adsorption sur les particules et dans le plancton, biodégradation, photo-dégradation). Le titane, qui provient prioritairement des apports terrestres et qui est très peu réactif dans le milieu marin, pourrait être utilisé comme traceur passif. L'historique des masses d'eaux sera étudié à différentes échelles spatio-temporelles (déterminées en fonction des caractéristiques ou des sources suspectées des espèces chimiques mesurées dans l'eau de mer ; ou des durées typiques des cycles de vie des organismes planctoniques échantillonnés suivant leur classe de taille) suivant les problématiques abordées. Les outils de modélisation permettront, à une échelle de temps fixée, (i) d'estimer les probabilités de contacts passés entre l'eau échantillonnée et les côtes adjacentes ou les routes maritimes majeures (ii) d'étudier les ressemblances potentielles entre profils des différentes stations en évaluant leur « connectivité hydrodynamique », (iii) d'analyser les zones d'influence de sources côtières de contaminants suspectées (villes, ports, fleuves, etc...) et (iv) de cartographier les événements de pluie et d'estimer les probabilités de contacts passés entre l'eau échantillonnée et les dépôts humides atmosphériques (aidant à mieux contraindre les contributions relatives entre dépôts secs, dépôts humides et échanges gazeux).

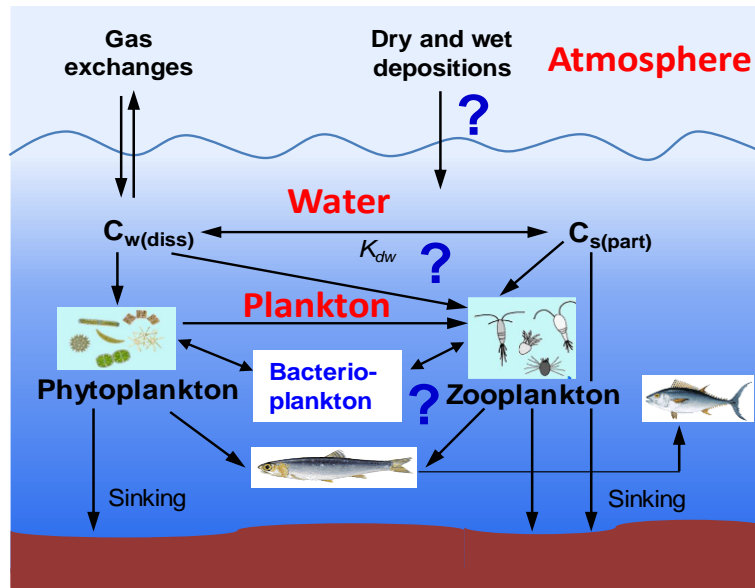


Figure 1. Schéma illustrant les processus biogéochimiques impliqués dans l'accumulation et le transfert des contaminants chimiques aux interfaces atmosphère/eau/plancton, et dans les réseaux trophiques planctoniques (phyto-, zoo- et bactério-plancton).

### Description de la campagne HIPPOCAMPE et de l'échantillonnage :

La campagne Hippocampe a pour but d'étudier l'accumulation et le transfert de divers contaminants métalliques et organiques (ETMs, Hg, HAPs, PCBs, PBDEs, radionucléides, microplastiques) aux interfaces atmosphère/eau/plancton, et au sein des réseaux trophiques planctoniques (phyto-, zoo- et bactério-plancton) dans des zones d'intérêt écologique et économique du Nord et du Sud de la Méditerranée (Fig. 2). La campagne eu lieu du 13 avril au 14 mai 2019 à bord du navire l'Antéa. Dix stations ont été échantillonnées le long d'une radiale Nord-Sud en Méditerranée : 4 stations dans la zone côtière française, 3 dans la zone hauturière, et 3 dans la zone côtière tunisienne. Ces stations étaient réparties au sein de plusieurs écorégions méditerranéennes (Ayata et al., 2018), caractérisées par différentes conditions hydrologiques et hydrodynamiques, ainsi que divers niveaux de production planctonique et d'anthropisation (Fig. 2). A chacune de ces stations, de grandes quantités de plancton, de particules, de microplastiques et d'eau ont été récoltées en surface, sub-surface et/ou dans le deep chlorophyll maximum (DCM). Cette collecte était suivie à bord d'une séparation des particules et des organismes planctoniques en classes de tailles, par tamisage et filtration. Outre ces prélèvements, des profils CTD/capteurs optiques (T, S, Chla, O<sub>2</sub>, CDOM, LISST-HOLO, LOPC) ont été réalisés dans la colonne d'eau, ainsi que des prélèvements de dépôts atmosphériques secs (particules) et humides (pluies).

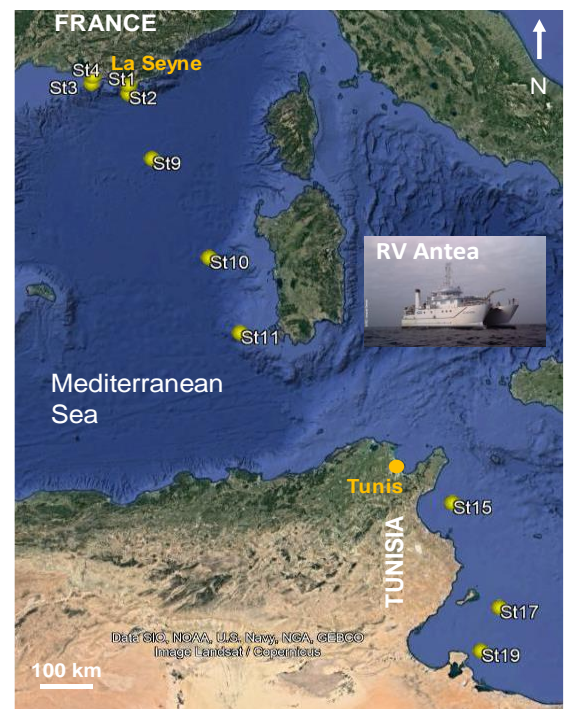


Figure 2. Position des dix stations Hippocampe réparties le long d'une radiale Nord-Sud en Méditerranée.

### **Description des outils numériques et des bases de données :**

D'un part, les bases de données grillées (longitude, latitude, profondeur, temps) qui seront exploitées dans ce stage concernent l'état physique de l'océan et de l'atmosphère.

Pour l'océan, les variables d'intérêt sont les courants marins horizontaux (composantes zonales et méridionales) ainsi que la structure thermo-haline (température, salinité, densité) ; elles peuvent être dérivées des modèles hydrodynamiques opérationnels tels que les modèles AIFS (Adriatic Ionian Forecasting System) et MFS (Mediterranean Forecasting System). Le premier est basé sur le code NEMO et couvre l'Adriatique et la mer Ionienne (y compris le Golfe de Gabès) à une résolution de  $1/45^\circ$ , soit environ 2.2 km (Oddo et al. 2006 ; Ciliberti et al., 2015). Le deuxième est fourni par Marine Copernicus en 'near-real time' et ce pour les 30 dernières années sur l'ensemble de la Mer Méditerranéen avec une résolution horizontale de  $1/16^\circ$  (Oddo et al., 2009). Ces modèles permettront notamment d'envisager des études à différentes profondeurs. Pour la surface, nous validerons les prédictions des modèles par l'utilisation du produit « GlobCurrent » qui est dérivé d'observations satellitaires : les courants de surface totaux y sont exprimés sur une grille régulière ( $1/4^\circ$ ) comme la somme des composantes géostrophiques et d'Ekman (Rio et al., 2014). Marine Copernicus fournit aussi des produits satellitaires (Sea Surface Height & Sea Surface Temperature) qui seront exploités à l'aide des codes numériques décrit ci-dessous.

Pour l'atmosphère, il s'agira d'explorer des ré-analyses comme ERA-INTERIM ou ERA-5. Elles fournissent de nombreuses données atmosphériques d'intérêt (telles que le vent, la température, les précipitations, les flux de chaleur, etc...) et sont disponibles à haute-résolution durant les dernières décades (incluant l'année 2019).

D'autre part, des codes numériques (matlab/python) permettront l'exploitation des bases de données citées ci-dessus, généralement disponibles au format NetCDF. Ces codes numériques permettront notamment d'identifier les événements de dépôts humides autour des stations d'échantillonnages ainsi que de calculer des diagnostics pertinents tels que les exposants de Lyapunov (Rossi et al., 2008 ; Hernandez-Carrasco et al., 2011), les fronts océaniques (Belkin et O'Reilly, 2009) et autres variables physiques (e.g. relative vorticity, okubo-weiss parameter, etc...) renseignant sur la présence, les positions et intensités relatives des structures à méso-échelle. Enfin, nous utiliserons un modèle lagrangien de dispersion appelé « Lagrangian Flow Network » (LFN ; Rossi et al., 2014 ; Ser-Giacomi et al., 2015) ainsi que la liste d'outils déjà développés permettant l'analyse des schémas de dispersion et le calcul d'indices de connectivité (Monroy et al., 2017 ; Legrand et al., 2019).

### **Informations supplémentaires :**

Le stage se déroulera de janvier à juin 2021 à l'Institut Méditerranéen d'Océanologie (MIO, UM 110 ; <https://www.mio.osupytheas.fr/fr>), sur le campus de Luminy, à Marseille.

Gratification de stage : indemnisation standard, environ 550 €/mois, financé à 100% sur les crédits du projet HIPPOCAMPE.

Profil de l'étudiant : intéressé(e) par des questionnements pluridisciplinaires ; compétences en programmation souhaitées (matlab et/ou python requis, C++ optionnel) ; goût pour l'analyse de données « big data » et la modélisation.

Co-encadrement : Vincent Rossi et Marc Tedetti.

Pour candidater, merci d'envoyer un CV, une lettre de motivation et le relevé de notes du Master 1 à Vincent Rossi ([vincent.rossi@mio.osupytheas.fr](mailto:vincent.rossi@mio.osupytheas.fr)) et Marc Tedetti ([marc.tedetti@mio.osupytheas.fr](mailto:marc.tedetti@mio.osupytheas.fr)).

## **Références :**

- Ayata, S.D., Irisson, J.O., Aubert, A., Berline, L., Dutay, J.C., Mayot, N., Nieblas, A.E., D'Ortenzio, F., Palmieri, J., Reygondeau, G., Rossi, V., Guieu, C., 2018. Regionalisation of the Mediterranean basin, a MERMEX synthesis. *Progress in Oceanography*, 163, 7–20.
- Banaru, D., Carlotti, F., Barani, A., Grégori, G., Neffati, N., Harmelin-Vivien, M., 2014. Seasonal variation of stable isotope ratios of size-fractionated zooplankton in the Bay of Marseille (NW Mediterranean). *Journal of Plankton Research*, 36, 145–156.
- Berrojalbiz, N., Dachs, J., Ojeda, M.J., Valle, M.C., Castro-Jiménez, J., Wollgast, J., Ghiani, M., Hanke, G., Zaldivar, J.M., 2011. Biogeochemical and physical controls on concentrations of polycyclic aromatic hydrocarbons in water and plankton of the Mediterranean and Black Seas. *Global Biogeochemical Cycles*, 25, GB4003, doi:10.1029/2010GB003775.
- Belkin, I.M. & O'Reilly, J.E. (2009). An algorithm for oceanic front detection in chlorophyll and SST satellite imagery. *Journal of Marine Systems*, 78, 319 – 326
- Ciliberti, S.A., Pinardi, N., Coppini, G., Oddo, P., Vukicevic, T., Lecci, R., Verri, G., Kumkar, Y., Creti, S., 2015. A high resolution Adriatic-Ionian Sea circulation model for operational forecasting, in: EGU General Assembly Conference Abstracts.
- Della Penna A. and P. Gaube (2019), Overview of (Sub)mesoscale Ocean Dynamics for the NAAMES Field Program, *Frontiers in Marine Science*, 6 (384), doi: 10.3389/fmars.2019.00384.
- Hernandez-Carrasco I.H., et al. (2011) How reliable are Finite-Size Lyapunov Exponents for the assessment of ocean dynamics? *Ocean Modelling* 36(3-4): 208-218.
- Jurado, E., Dachs, J., Duarte, C.M., Simó, R., 2008. Atmospheric deposition of organic and black carbon to the global oceans *Atmospheric Environment*, 42, 7931–7939.
- Legrand, T., A. Di Franco, E. Ser-Giacomi, A. Caló, V. Rossi, 2019. A multidisciplinary analytical framework to delineate spawning areas and quantify larval dispersal in coastal fish, *Marine Environmental Research*, in press, doi:10.1016/j.marenvres.2019.104761
- Monroy, P., V. Rossi, E. Ser-Giacomi, C. Lopez, E. Hernandez-Garcia, 2017. Sensitivity and robustness of larval connectivity diagnostics obtained from Lagrangian Flow Networks, *ICES Journal of Marine Science*, 74 (6), 1763-1779, doi:10.1093/icesjms/fsw235.
- Oddo, P., Pinardi, N., Zavatarelli, M., Coluccelli, A., 2006. The Adriatic basin forecasting system. *Acta Adriatica: international journal of Marine Sciences*, 47, 169–184.
- Oddo, P., Adani, M., Pinardi, N., Fratianni, C., Tonani, M., and Pettenuzzo, D. (2009): A nested Atlantic-Mediterranean Sea general circulation model for operational forecasting, *Ocean Sci.*, 5, 461–473, <https://doi.org/10.5194/os-5-461-2009>
- Rossi, V., C. López, J. Sudre, E. Hernández-García, and V. Garçon, 2008. Comparative study of mixing and biological activity of the Benguela and Canary upwelling systems, *Geophysical Research Letters*, 35, L11602, doi:10.1029/2008GL033610
- Rossi, V., E. Ser-Giacomi, C. López and E. Hernández-García, 2014. Hydrodynamic provinces and oceanic connectivity from a transport network help designing marine reserves, *Geophysical Research Letters*, 41 (8), 2883-2891, doi:10.1002/2014GL059540
- Rio, M.-H., Mulet, S., and Picot, N. (2014), Beyond GOCE for the ocean circulation estimate: Synergetic use of altimetry, gravimetry, and in situ data provides new insight into geostrophic and Ekman currents, *Geophys. Res. Lett.*, 41, 8918–8925, doi:10.1002/2014GL061773
- Ser-Giacomi, E., V. Rossi, C. López and E. Hernández-García, 2015. Flow networks: A characterization of geophysical fluid transport, *Chaos*, 25(3), 036404, doi:10.1063/1.4908231.
- Strady, E., Kim, I., Radakovitch, O., Kim, G., 2015. Rare earth element distributions and fractionation in plankton from the northwestern Mediterranean Sea. *Chemosphere*, 119, 72–82.
- Tao, Y., Yu, J., Liu, X., Xue, B., Wang, S., 2018. Factors affecting annual occurrence, bioaccumulation, and biomagnification of polycyclic aromatic hydrocarbons in plankton food webs of subtropical eutrophic lakes. *Water Research*, 132, 1–11.
- Tiano, M., Tronczyński, J., Harmelin-Vivien, M., Tixier, C., Carlotti, F., 2014. PCB concentrations in plankton size classes, a temporal study in Marseille Bay, Western Mediterranean Sea. *Marine Pollution Bulletin*, 89, 331–339.