



MARSEILLE & L'ENVIRONNEMENT BILAN, QUALITÉ ET ENJEUX

Le développement durable d'une grande ville
littorale face au changement climatique

sous la direction de

**Joël Guiot, Hubert Mazurek, Thomas Curt
et Patrick Rimbault**

SCIENCES TECHNOLOGIES SANTÉ



Sciences Technologies Santé
collection dirigée par
Ivan Dekeyser et Jean-Claude Bertrand

Dans la même collection :

Valérie BONET, Éric FAURE, dir., *La rage dans tous ses états. Des approches antiques aux recherches actuelles*, 228 p., 2020

Nardo VICENTE, *La grande nacre de Méditerranée. Pinna nobilis, un coquillage bivalve plein de noblesse*, 154 p., 2020

Jacques GISPERT, *Le calendrier et ses mystères. L'aventure méconnue d'une invention extraordinaire*, 280 p., 2019

Jean-Claude BERTRAND, dir., *Cancer, le patient hors les murs de l'hôpital*, 140 p., 2019

Perrine MALZAC, Marie-Ange EINAUDI, dir., *Récits cliniques, conflits de valeurs. De l'éthique médicale à la décision concrète*, 160 p., 2019

Tanguy MARQUESTE, Pierre THERME, dir., *Sport et santé, mythe ou réalité? Des activités physiques adaptées à la santé*, 338 p., 2019

Pierre LE COZ, *L'éthique médicale. Approches philosophiques*, 160 p., 2018

Charles-François BOUDOURESQUE, *Manuel de rédaction et de communication scientifiques et techniques*, 146 p., 2017

Olivier MORIZOT, *Bases d'optique géométrique. Des instruments ardents à la formation des images pour comprendre la vision des couleurs de l'arc-en-ciel*, 292 p., 2016

Jean-Marc VIREY, *Physique et Mécanique. Nouvelle version. Une initiation aux méthodes des problèmes de physique*, 390 p., 2015

Sciences Technologies Santé

Marseille et l'environnement

Bilan, qualité et enjeux

Le développement durable
d'une grande ville littorale
face au changement climatique

sous la direction de

Joël Guiot, Hubert Mazurek, Thomas Curt, Patrick Rimbault

sous la coordination de

Laura Collange, Séverine Thomas

2021

PRESSES UNIVERSITAIRES DE PROVENCE

Crédits illustrations de couverture : Thomas Stieglitz (CEREGE).

Remerciements à Katarzyna Marini pour sa contribution dans la phase initiale de cet ouvrage.

Ce travail a bénéficié d'une aide du gouvernement français au titre du Programme Investissements d'Avenir, Initiative d'Excellence d'Aix-Marseille Université - LabEx OT-Med ANR-11-LABEX-0061 et projet A*MIDEX projet ANR-11-IDEX-0001-02.



© PRESSES UNIVERSITAIRES DE PROVENCE

Aix-Marseille Université

29, avenue Robert-Schuman – F – 13621 Aix-en-Provence CEDEX 1

Tél. 33 (0)4 13 55 31 91

pup@univ-amu.fr – Catalogue complet sur presses-universitaires.univ-amu.fr/editeur/pup

[facebook.com](https://www.facebook.com)

DIFFUSION LIBRAIRIES : AFPJ DIFFUSION – DISTRIBUTION SODIS

Préface

Vue sur la mer : les grandes métropoles du littoral

Bruno David

Président du Muséum national d'histoire naturelle

Plus de 60 % de la population mondiale vit à moins de 100 kilomètres d'un littoral. Une part importante des plus grandes villes du monde sont des villes installées en bord de mer. Par ailleurs, les océans étant les exutoires des continents, les littoraux sont un passage obligé, notamment au droit des grands fleuves. On peut ajouter à cela que nombre de grandes villes littorales sont aussi au bord d'un grand cours d'eau. Cette double réalité physiographique et démographique a conduit à des pressions considérables sur ces zones à l'interface entre les continents et les océans, que ce soit en termes de pollutions ou d'aménagements. À cela s'ajoutent encore le changement climatique et la montée du niveau marin qui l'accompagne. Les pressions ne manquent pas et elles sont telles que, à l'instar des villes en général, les scientifiques regardent le littoral comme un nouveau biome. Les grandes métropoles maritimes se trouvent ainsi à la croisée des deux biomes anthropiques : biome urbain et biome littoral. À ce titre, elles méritent une attention toute particulière de la part des scientifiques, des aménageurs et des politiques.

Les ports existent depuis la plus haute Antiquité, ils sont des lieux de passage, d'échanges et, pour ce faire, de construction d'infrastructures qui ont pris de plus en plus d'ampleur au fil des siècles. Les emprises spatiales portuaires sont aujourd'hui considérables ; la zone portuaire de Marseille couvre plus de 100 km². Les volumes qui y transitent sont gigantesques : 1,4 million de conteneurs représentant 80 millions de tonnes. Les passagers qui foulent les terminaux marseillais se comptent en millions. Cette forte activité économique s'accompagne de pressions environnementales tout aussi prégnantes : pollutions des eaux, pollution de l'air (les bateaux qui accostent à Marseille émettent plus de dioxyde d'azote que toute la circulation automobile de la métropole)... Mais surtout, plus spécifiquement, les ports sont les points d'entrée privilégiés d'espèces exotiques potentiellement invasives : en premier lieu des espèces marines souvent transportées sous forme de larves ou de propagules dans les eaux de ballast des bateaux, mais aussi des espèces continentales qui ont survécu au trajet dans les conteneurs et qui vont poursuivre leur chemin vers l'intérieur des terres via les routes ou les canaux.

Les métropoles adossées aux grands ports sont, par nature, implantées sur les littoraux, donc sur des zones étroites où les interactions terre-mer sont maximales. À ce titre, leur impact peut se révéler proportionnellement plus important que celui de métropoles équivalentes mais éloignées de la mer. Cela est le plus souvent amplifié par la tentation d'utiliser la mer, si vaste, comme un exutoire commode pour toute sorte d'effluents plus ou moins toxiques, sans compter le vent souvent présent en bord de mer, lui aussi commode pour évacuer les pollutions aériennes vers le large. Marseille a été la dernière grande ville française à se doter d'une station d'épuration. Je me souviens aussi d'une réponse que m'avait faite un ingénieur pétrolier de la raffinerie de Fos à propos de la pollution: «Ici nous avons le Mistral qui nettoie notre atmosphère!» Vision très locale, aut centrée, car cette pollution est souvent rabattue vers Marseille, alternant ainsi avec celle due aux grands bateaux de croisière dont les fumées envahissent la ville lorsque souffle la brise marine. Comme quoi le régime des vents, donc le climat, joue un rôle majeur sur l'environnement urbain, avec des effets variables selon les moments et les circonstances.

Marseille et sa région sont un excellent terrain pour aborder et illustrer toutes ces questions relatives à la fragilité des littoraux, à leur contribution essentielle dans les grands cycles régulateurs de la planète. Cela tient à la taille de la métropole phocéenne, à sa position entre le delta du Rhône et le littoral préservé des calanques, à la nature de son arrière-pays escarpé et calcaire – ce qui induit un trajet rapide des eaux pluviales vers la mer –, à des fonds diversifiés entre l'ouest de la baie de Marseille et le parc national des Calanques à l'est, et aux caractéristiques de la Méditerranée: mer quasi fermée, une des plus polluées au monde dont l'oxygénation repose sur une inversion thermique entre eaux de surface et eaux profondes, dont la biodiversité remarquable est à la fois celle d'un biome (entité écologique) et d'un biote (entité historique issue de la même histoire).

Mis bout à bout, ces constats de tous ordres font de la région marseillaise une mosaïque complexe dont chaque élément pris isolément soulève des questions spécifiques. Néanmoins, tout cela fonctionne comme un système hautement intégré, dans lequel chaque élément interagit avec les autres, constituant un socio-écosystème qui ne peut être abordé que de manière holistique en combinant de multiples approches. Et c'est bien l'objectif de cet ouvrage que de proposer une analyse transversale qui intègre à la fois le cadre géologique et climatique de la région – qui impose un niveau d'aléa – les facteurs liés à la biodiversité et tout ce qui touche aux emprises anthropiques. Les résultats scientifiques qu'il apporte dépassent largement le cas de Marseille et ils fournissent des pistes de réflexion et d'action exportables vers bien d'autres contextes. Ce faisant, l'ouvrage fournit une synthèse exemplaire d'un ensemble cohérent où l'homme est considéré comme un élément fondateur de nouveaux équilibres, justifiant pleinement que Marseille, à l'instar de toutes les grandes métropoles littorales, soit regardée comme un nouveau biome.

Introduction

Hubert Mazurek

LPED

Thomas Curt

INRAE

Joël Guiot

CEREGE

Changement global et urbanisation : un défi au niveau planétaire

D'après le cinquième rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC¹), le réchauffement du climat est sans équivoque et nombre des changements observés depuis les années 1950 sont sans précédent depuis des millénaires. L'atmosphère et les océans se sont réchauffés, la couverture de neige et de glace a diminué, et le niveau des mers s'est élevé. À une échelle locale, le Groupe régional d'experts sur le climat en région Sud (GREC-Sud²) a montré que la région Provence-Alpes-Côte d'Azur (PACA) était particulièrement sensible à ces changements.

Composante du changement global, l'urbanisation est un des principaux défis auxquels l'humanité est confrontée au cours de ce XXI^e siècle, dans les domaines social et environnemental. Le taux d'urbanisation est passé de 43 % en 1990 à 53 % en 2012 en moyenne; il est estimé à plus de 70 % pour 2050. Aujourd'hui, 21 % de la population urbaine mondiale vit dans des agglomérations de plus d'un million d'habitants. En Méditerranée, ce taux est de 71 %, avec une urbanisation principalement concentrée sur le littoral. L'urbanisation du monde est devenue un phénomène structurant des sociétés,

1 Une liste des sigles et un glossaire sont fournis en fin d'ouvrage.

2 <http://www.grec-sud.fr>.

offrant des opportunités, mais présentant aussi des contraintes. Elle traduit souvent une élévation du niveau de vie, avec l'apparition d'équipements et d'aménités diverses (structures sanitaires, transports urbains, logements, etc.). Mais dans le même temps, elle exacerbe les relations entre population, environnement et développement, à l'échelle de la planète comme à celle de l'espace de vie. Elle représente une menace importante pour la biodiversité et les systèmes agricoles et, mal maîtrisée, elle peut engendrer des nuisances et une dégradation des conditions de vie des populations.

Car les villes, en particulier celles qui sont denses et étendues, ont la capacité d'influer fortement sur leur propre environnement et sur leur environnement proche, y compris sur la composante atmosphérique, au point de constituer des îlots de chaleur et d'être des sources de particules, de divers polluants, de déchets et de gaz à effet de serre (GES). Dans un contexte de changement climatique, la compréhension des mécanismes d'échange de chaleur et d'eau entre la ville et l'atmosphère constitue un enjeu pour des questions de qualité de l'air, de santé publique, de gestion des modes de consommation d'énergie, d'urbanisme et d'architecture.

Les effets des changements du climat et de l'urbanisation convergent ainsi dangereusement au point de menacer gravement la stabilité de l'environnement, de l'économie et des sociétés du monde entier. Le rapport intitulé *Cities and Climate Change: Global Report on Human Settlements 2011* publié par UN-Habitat avait pour objectif d'amener les gouvernements et tous ceux qui s'intéressent à l'urbanisme et aux changements climatiques à être davantage au fait de la contribution des villes à ces changements, des impacts de ces changements sur les villes, et des modalités de mitigation et d'adaptation de ces villes. Plus important encore, le rapport faisait état de mesures d'atténuation et d'adaptation prometteuses propices à des modes de développement urbain garantissant une plus grande viabilité et une plus grande résilience.

Des enjeux territoriaux et sociétaux

D'une manière générale, le lien entre changement climatique, architecture, urbanisme et aménagement du territoire pose la question de l'adaptation des pratiques. Dans le domaine de l'architecture, il est nécessaire de réguler l'usage de paramètres tels que l'isolation, les techniques et matériaux de construction, l'architecture elle-même, vis-à-vis de la résistance aux températures, au confort d'habitat pouvant aller jusqu'à des considérations de santé individuelle et publique, ou encore du coût économique en termes de chauffage ou de climatisation. En urbanisme, c'est l'organisation spatiale de la ville, la mixité entre le bâti et les espaces ouverts et végétalisés, entre le productif et le résidentiel, qui conditionnent les transports, et ce sont les divers usages du sol qu'il est nécessaire de questionner. Autant de sujets qui montrent l'aspect climato-dépendant de nos sociétés, sans que l'on en prenne conscience au quotidien.

L'urbanisation et les effets du changement climatique évoluent de manière conjointe, entraînant des risques plus élevés pour les populations vivant au sein des grandes métropoles. La notion de risque se définit d'une manière générale par la conjonction d'un aléa, d'une vulnérabilité et d'une exposition. Dans le cas présent, les risques sont liés aux aléas météorologiques, qui comprennent les évolutions tendanciennes (réchauffement du climat) et les événements extrêmes (inondations, canicules, grêles, etc.) (voir chapitre 1). Cependant, les évolutions tendanciennes (par exemple l'augmentation progressive des températures moyennes), moins brutales que les événements extrêmes, ont aussi un impact à moyen et long terme. En effet, au-delà des risques physiques que présente le changement climatique, certaines villes pourront avoir du mal à fournir les services de base à leurs habitants à l'avenir. Les changements attendus touchent l'alimentation en eau, les infrastructures physiques, les transports, les biens, le tourisme, la santé, les services écosystémiques, la fourniture d'énergie et la production industrielle. Les économies locales seront perturbées, avec des populations pouvant perdre leurs biens et leurs moyens d'existence. Ainsi, les changements climatiques posent de plus en plus de problèmes inédits aux zones urbaines et à leurs populations dont les effectifs vont croissant.

Les impacts des milieux urbains sur l'environnement peuvent s'étendre bien au-delà des limites de la ville par effets indirects, comme les pollutions, la fréquentation ou la fragmentation des espaces naturels et agricoles par les infrastructures de communication, ou encore la concurrence sur l'accès au foncier qui évince, par les jeux du marché, les acteurs agricoles ou ceux de la conservation au profit de friches spéculatives. La localisation des espaces agricoles et naturels n'est en fait pas indépendante de celle des villes. Si l'on étend le périmètre de la ville à son arrière-pays proche ou lointain, avec notamment des relations de dépendance comme pour l'alimentation ou les ressources en eau, alors entre en considération le devenir des espaces à caractère naturel impliquant des espaces récréatifs, générateurs de services écosystémiques, des agrosystèmes, des forêts, des écosystèmes en général, et de leur biodiversité. De plus, l'artificialisation des terres et le changement d'usage des sols peuvent obérer le devenir de zones agricoles et d'espaces naturels situés aux marges de l'agglomération, voire à une plus grande distance.

Objectif « ville durable » : un besoin d'action au niveau local

Parce qu'elle perdure souvent depuis des siècles, la ville peut être envisagée comme une construction sociale qui se maintient et se développe à travers le temps, prenant chaque jour des formes nouvelles. Cependant, la « ville durable » est beaucoup plus difficile à concevoir, car elle implique un choix politique et des notions de seuil et de capacité de résilience face à ce choix politique. Le développement durable envisage systématiquement l'environnement dans ses différentes dimensions : naturelle, mais aussi sociale, économique et politique.

Il accorde une importance à la poursuite d'une croissance économique qui peut être d'ailleurs envisagée comme une redistribution des richesses; la création de richesses est ici perçue comme moyen de surmonter les inégalités. Une autre originalité du développement durable est d'intégrer à la fois la dimension complexe du monde dans lequel nous vivons et ses différentes échelles, un événement local pouvant avoir des répercussions à l'échelle planétaire. L'esprit du développement durable peut être ainsi résumé par l'expression « penser global, agir local ». Des mesures au niveau local sont donc indispensables pour que puissent être tenus les engagements nationaux pris dans le cadre des négociations internationales en matière de changement climatique. Pourtant, aucun processus clair qui assurerait la participation des administrations locales, des parties prenantes et des intervenants à une gestion durable de la ville n'a été préconisé par les travaux s'inscrivant dans le cadre international concernant les changements climatiques.

La notion de développement durable suppose une réflexion sur les critères qui en influencent les enjeux: impacts des politiques, contribution au changement climatique, gestion territoriale, services écosystémiques, qualité environnementale ou de qualité de vie, etc., qui sont autant de champs importants devant mobiliser de manière interdisciplinaire l'écologie, l'économie, la géographie, la sociologie et l'urbanisme. Outre l'interdisciplinarité, la question des indicateurs, à l'interface entre recherche et gestion, est elle aussi centrale à cette réflexion.

Marseille, une métropole multi-contours et exposée aux risques

Aix-Marseille Provence, métropole située dans le sud de la France sur les bords de la Méditerranée, révèle de multiples questions sociales et environnementales et apparaît comme un exemple pertinent pour étudier et comprendre le développement durable d'autres grandes cités littorales méditerranéennes face au défi du changement climatique. Contrairement à ce que l'on rencontre dans la plupart des autres grandes villes européennes, les 240 km² de la commune de Marseille ne sont pas entourés par une ceinture agricole péri-urbaine, mais par des massifs calcaires qui placent les espaces naturels constitués de garrigue et de pinède (90 km² sur le seul territoire de la commune) aux portes de la ville. Il en est de même à l'échelon de la métropole Aix-Marseille Provence avec une ceinture de collines qui se retrouve au-delà des collines à Aubagne, à Châteauneuf-les-Martigues, aux Pennes-Mirabeau, dans le Pays d'Aix-en-Provence... Dans sa globalité, la métropole marseillaise donne l'impression d'une ville entre les collines révélant une forte juxtaposition entre espaces urbanisés et espaces naturels, l'ensemble se confondant le long d'une bande littorale bien particulière.

La métropole Aix-Marseille Provence est caractérisée par une forte concentration et une grande diversité des risques du fait du croisement :

- 1) de forts enjeux, comme la densité croissante de sa population et l'afflux massif de touristes, le développement urbain, celui des réseaux et des grandes infrastructures, qui résultent notamment de l'attractivité humaine et paysagère de la région ;
- 2) des conditions naturelles favorables aux aléas au sein d'un climat méditerranéen caractérisé par des extrêmes qui peuvent générer alternativement des crues, des sécheresses, des feux de forêt, une sismicité non négligeable, des reliefs abrupts qui contribuent au ruissellement et à l'érosion des sols, l'influence d'un grand fleuve tel que le Rhône sur son littoral, et un grand linéaire de littoral.

La plupart des risques naturels majeurs recensés en France sont présents dans la région (inondations, mouvements de terrain, séismes, incendies de forêt, risques climatiques), de même que tous les risques technologiques (risques industriels, ruptures de barrages, risque nucléaire, risques liés aux transports de matières dangereuses, risques miniers). De plus, les prédictions sur les changements climatiques et sur les dynamiques urbaines font l'hypothèse que la plupart de ces risques vont s'accroître dans les prochaines décennies. En conséquence, la plupart des 1,8 million d'habitants des communes de la métropole Aix-Marseille Provence (INSEE, 2010) sont soumis à un ou plusieurs risques, et environ trois quarts des communes ont déjà fait l'objet d'un arrêté de catastrophe.

Un littoral particulièrement riche, dynamique et vulnérable

Le littoral, où convergent problématiques environnementales et humaines, est caractérisé par une variété de paysages et d'usages. Biologiquement très riche, avec de nombreuses espèces rares, il est également fortement investi par la société qui, au fil du temps, y a développé des usages et des relations symboliques étroites avec l'environnement naturel. La densité de population y est élevée et l'artificialisation de certains secteurs très prononcée. Cette pression anthropique s'exerce sur des habitats côtiers d'intérêt communautaire, sensibles à la fragmentation, aux espèces invasives, aux pollutions diverses, dans un contexte de menaces croissantes en termes de submersion marine et d'érosion côtière. Parce qu'il concentre des activités multiples et parfois contradictoires, le littoral présente un véritable défi pour sa gestion.

Incontestablement, l'espace métropolitain marseillais est fortement marqué par son littoral. Les enjeux qui lui sont propres, en matière de fonctionnements et de dynamiques à venir, sont colossaux, car ils relèvent du compromis social et politique pour parvenir à une coexistence intelligente entre des objectifs de développement économique et social et des objectifs de conservation, gestion et restauration des espaces naturels. S'ajoute à ces enjeux une interdépendance forte entre les divers systèmes socio-écologiques de l'arrière-pays, de l'espace

urbain et de la mer. L'exemple de la gestion des ressources en eau, qui pour une ville comme Marseille s'étend jusqu'au massif des Alpes via la Durance, est caractéristique de ces interdépendances.

Environnement-Marseille : des relations à aborder par l'observation et à diverses échelles

Pour appréhender un tel territoire, il paraît essentiel d'en accepter la complexité et, pour ce faire, de le concevoir à différentes échelles (temporelles et physiques), d'en considérer différentes dimensions (écologique, sociale, politique, géographique, économique) et de confronter les connaissances déjà existantes sur ces éléments afin d'en construire la vision la plus intégrative possible. L'innovation dans l'étude des relations environnement-ville réside dans la connaissance et la maîtrise de ces relations, plus que dans la maîtrise des approches sectorielles. Pour cela, il est nécessaire de penser les interactions multiples entre des composantes concrètes, fortement hétérogènes, et dans lesquelles les causalités de diverses natures, s'imbriquant ou se contredisant, nécessitent d'être articulées finement.

Dans cette perspective de connaissance des évolutions des effets du changement global et de l'impact anthropique, à la fois dans leurs amplitudes et leurs rythmes, les observatoires d'une manière générale et en particulier les observatoires urbains sont en première ligne pour nous renseigner sur le devenir de nos villes. Ces observations doivent non seulement couvrir un maximum de facteurs pour permettre par la suite la construction d'une image cohérente et interdépendante, mais doivent aussi se faire sur la durée, pour respecter le rythme inhérent à ces changements. Il en va ainsi des projets d'observation sur des paramètres climatiques (intra- et extra-urbains), sur des écosystèmes, des pratiques sociales, ou des activités anthropiques telles que les émissions / captations des gaz à effet de serre. La construction d'indicateurs est un domaine de recherche qu'il ne faut pas négliger et qui rentre dans cette construction de l'interrelation entre recherche et politique. Cette construction d'indicateurs ne peut se faire que par une compilation d'expériences, en particulier dans l'espace méditerranéen, de manière à rechercher à la fois les facteurs de diversité et de spécificité. Dans cette perspective, les observatoires et les réseaux d'observatoires ont une place tout à fait fondamentale, car source de mesure, de construction de référentiel, de base de recherche, et de suivi d'indicateurs pour les gestionnaires et la société civile. Il semble impossible de transformer les connaissances en recommandations sans un véritable travail de recherche-action, propre à placer les chercheurs face à la réalité de la complexité de la gestion environnementale et du développement territorial.

L'ambition de cet ouvrage

L'ambition de cet ouvrage est de donner une vision de l'environnement de la métropole marseillaise³ qui s'appuie sur diverses disciplines scientifiques au service d'une approche socio-économique.

Cet ouvrage interroge la durabilité de Marseille, considérée comme un exemple de grande métropole littorale méditerranéenne. Il propose le regard de diverses disciplines scientifiques ainsi que l'approche de professionnels issus de divers domaines (gestion des territoires, des espaces naturels, de l'urbanisme, du patrimoine, de la santé, etc.). Élaboré dans le cadre du LabEx OT-Med (voir présentation en annexe 3), il expose un état des connaissances et soulève un certain nombre de questions en se référant au paradigme du développement durable, malgré les critiques dont ce dernier a pu faire l'objet. Ce concept présente en effet l'avantage de bien délimiter trois dimensions – sociale, environnementale et économique – et de postuler que l'analyse de leurs interactions est essentielle pour rendre compte de situations incertaines conditionnées par des évolutions majeures telles que les changements climatiques. Étudier une grande ville choisie comme «laboratoire» peut permettre de tirer avantage d'un espace fertile en termes de diversité culturelle, sociale, spatiale, temporelle, institutionnelle et biologique à partir duquel peuvent émerger de nouvelles idées à tester et à évaluer. C'est aussi une opportunité pour établir des liens entre scientifiques et acteurs publics, voire plus généralement entre science et société.

Organisé autour de questions et d'enjeux de connaissances, l'ouvrage souhaite répondre au mieux aux interrogations de gestionnaires et de décideurs publics. S'il ne s'agit pas pour la recherche publique de conditionner toutes ses activités à un cahier des charges rempli par les décideurs, il est en revanche indispensable que l'une des finalités majeures des activités de recherche consiste à développer les connaissances nécessaires à une adaptation des villes au contexte de changement global, étant entendu que ce dernier résulte des effets combinés du changement climatique au niveau global et de l'accélération de l'anthropisation du monde au niveau local. Il est alors nécessaire de renforcer la dynamique scientifique interdisciplinaire sur la thématique de la relation entre ville et environnement. Et il est non moins nécessaire de fournir aux citoyens (décideurs, gestionnaires, associations, habitants, etc.) les éléments de connaissance qui continuent actuellement à manquer et qui conduisent à des décisions inévitablement hasardeuses, puisque fondées sur une compréhension incomplète des interactions entre le changement global, les écosystèmes, le cadre urbain et les sociétés qui lui sont rattachées.

3 Sauf mention contraire, l'entité géographique et territoriale considérée dans cet ouvrage est la métropole Aix-Marseille Provence.

Chapitre 1

Marseille face au changement climatique global

Xavier Giraud et Joël Guiot

CEREGE¹

Enjeux

Le transfert d'échelle du global au local :
enjeux scientifiques et sociétaux

La question climatique met en évidence le lien existant entre le global et le local. D'une part, le climat et son évolution sont des phénomènes globaux, au sens où ils impliquent des mécanismes planétaires (mouvements des masses d'air, circulation océanique, extension de la cryosphère, etc.) et généralement associés à des échelles de temps longues, de l'ordre de plusieurs dizaines d'années. Ainsi, pour pouvoir définir le climat d'une région, on s'appuie en général sur des séries longues d'enregistrements météorologiques, dont on gardera entre autres la moyenne et la variabilité (régimes de températures et précipitations en un lieu), mais aussi la mémoire des événements extrêmes.

L'aspect global de cette problématique s'illustre aussi par le fait que les changements en cours sont dus au cumul de l'ensemble des activités humaines sur le globe, qu'il s'agisse des activités humaines à portée planétaire (macro-économie, flux internationaux, etc.) ou bien des activités régionales, voire locales, qui bien souvent semblent – à tort – seulement subir ces changements environnementaux.

D'autre part, nombre d'acteurs concernés par le changement climatique paraissent restreints à un périmètre, un territoire. Il y va des collectivités territoriales, dont les politiques doivent être coordonnées pour aller au-delà de leur juridiction. Il y va de l'environnement naturel, incluant les différents

¹ Avec la participation de Christophe Yohia (OSU Institut Pythéas).

écosystèmes, qui subit la trajectoire climatique globale, mais fait face à des spécificités locales. Il y va aussi de la majorité des activités économiques, qui sont liées à un tissu régional, à des infrastructures, à des comportements sociaux, à un environnement naturel, qu'il soit dégradé ou préservé, en matière de ressources ou de cadre de vie.

Du point de vue temporel, rares sont les projections à long terme des activités humaines, dont l'horizon est souvent limité. Les écosystèmes eux-mêmes sont soumis aux variations saisonnières, voire aux événements extrêmes, alors même que le processus de changement climatique possède une inertie qui le place bien au-delà de l'horizon à court terme.

Être capable de penser une problématique telle que celle du changement climatique à la fois sur le plan global et à long terme ainsi que sur le plan local et à court terme, c'est ce que l'on peut nommer «la réduction d'échelle» (ou *downscaling*), que l'on retrouve aussi bien en analyse d'impacts qu'en modélisation climatique, par exemple. Si les scénarios d'évolution climatique du GIEC prévoient un réchauffement planétaire de 1,5 °C ou de 4,3 °C en 2100, comment cela se traduit-il à l'échelle de la région Provence-Alpes-Côte d'Azur? Peut-on être plus précis encore et faire des projections à l'échelle locale (par exemple, le devenir d'un bassin versant pour sa pluviométrie)? Pour ces problématiques de réduction d'échelle, le développement d'outils adéquats (géostatistiques, couplage de modèles climatiques, etc.) est autant un enjeu pour la connaissance scientifique qu'un enjeu sociétal, économique ou politique.

L'adéquation entre un territoire et son climat et l'identification des risques climatiques

Le changement climatique nous concerne, le plus souvent, par son impact sur nos activités humaines, ou de manière plus indirecte sur l'environnement dans lequel nous évoluons. L'étude d'impact, visant à l'anticiper, se fait au travers de l'analyse du risque. La notion de risque se définit d'une manière générale par la conjonction d'un aléa, d'une vulnérabilité et d'une exposition (voir aussi le chapitre 4, «Risques et protection»).

Dans notre cas, les aléas sont les événements météorologiques, issus des conditions climatiques générales. Il est alors commun de penser aux événements extrêmes (inondations, canicules, etc.), car bien que leur probabilité d'occurrence reste par définition faible, leurs impacts sont souvent marquants. Cependant, il ne faut pas oublier les évolutions tendancielle, telles que l'augmentation progressive des températures moyennes ou du niveau moyen de la mer, qui ont aussi un impact à moyen et long terme.

La vulnérabilité et l'exposition sont des caractéristiques des acteurs, des populations, des activités économiques, voire des écosystèmes, susceptibles d'être dépendants de conditions météorologiques, donc climatiques. La vulnérabilité représente le degré auquel un aléa peut être dommageable. L'exposition

correspond au volume susceptible d'être atteint (nombre d'habitants, pertes économiques, superficie des habitats naturels impactés, etc.).

L'évaluation du risque climatique revient alors à se poser la question de la chaîne des dépendances et d'exposition de l'activité ou de la population étudiée, afin d'y recenser les éléments susceptibles d'être impactés par les aléas climatiques. Cette démarche, en général peu intuitive, mène pourtant au constat que tous les aspects de notre société sont, à des degrés divers, climato-dépendants.

À titre d'exemple, il est possible de commencer cet exercice pour la question du transport au sein d'une grande métropole. Au premier ordre, la fluidité du trafic et le choix des modes de transport par les usagers sont déterminés par des critères de fonctionnalité, de confort individuel, de coût, de temps. Ces critères sont-ils déconnectés des conditions climatiques ? Le confort des transports en commun est-il assuré en cas de canicule ? Le report se fait-il sur la voiture individuelle et son confort relatif, au prix d'une surconsommation de carburant par la climatisation ? L'état des voiries nécessite-t-il plus ou moins de rénovation, forcément coûteuse, face à des conditions météorologiques différentes (impact des fortes températures ou des précipitations sur l'asphalte, etc.) ?

Lorsque l'exercice est mené sur l'ensemble des problématiques et acteurs d'un territoire, comme cela peut être fait pour une grande ville comme Marseille, il apparaît rapidement que tous les pans de nos activités sont plus ou moins climato-dépendants. Reste à connaître précisément chaque paramètre de cette équation du risque (aléa, vulnérabilité, exposition). Des outils existent, notamment pour les volets de compréhension scientifique (climatologie, biodiversité, ressources en eau, etc.), mais aussi en sociologie (comportements face aux changements, etc.).

État des lieux et exemples

Le changement climatique, de manière globale, est bien identifié par les travaux du GIEC

La question climatique est largement traitée par les travaux du GIEC, qu'il s'agisse du groupe de travail I sur les bases climatiques ou bien des groupes II et III sur les impacts, adaptation et atténuation. Le cinquième rapport est paru en 2014, suivi plus récemment des rapports spéciaux sur les scénarios à 1,5 °C (2018), sur l'océan et la cryosphère (2019) et sur les terres émergées (2019).

Les projections climatiques dont nous disposons, fruit d'un travail scientifique de synthèse et d'une coordination internationale, considèrent quatre scénarios globaux : scénarios de forçage radiatif, ils s'expriment en watts par mètre carré (W/m^2) et correspondent au surplus d'énergie apporté au système Terre, en premier lieu par l'effet de serre additionnel lié aux activités humaines. Ces scénarios sont alors convertibles en scénarios d'émissions de gaz à effet de serre. Au nombre de quatre, ces scénarios reflètent essentiellement

Encadré 1 - La météorologie locale

Marseille est une ville côtière entourée d'un relief fortement accidenté. Les altitudes oscillent de quelques mètres à 1000 m. Les sommets les plus imposants se situent au nord de la ville, notamment les massifs de la Sainte-Victoire et de la Sainte-Baume, qui culminent respectivement à 1011 m et à 1042 m. Coincées entre les deux massifs et le bord de mer, des collines péri-urbaines intermédiaires s'élèvent à 600 m d'altitude, comme le massif de l'Étoile ou le mont Saint-Cyr. Cette variation altitudinale est une particularité géographique constituant un facteur clé pour la météorologie locale. C'est ainsi que l'on observe, au sein de Marseille, une forte hétérogénéité des températures, du vent et des précipitations. Le fait le plus marquant est la différence de cumul des précipitations entre l'île du Frioul, se situant à 5 km de la ville, et le centre-ville. Cette île est le secteur le plus sec de France avec un cumul annuel de 300 mm, contre 550 mm sur le continent. Cette hétérogénéité spatiale des précipitations est également observée entre différents points de la ville avec des cumuls très importants en quelques heures, par exemple le 15 septembre 2009 (137 mm sur 24 heures, source Météo-France) ou le 19 septembre 2000 avec un cumul compris entre 180 et 230 mm tombés en 4 heures. Ce dernier épisode représente le record absolu sur la ville de Marseille.

Marseille, extrême dans les précipitations, l'est également dans les autres processus météorologiques comme les vagues de froid et les épisodes neigeux. Les épisodes neigeux les plus marquants sont ceux de février 1956, décembre 1962, janvier 1987, et plus récemment le 7 janvier 2009 et le 5 février 2012, épisodes caractérisés par une épaisseur de neige de 5 à 10 cm tenant au sol jusqu'au bord de mer (et jusqu'à 30 cm le 7 janvier 2009). Ces épisodes neigeux se produisent lors d'intrusion d'air froid à la fin d'un épisode de mistral (Yohia, 2017), et il est fréquent, en hiver, de retrouver la ville de Marseille encerclée par les collines enneigées. Toutefois, ces épisodes neigeux sont de courte durée, de un à trois jours, et sont suivis par un froid plus sec avec des gradients de température très nets au sein de Marseille. On retiendra quelques records de température : -10,5 °C le 12 janvier 1985, -11,4 °C le 25 décembre 1940.

Le mistral, nommé le « maître vent », est bien connu sur Marseille. On peut citer le record relevé par la station météo du Frioul (OSU Institut Pythéas) dans la nuit du 27 au 28 octobre 2012 avec un enregistrement de rafale de 154 km/h. Durant cet épisode, un ferry s'est échoué dans le port de Marseille. L'extension du mistral peut aller jusqu'aux îles d'Hyères avec une régression vers l'ouest lorsque le processus d'interaction barocline diminue. Le mistral est souvent confondu à tort avec des vents d'ouest subissant un effet Venturi en vallée du Rhône et prenant également une

composante nord-ouest sur les Bouches-du-Rhône. Ces deux régimes de vent n'ont pas les mêmes mécanismes de formation, mais ont des critères d'observation semblables en surface. Alors que le mistral est souvent froid, les régimes d'ouest s'accompagnent d'une faible variation de température ou dans certains cas d'un effet de foehn sur les massifs provençaux. Cela a pour conséquence une hausse locale de la température. Toutefois, en raison de leur direction identique et l'orientation géographique de la ville de Marseille, ces deux régimes de vent jouent un rôle non négligeable sur la température de la mer. La mer réagit rapidement au forçage mécanique induit par le vent. Des remontées d'eau profonde près des côtes contribuent à faire chuter la température en période estivale. Cette chute peut atteindre 10 à 12 °C en 24 heures suivant la dynamique du vent.

des trajectoires de choix économiques et politiques, et se traduisent par une gamme de projections climatiques. Ces résultats et projections étant pour la plupart issus de modèles climatiques globaux, les résultats sont avant tout eux-mêmes globaux, c'est-à-dire à l'échelle de la planète. La résolution des modèles utilisés est de l'ordre de plusieurs dizaines de kilomètres, ce qui indique qu'il est possible d'avoir une image générale des changements climatiques attendus, mais que la lecture des échelles locales nécessite un travail supplémentaire de changement d'échelle.

Quelques efforts récents permettant l'analyse des résultats du GIEC concernent la présentation de ces mêmes résultats de manière régionalisée (annexe 1 du cinquième rapport du GIEC, *Atlas of Global and Regional Climate Projections*). Au total, cette annexe fournit les projections pour trente-cinq régions, deux variables (changement de température et de précipitations) et deux saisons. Ces régionalisations sont à l'échelle des sous-continentaux. Pour prendre l'exemple particulier de Marseille et de la Provence, nous nous situons à la limite de deux régions: l'une s'étend sur toute l'Europe centrale et continentale (de la façade atlantique de la France jusqu'à l'Oural) et l'autre couvre tout le bassin méditerranéen. Cela reste largement insuffisant pour étendre les conclusions à l'échelle fine d'une métropole telle que Marseille. Des outils existent pour pallier ces manques.

Le programme Cordex² propose par exemple la coordination et l'accès aux résultats de ces mêmes projections climatiques sur les différentes régions du globe, et plus spécifiquement l'Europe avec le programme Eurocordex³. Les projections ainsi mises à disposition sont cohérentes avec le cinquième rapport du GIEC (modèles du programme CMIP5; scénarios RCP nouvelle

2 <http://www.cordex.org>.

3 <http://www.euro-cordex.net>.

génération), à jour et pertinentes, et issues d'un transfert de connaissances des grands centres de recherche sur le climat. Eurocordex assure une première réduction d'échelle à une résolution d'une dizaine de kilomètres.

Sur le même principe, citons aussi le portail DRIAS les futurs du climat⁴, qui «a pour vocation de mettre à disposition des projections climatiques régionalisées réalisées dans les laboratoires français de modélisation du climat (IPSL, CERFACS, CNRM-GAME)». Ceci est donc adapté à une utilisation pour des projections sur le territoire de Marseille. On trouve une telle analyse dans les publications du Groupe régional d'experts sur le climat de la région Sud-Provence-Alpes-Côte d'Azur (GREC-Sud). Celui-ci, constitué de chercheurs, mais aussi piloté par des représentants de territoires, experts techniques et institutionnels, se donne pour objectif de produire des travaux de synthèse de la connaissance du changement climatique à l'échelle de la région PACA. Le deuxième cahier publié par ce groupe concerne le changement climatique du passé, du présent et du futur jusqu'à la fin du *xxi*^e siècle⁵.

Selon cette synthèse, la température de l'air moyenne annuelle de Marseille a dépassé 1,5 °C par rapport à la moyenne pré-industrielle, alors que l'augmentation moyenne au niveau du globe est de 1 °C. En été, la moyenne du réchauffement a déjà dépassé 2 °C. Les précipitations sont, elles, restées assez stables sur le dernier siècle. De même, le nombre de jours de mistral a peu changé sur les quarante dernières années. La température de surface de la mer à Marseille a augmenté d'environ 0,5 °C sur vingt ans entre les années 1980 et les années 2000, et les données les plus fiables actuellement dans la baie de Marseille montrent une augmentation au rythme de 0,3 °C par décennie en moyenne en ce moment (voir chapitre 7, encadré 2).

Les projections d'ici à la fin du *xxi*^e siècle indiquent une augmentation des températures maximales de l'air (celles qui sont enregistrées les après-midi d'été) entre 3 et 7 °C pour un scénario laxiste, c'est-à-dire dans lequel les émissions de gaz à effet de serre continuent au rythme actuel. Pour un scénario intermédiaire, dans lequel des efforts de réduction des émissions sont faits, mais à un rythme insuffisant, l'augmentation de la température maximale de Marseille se situera entre 1 et 5 °C. La température de surface de la mer pourrait quant à elle augmenter de 1,5 °C à 3 °C à la fin du *xxi*^e siècle selon le scénario (voir chapitre 7, figure 2). Les précipitations annuelles ne vont pas changer de manière significative, mais à cause de l'évaporation accrue par le réchauffement, l'eau disponible dans les sols et pièces d'eau diminuera fortement. Pour imaginer à quoi pourrait ressembler le climat de la région marseillaise à la fin du siècle, le climat le plus ressemblant actuellement se situe dans le sud de l'Italie.

4 <http://www.drias-climat.fr>.

5 <http://www.grec-sud.fr/cahier-thematique/le-cahier-climat>.

Des outils de projection et de changement d'échelle

Le passage d'une échelle globale à une échelle plus fine en modélisation du climat se fait soit en utilisant un modèle dynamique du climat, sur la base de ce qui se fait avec les modèles globaux; soit en effectuant des interpolations statistiques tenant compte des spécificités du territoire (topographie, météorologie, répartition et nature des espaces naturels). Parmi les initiatives à l'interface entre recherche scientifique et activité économique, la société TEC Conseil a par exemple mis en place la plate-forme PROCLIM qui permet une réduction d'échelle allant jusqu'à quelques dizaines de mètres de résolution, via des corrections statistiques et des interpolations.

L'enjeu de connaissance et d'anticipation sur le futur de notre région ne se limite pas aux simples aspects physiques du climat. La question est bien de comprendre comment ces changements se répercutent sur l'ensemble de notre société. Les deux piliers de cette démarche sont donc d'une part la compréhension des mécanismes et processus à l'œuvre, qui peut être approchée en partie par l'analyse de dépendances (étude d'impact, analyse de risque), et d'autre part la projection sur les scénarios futurs, notamment rendue possible par des outils tels que la modélisation.

Outils de modélisation dédiés

La notion de modélisation doit ici être vue au sens général du terme. Il s'agit d'un outil, qu'il soit conceptuel ou numérique, visant à représenter le comportement d'un système sous l'influence de contraintes extérieures, afin d'étudier ce même comportement dans un contexte autre, en l'occurrence dans le contexte du changement climatique. Ainsi, certains modèles sont spécialisés pour l'étude du phénomène d'îlot urbain, la qualité de l'air, les agrosystèmes, la biodiversité marine, ou encore les modèles multi-agents qui essaient de simuler de manière dynamique la prise de décision des acteurs socio-économiques face à une perturbation comme un changement climatique. Ceci représente une diversité d'outils de compréhension et d'anticipation du changement climatique et de ses impacts, une fois défini le périmètre des études envisagées et identifiés les indicateurs appropriés.

La modélisation des îlots urbains et l'urbanisme

Les villes denses ont la particularité d'influer fortement sur leur environnement proche à tout point de vue, y compris sur la composante atmosphérique, au point de constituer entre autres des îlots de chaleur, c'est-à-dire des centres nettement plus chauds que les zones périphériques, en plus d'être des sources d'émission de polluants et de gaz à effet de serre. Dans un contexte de changement climatique, la compréhension des mécanismes d'échange de chaleur et d'eau entre la ville et l'atmosphère constitue un enjeu

à la fois pour la question de la qualité de l'air, de la santé publique, la gestion des modes de consommation d'énergie, d'urbanisme et d'architecture, etc.

Il existe ainsi des modèles de balance énergétique urbaine (*Town Energy Balance*, TEB), qui traitent les zones urbaines comme une série de canyons (les rues d'une manière générique), en interactions avec des modèles d'atmosphère, sol et biosphère (voir entre autres les travaux de Valéry Masson, CNRM-GAME, Centre national de recherches météorologiques – Groupe d'étude de l'atmosphère météorologique). Ce type de modèle a pu être appliqué sur la ville de Marseille, en lien avec des campagnes de mesure de qualité de l'air (Lemonsu *et al.*, 2004 et 2006). L'urbanisme et le changement climatique sont des thématiques liées l'une à l'autre et déjà largement prises en considération au travers d'actions ou de réseaux existants ou en cours de mise en œuvre. Ces programmes peuvent s'intéresser à l'aspect durable des villes en prenant en compte tous types de contraintes et où le changement climatique n'est qu'une composante (par exemple UN-Habitat, ou l'AViTeM, l'Agence des villes et territoires méditerranéens durables⁶).

Citons aussi l'initiative MC3, Mediterranean Cities and Climate Change (coordonnée par H. Mazurek, LPED), un programme initié en 2015 qui vise à constituer un réseau de villes et territoires du pourtour méditerranéen ayant mis en œuvre des initiatives d'adaptation au changement climatique. Entre autres questions, il y a celle des critères retenus pour la mise en place de plans de développement dits « durables » (voir chapitre 3).

D'une manière générale, le lien entre urbanisme et changement climatique pose la question de l'adaptation des pratiques, telles que l'isolation, les techniques et matériaux de construction, l'architecture elle-même vis-à-vis de la résistance aux températures, au confort d'habitat, pouvant aller jusqu'à des considérations de santé individuelle et publique, ou bien encore du coût économique en matière de chauffage ou de climatisation. Autant de sujets qui montrent l'aspect climato-dépendant de nos sociétés, qui sont sous l'influence (ou en adaptation) permanente du climat, sans que l'on en prenne conscience au quotidien.

La modélisation des écosystèmes, de la biodiversité et des agrosystèmes

L'environnement urbain d'une grande ville comme Marseille laisse une place restreinte, mais toujours présente, à l'environnement naturel (espèces animales et végétales, constituants des écosystèmes, constituants de la biodiversité). Les pressions anthropiques sont multiples et l'inventaire des espèces présentes, leurs stratégies de survie ou d'adaptation seront abordées dans les chapitres 5, 6 et 7. Cependant, le changement climatique sera traité dans chacun de ces chapitres comme une composante parmi les multiples contraintes qui s'appliquent à l'environnement naturel.

⁶ <http://avitem.org/fr>.

Les conséquences envisageables du changement climatique sur les espèces végétales sont parfois contre-intuitives. Par exemple, étant donné que le climat méditerranéen actuel se définit par des étés chauds et secs avec des hivers doux, il est commun de considérer *a priori* que les espèces actuellement présentes dans le pourtour méditerranéen sont déjà, et par définition, adaptées à un climat pouvant devenir plus chaud, plus contrasté en précipitations (périodes de sécheresse accrues, événements de fortes précipitations plus intenses). Choat *et al.* (2012) soulignent pourtant le fait que la majorité des espèces d'arbres, sur un panel de conditions climatiques variées, sont adaptées à une gamme de pression hydraulique (disponibilité en eau) très étroite. La mortalité associée à un déficit hydrique peut donc toucher tout type de biome et sous tout régime climatique, dès lors que la disponibilité en eau vient à être réduite par rapport aux conditions d'adaptation des arbres. Les arbres du pourtour méditerranéen, tout adaptés qu'ils puissent être à des conditions où l'accès aux ressources en eau est difficile, sont tout aussi sensibles à des variations de ces mêmes conditions que les arbres du nord de la France.

L'enjeu est alors de disposer d'une connaissance la plus précise possible des dynamiques et des vulnérabilités des écosystèmes, dans une perspective de préservation, de gestion, voire d'exploitation du milieu forestier par exemple. La modélisation est un outil performant pour des prospectives de scénarios futurs. Les chercheurs de l'unité RECOVER (Risques, écosystèmes, vulnérabilité, environnement, résilience) de l'INRAE (Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement) et de l'IMBE (Institut méditerranéen de biodiversité et d'écologie marine et continentale), par exemple, ont développé un modèle qui couvre tous les massifs de l'arrière-pays de Marseille (jusqu'à Aix-en-Provence et Cassis) et permet le passage d'échelle de la région aux sites forestiers (Vennetier *et al.*, 2008). Ce modèle se veut un outil de gestion dans le cadre du changement climatique et de son impact sur la diversité et la productivité des sites forestiers. Un tel modèle peut-il être utilisé dans l'enceinte d'une zone urbaine plus ou moins dense ?

Si l'on étend le périmètre de la ville à son arrière-pays proche ou lointain, avec notamment des relations de dépendance comme pour l'alimentation ou les ressources en eau, le devenir des agrosystèmes, des forêts, des écosystèmes en général entre alors en considération. L'IMBE développe entre autres des modèles d'agrosystèmes, c'est-à-dire incluant les diverses possibilités d'exploitation des sols, en relation avec le climat, mais aussi les pratiques agricoles (Fader *et al.*, 2015).

Les ressources en eau

Les ressources en eau sont un thème incontournable des préoccupations d'un territoire méditerranéen, d'autant plus dans un contexte de changement climatique. On peut par exemple noter le projet « Risque, ressource en eau et gestion durable de la Durance en 2050 » par Éric Sauquet, INRAE (Lyon),

Projet R²D² 2050 (décembre 2010 – décembre 2013 APR GICC⁷) qui visait à « construire une représentation fidèle du fonctionnement actuel de l'hydro-système [de la Durance] (aspects quantitatifs et biologiques) et élaborer des projections climatiques et des scénarios socio-économiques territoriaux en étroite relation avec les acteurs de terrain impliqués dans la gestion de l'eau ».

L'approvisionnement en eau de Marseille dépend des retenues d'eau de la Durance et du Verdon, qui lui garantissent une certaine sécurité dans les prochaines décennies. Mais il demeure que les ressources en eau de ces zones d'approvisionnement sont elles-mêmes liées au changement climatique. La baisse attendue des ressources disponibles en eau se situera surtout en période estivale, mais la diminution du couvert neigeux en montagne aura également des impacts importants sur le cycle de l'eau en général. Les principaux résultats sont présentés dans le cahier « Ressources en eau » du GREC-Sud⁸ (2017).

Le littoral et le milieu marin

Marseille, ville côtière, possède un littoral riche de diversité typologique, entre plages et côtes rocheuses. Autant de milieux qui résistent différemment aux événements météorologiques, telles les tempêtes. Le chapitre 6 sur « Le littoral marseillais » traite en détail de ces aspects. Citons parmi les études cherchant à mesurer et comprendre les changements météorologiques affectant le littoral, le projet IMPLIT (Impact des événements extrêmes liés au changement climatique sur les hydro-systèmes méditerranéens français⁹). C'est un exemple d'étude visant à comprendre les facteurs de fragilité du littoral méditerranéen face au changement climatique, mettant en avant l'importance des phénomènes de surcote, c'est-à-dire la combinaison de phénomènes de basses pressions et d'orientation du vent, des vagues ou de la houle, pouvant aboutir à une submersion des barrières littorales, qu'elles soient naturelles ou artificielles. Ce phénomène est à mettre en lien avec la fréquence des vents du sud qui a augmenté de façon significative depuis 1950 (Ullmann *et al.*, 2008¹⁰), phénomène qui ne peut qu'être accentué avec la montée du niveau marin que le marégraphe de Marseille mesure depuis la fin du XIX^e siècle et évalue à environ 17 à 20 cm en un siècle.

7 <https://r2d2-2050.cemagref.fr>.

8 <http://www.grec-sud.fr/cahier-thematique/les-ressources-en-eau-et-le-changement-climatique-en-provence-alpes-cote-dazur>.

9 <http://www.gip-ecofor.org/gicc/?q=node/256>. Financé par le GICC en 2003.

10 Voir aussi l'édition spéciale : Mediterranean climate: trends, variability, and change, *Global and Planetary Change*, 63 (2-3), 2008, p. 87-282.

Marseille, ville côtière, aussi bien tournée vers la mer que vers la terre

D'un point de vue météorologique, la présence de la mer joue sur des aspects aussi divers que la modération des températures atmosphériques, l'amplitude des phénomènes de brises thermiques, mais aussi les « rentrées maritimes ». Ceci touche à des enjeux tels que la santé, avec des conditions combinées d'humidité et de chaleur qui peuvent affecter diverses populations fragiles.

Le chapitre 7 « Le milieu marin autour de Marseille » aborde les enjeux du devenir de cet environnement si présent à Marseille, aussi bien pour le tourisme, l'activité économique liée à l'exploitation des ressources de la mer, ou le simple fait de préserver cette richesse naturelle.

Pour les eaux côtières, les enregistrements fiables de températures de surface restent courts et récents (environ vingt ans), mais une tendance de l'ordre de 0,3 °C par décennie se dessine au large de Marseille. Certains indicateurs biologiques donnent aussi des signes indirects de ce réchauffement (Francour *et al.*, 1994; Laubier *et al.*, 2003).

Les acteurs et la législation

Les acteurs et territoires face au changement climatique sont parfois individuellement pro-actifs, mais le plus souvent réactifs par rapport à une législation nationale ou supranationale. Ainsi l'ambition nationale de réduction des émissions de GES se traduit-elle au niveau local par des PCAET (Plan climat air énergie territorial). Marseille se trouve dans le périmètre de plusieurs structures ayant chacune l'obligation d'adopter un plan : celui de la ville (adopté le 31 octobre 2012), de la communauté urbaine de Marseille Provence Métropole (adopté en 26 octobre 2012), fusionnée en 2016 avec la Métropole Aix-Marseille Provence, du département des Bouches-du-Rhône (adopté le 15 février 2013) et de la région Provence-Alpes-Côte d'Azur (adopté le 14 décembre 2012). En 2017, la région PACA a mis à jour son PCAET par le programme « Une COP d'avance » composé de cent initiatives concrètes visant à réduire de 25 % les émissions de gaz à effet de serre issus des transports, à investir massivement dans les énergies renouvelables, développer des circuits courts, etc. avec pour objectif à long terme de viser la neutralité carbone en 2050. Ceci est plutôt une bonne nouvelle pour une région où le retard des transports doux et de la production d'énergie renouvelable (éolien, solaire) est notable.

Ces initiatives ne sont plus seulement du registre de la compréhension des impacts du changement climatique et de l'adaptation, mais bien déjà des actions d'atténuation. En effet, les grandes zones urbaines comme Marseille ont la spécificité d'être des zones denses, en population et surtout en activité économique. Si cela peut constituer un handicap et une source de nuisances par beaucoup d'aspects, c'est aussi l'opportunité de mettre en place des actions de

gouvernance cohérentes et à forte portée, concernant de multiples domaines tels que les infrastructures (transport, bâtiments, etc.) ou la consommation énergétique de la métropole (volume, mix, origine géographique, dépendances, etc.).

Prospectives

Les échelles de temps

La question climatique, pour qu'elle soit prise en considération à la hauteur de ses véritables enjeux, souffre du fait que ses échelles de temps sont beaucoup plus longues, et avec des transformations lentes, que le court terme qui caractérise les activités anthropiques actuelles. Le rythme du réchauffement observé sur la période 1951-2012 est de 0,12 [0,08 à 0,14] °C par décennie à l'échelle globale et de 0,20 °C par décennie en 2017. Ces rythmes sont environ deux fois plus rapides sur la région de Marseille. Selon les sensibilités ou les référents, cela peut paraître insignifiant, mais l'ampleur du changement devient plus perceptible une fois projetée à la fin du XXI^e siècle (projection qui est extrêmement dépendante du scénario envisagé) ou bien en comparant le changement avec les capacités d'adaptation des populations, activités ou écosystèmes. Les travaux de synthèse du GIEC rappellent bien que certaines espèces sont directement menacées dans leur capacité de déplacement et d'adaptation face au rythme de progression du changement climatique projeté, et ce même dans le scénario le moins impactant (RCP 2.6). Les autres formes de pression anthropique actuelles sur l'environnement naturel typiques d'une zone urbaine (étalement, pollution, etc.) sont en général perçues comme plus prégnantes, car plus massives ou plus rapides. Pourtant, le changement climatique vient se surimposer.

Un enjeu de la connaissance semble donc de suivre le devenir de chaque population, ou écosystème, dans son évolution, et son adaptation, pour mesurer le rythme de changement auquel sont soumis tous ces acteurs. Le surcroît de contrainte qu'induit le changement climatique pourrait très bien être celui qui fera dépasser une limite d'adaptation et conduire à la perte ou à la disparition de l'écosystème.

Les perceptions, la santé et les inégalités

Sur le registre de la santé, la canicule de 2003 illustre l'impact des vagues de chaleur sur les populations les plus fragiles. Ces fragilités sont souvent le reflet d'inégalités sur de multiples aspects de la vie, fragilités et inégalités qui seront amplifiées par les transformations subies en lien avec le changement climatique. Quant à la perception même du risque, elle peut être déconnectée du niveau d'information et plus en lien avec des facteurs économiques ou géographiques. Afin de préciser ce phénomène, des études se sont concentrées sur les seuils de température au-delà desquels une surmortalité est observée dans six villes de France, dont Marseille (Antics *et al.*, 2012 ; Pascal *et al.*, 2012).

L'approche intégrée et les observations

Les observatoires, notamment urbains, sont des outils de première importance pour contribuer à la connaissance du devenir des villes face au changement climatique. Pour ne pas rester sur une image fractionnée du problème, l'observation doit porter sur de multiples facteurs et être assurée dans la durée, afin de saisir l'amplitude et le rythme des changements. Il en va ainsi de l'observation des paramètres climatiques intra- et extra-urbains, des écosystèmes, des pratiques sociales, ou des activités anthropiques comme les bilans d'émissions de GES. Apparaît alors la question du périmètre à considérer pour l'extension du territoire. L'exemple de la gestion des ressources en eau, qui pour une ville comme Marseille s'étend jusqu'au massif des Alpes via la Durance, est symptomatique de ces interdépendances.

La complexité des relations qui existent entre tous les aspects de notre environnement urbain et avec l'environnement extérieur doit pouvoir trouver sa place dans nos concepts, notre perception du problème et des solutions. Parmi les possibilités d'une approche intégrée, des outils de diagnostic et de pronostic sur le risque et les impacts climatiques sont en voie de développement (modélisation et observations, multiparamètres, plurithématique, etc.).

En résumé

- Le rythme du réchauffement de l'air observé à Marseille sur la période 1951-2012 est d'environ 0,2 °C par décennie (soit environ +1,5 °C en cumulé depuis l'ère pré-industrielle, comparé à +1,0 °C en moyenne au niveau du globe), rythme qui s'est accéléré récemment jusqu'à 0,4 °C par décennie.
- En mer, la température de surface à Marseille augmente d'environ 0,3 °C par décennie actuellement. La température en profondeur augmente d'environ 0,03 °C par décennie.
- Le marégraphe de Marseille évalue la montée locale du niveau de la mer à environ 17-20 cm de la fin du XIX^e siècle à 2020.
- Les précipitations sont restées assez stables sur le dernier siècle.
- Le nombre de jours de mistral a peu changé sur les quarante dernières années, mais la fréquence des vents du sud a augmenté depuis 1950.

Chapitre 2

Enjeux futurs liés à l'usage actuel des sols dans l'agglomération marseillaise

Francis Cann et Claude Napoléone

INRAE

Une artificialisation croissante des sols qui peut obérer le devenir des usages agricoles et des espaces naturels de l'agglomération¹

La croissance de la population au cours du siècle dernier, conjointement à un mode de vie de plus en plus citadin, a conduit à une extension toujours plus importante des zones urbaines sur la planète (Grimm *et al.*, 2000). En France, en 2010, 22 % du territoire métropolitain est urbain, en augmentation de 19 % sur dix ans (Clanché, Rascol, 2011). Or, la localisation des espaces agricoles et naturels n'est pas indépendante de celle des villes. Il existe, au contraire, des corrélations spatiales inhérentes à l'histoire des sociétés : pour ce qui est de l'agriculture, depuis le Néolithique, les hommes ont implanté leur habitat et leurs terres nourricières à proximité l'un de l'autre² ; pour ce qui est de la nature, une ville peut très bien être localisée dans les zones où la richesse spécifique est importante (Araujo, 2003). La tendance d'urbanisation des sociétés et des espaces devant perdurer dans un avenir prévisible (Meyer, Turner, 1992), elle représente donc une menace pour l'agriculture et la biodiversité à travers le monde (Chapin *et al.*, 2000 ; McDonald *et al.*, 2008), et ce principalement à trois titres :

- L'artificialisation est un changement d'utilisation des terres difficilement réversible. En outre, au-delà de l'effet direct de la construction, les impacts

1 Ce paragraphe est issu de l'ouvrage de Napoléone, Sanz, 2013.

2 Voir l'approche paléontologique d'André Leroi-Gourhan sur la création d'ensembles fonctionnels cités-territoires agricoles dans Leroi-Gourhan, 1964.

des milieux urbains peuvent s'étendre bien au-delà des limites de la ville (Forman, 2008) par des effets indirects comme les pollutions, la fréquentation ou la fragmentation du territoire par les infrastructures de communication (DeFries *et al.*, 2007) ou encore par les concurrences sur l'accès au foncier qui évincent les acteurs agricoles par les prix – phénomène prégnant dans l'agglomération marseillaise (Geniaux, Napoléone, 2005).

- Les zones urbaines peuvent être localisées dans des espaces naturels particulièrement riches, fragiles ou rares pour lesquels chaque unité supplémentaire d'urbanisation représente un enjeu particulier en termes de conservation. Là encore, la métropole marseillaise est très concernée puisqu'elle est située dans un *point chaud* mondial de biodiversité (Medail, Quezel, 1999) en même temps que la côte méditerranéenne concentre la majeure part de la population de la région.
- Les zones suburbaines sont vectrices d'espèces exotiques acclimatées qui tendent à profiter de la régression des espèces dominantes indigènes (McKinney, 2002).

Qu'en est-il, plus précisément, des effets prévisibles des tendances actuelles de perturbations des espaces naturels et agricoles par l'activité humaine ?

Les effets de l'urbanisation sur les espaces naturels

Les évaluations des impacts de l'expansion des villes sur la biodiversité sont nombreuses. Elles ont été conduites à des échelles allant de l'international (par exemple Theobald, Romme, 2007 ou Jenerette, Potere, 2010), aux dynamiques régionales, pour la plupart liées à la fragmentation de l'habitat (Lawson *et al.*, 2008 ; Manley *et al.*, 2009). Au niveau de l'anthropisation, la côte méditerranéenne française connaît une urbanisation massive avec un développement des infrastructures associées (Benoit, Comeau, 2005) et enregistre la croissance de la population la plus rapide de France (Bessy-Pietri, 2001). Or, la biodiversité n'y est pas cantonnée dans des lieux éloignés des villes : si l'on considère par exemple les ZNIEFF³ dans les régions méditerranéennes françaises, elles témoignent d'une relative proximité géographique avec la démographie (hormis les espaces montagnards – figure 1).

Dans ce contexte, il est possible d'estimer la perturbation potentielle de chaque groupe d'espèces recensées au sein des ZNIEFF (1 315 zones représentant 18 % de la superficie des deux régions) en localisant l'urbanisation probable à vingt ans par prolongement des tendances démographiques actuelles (pour plus de détails, voir Vimal *et al.*, 2012). Trois types de perturbations anthropiques peuvent être mis en évidence : la perturbation directe (la construction à l'intérieur de la zone – pression 1), la perturbation due au

3 Zones naturelles d'intérêt écologique faunistique et floristique : zonages réglementaires qui rendent compte de l'intérêt social ou patrimonial des espèces ou des milieux existants.

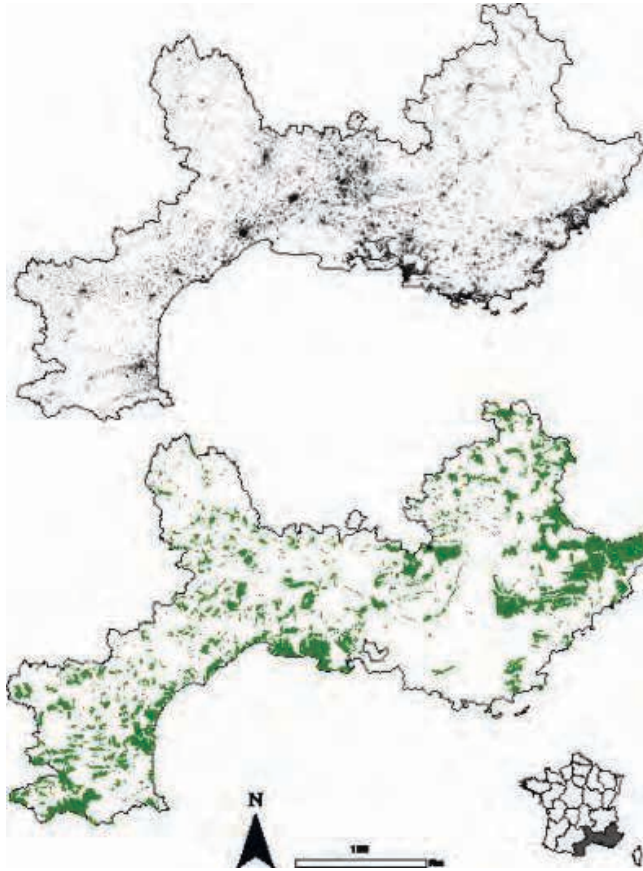


Figure 1. Répartition des zones urbanisées (haut) et des zones ZNIEFF (bas) en régions PACA et Languedoc-Roussillon. (Source : Vimal *et al.*, 2012.)

voisinage d'un espace construit, à une distance maximale de 2 km (perturbation inhérente, par exemple, à la fréquentation – P2) et la perturbation plus éloignée, sur un rayon de 50 km (comme la pollution – P3) (figure 2 *infra*). Ces estimations pour 2030 (points rouges sur la carte) peuvent être mises en regard de l'état actuel de la situation (points bleus), en gardant à l'esprit que l'impact de la croissance urbaine sur la biodiversité s'exprime de manière complexe et diffère selon les superficies impactées, la localisation des sites, le nombre ou la nature des espèces perturbées (par exemple, les mammifères sont mobiles à l'intérieur des sites ou entre les sites connectés ou peu éloignés et semblent relativement résilients à une croissance urbaine limitée)...

Globalement, 35 % des sites (soit 464) sont susceptibles d'être directement confrontés, à divers titres, à une perturbation issue de l'urbanisation d'ici 2030 (dans l'hypothèse d'une stabilité des règles publiques actuelles de protection

de la nature). Sans surprise, les sites les plus impactés sont littoraux et l'effet est d'autant plus fort que leur superficie actuelle est petite. Plus précisément :

- 1) La construction directe rend compte d'une perturbation plutôt localisée dans les franges métropolitaines, comme si les communes encore peu urbanisées et soumises aux premières pressions d'urbanisation considéraient que l'abondance de leurs ressources naturelles minorait leurs responsabilités de protection, alors que les zones les plus urbaines intègrent mieux les ZNIEFF dans les espaces naturels des Plans locaux d'urbanisme (PLU) à des fins de protection. Il est à noter que les zones ZNIEFF sont des outils de connaissance et non pas des outils réglementaires opposables à la construction. Ceci étant, les différentes façons dont elles sont intégrées dans les documents d'urbanisme témoignent de la sensibilité de chaque régulateur public.
- 2) La perturbation due au voisinage d'une zone construite est plus aléatoirement répartie dans l'espace. Elle témoigne d'un fréquent défaut de prise en compte de ce genre d'effets dans les documents d'urbanisme, sans que ce soit contingent à un type de commune ou à une localisation. Cela témoigne plutôt d'un manque d'information ou de conscience du phénomène de la part des élus et des autres prescripteurs des règlements d'urbanisme.
- 3) Enfin, la perturbation éloignée s'agrège très clairement dans les zones à haute densité démographique et renvoie à un enjeu national de régulation des flux de population.

Eu égard aux espaces naturels, la ville produit donc des perturbations différenciées que l'action publique et plus largement la société devraient prendre en compte pour protéger efficacement les espaces naturels régionaux. Si l'urbanisation directe touche relativement peu les zones naturelles recensées dans un dispositif de protection ou de connaissance de la biodiversité (zones cœur des parcs, Natura 2000), l'urbanisation contiguë touche déjà de nombreuses zones sur l'ensemble de la frange littorale méditerranéenne et la projection à 2030 montre que cette menace s'accroît. Or, ce genre d'effet est très exceptionnellement considéré dans les documents d'urbanisme existants (DeFries *et al.*, 2007), comme si les règlements qui organisent les croissances urbaines permettaient de garantir l'intégrité des zones naturelles au regard des constructions nouvelles, mais peinaient à prendre en compte la nature et l'importance des perturbations non matérielles qui se diffusent à partir des espaces construits.

Les effets de l'urbanisation sur les espaces agricoles

Dans un contexte où les documents d'urbanisme changent régulièrement (tous les cinq à dix ans selon la taille des villes), où les extensions urbaines sont incessantes, et où très peu de protections zonales irrévocables existent formellement pour les espaces agricoles, tout propriétaire foncier peut légitimement

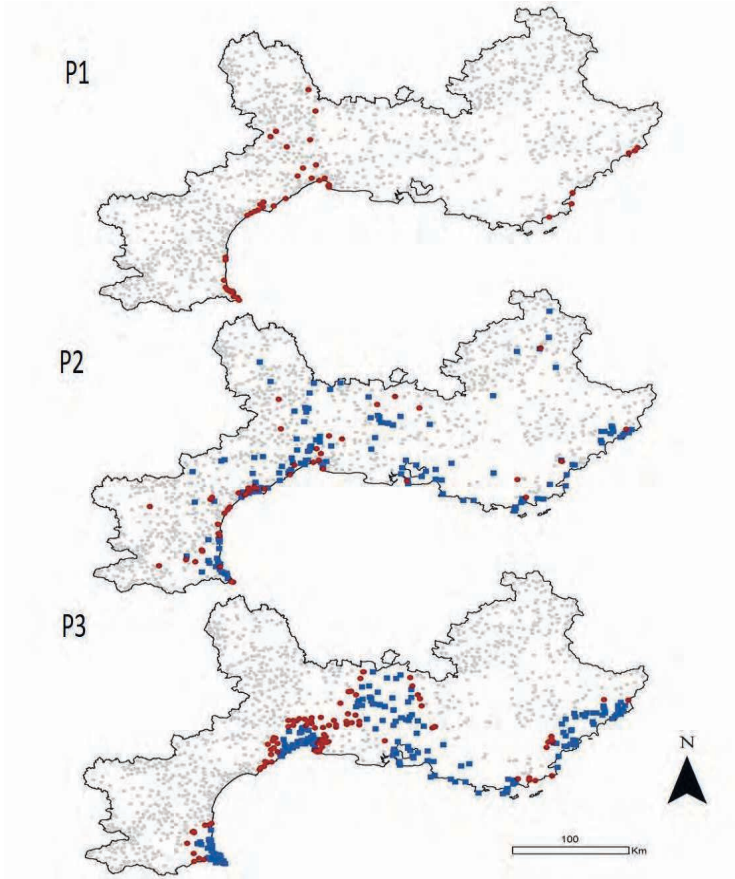


Figure 2. Répartition des pressions anthropiques internes (P1), proches (P2) et éloignées (P3) sur les zones ZNIEFF du littoral méditerranéen. Les points bleus localisent les zones actuellement menacées et les points rouges les zones probablement menacées en 2030. Les points gris correspondent aux zones non menacées. (Source : Vimal *et al.*, 2012.)

espérer voir son capital prospérer à l'occasion d'un déclassement des terres agricoles en sols urbanisables. Les prix de la terre s'adaptent alors à cette anticipation et atteignent des montants qui excluent les projets agricoles (Geniaux, Napoléone, 2005). L'agriculture, comme la construction nécessitant des espaces plats et desservis, les villes ont donc « naturellement » considéré l'espace agricole périphérique comme un espace d'opportunités ou de réserves foncières pour ses besoins en croissance spatiale (Berque *et al.*, 2006).

Pour illustrer l'importance de ce phénomène, faisons l'hypothèse que la concurrence par les prix du sol s'étend sur une distance de 10 km à partir des principales villes de Provence : ce sont alors les trois quarts de l'agriculture végétale de la région qui sont menacés (figure 3 *infra*).

Dans ce contexte, si l'on considère des effets de seuil, comme les quantités minimales nécessaires à la survie de filières par exemple, c'est un risque légal pour l'agriculture régionale qui se fait jour. Or, la difficulté pour réguler ce risque tient à ce que le phénomène d'étalement urbain sur les terres agricoles provient d'un consensus tacite entre élus, propriétaires fonciers et habitants des villes. Au cours du dernier tiers du xx^e siècle (période de généralisation de l'étalement urbain en France), les élus n'avaient aucune difficulté à trouver des superficies permettant la réalisation de leurs programmes de développement urbain, tout en répartissant la rente foncière sur des propriétaires habituellement influents dans la sociologie électorale locale. En échange, l'agriculture y a trouvé la possibilité de disposer d'une partie de la rente urbaine, dans une dynamique générale où la terre agricole était abondante du fait du progrès technique (Dedeire, 2002). Enfin, les autres habitants voyaient un développement urbain générateur de rentrées fiscales et de dotations de l'État, peu consommateur de budgets communaux puisque quasiment sans aménagements préalables (particulièrement les anciennes zones NB⁴ des plans d'occupation des sols [POS], très développées dans la région PACA). De fait, la perte en superficie agricole a atteint, dans les espaces où la pression foncière est la plus forte, des niveaux extrêmement élevés (il ne reste que 11 % de terres agricoles dans le Var et c'est une quasi-absence sur la Côte d'Azur – cf. recensement général agricole 2010).

Qu'est-ce qui explique le phénomène⁵ ?

La possibilité pour un élu ou un représentant de l'État de déclasser une zone agricole ou de détruire une zone naturelle pour y accueillir des aménagements urbains n'est pas indépendante des préférences sociales dont le système démocratique local est une expression. Ces préférences ne sont pas homogènes au sein d'une population composée d'individus dont les intérêts peuvent être divergents (par exemple, entre un propriétaire de terres agricoles cherchant à construire et un résident urbain cherchant à préserver les paysages campagnards). Or, le choix d'un usage des sols est consubstantiel à l'exclusion des autres usages possibles (si l'on fait de l'agriculture sur une parcelle, on ne la construit pas ; si l'on construit, on ne peut pas préserver le milieu naturel originel, etc.). Des oppositions et des coalitions entre différents groupes d'intérêts se forment donc et orientent les choix politiques concernant l'agencement des usages des sols. Se pose alors naturellement la question des éléments sociaux et économiques qui déterminent les choix publics de protection des espaces naturels ou, corrélativement, de sélection des espaces à anthropiser.

4 Les zones, dites «NB», desservies partiellement par des équipements qu'il n'est pas prévu de renforcer et dans lesquelles des constructions ont déjà été édifiées.

5 Ce paragraphe est issu des articles Delattre, Chanel, Napoléone, 2012 et 2014.

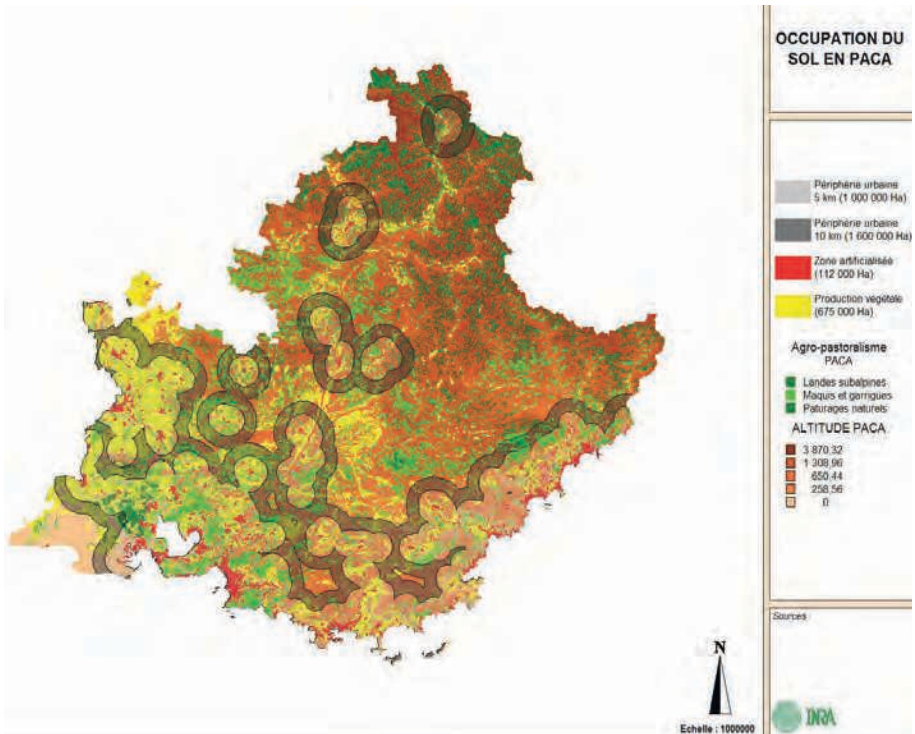


Figure 3. Halos d'influence urbaine en Provence (cercles grisés) et agriculture végétale (jaune). (Source : Delattre *et al.*, 2014.)

D'un point de vue légal et économique, le zonage d'urbanisme est motivé par la volonté de séparer des usages du sol dont la mixité n'est pas souhaitable, comme l'industrie et l'habitat par exemple (Rolleston, 1987). Toutefois, il existe de nombreuses autres motivations à l'adoption d'un zonage (Beatley, 1991), au sein desquelles les préférences individuelles tiennent une place importante, notamment par l'action de coalitions opportunistes au cours des mandatures. Pourquoi « opportunistes » ? Car il ne s'agit généralement pas de groupes de pression structurés et focalisés autour d'un objectif affiché (comme peut l'être une association environnementaliste), mais d'individus aux préférences hétérogènes dont un intérêt converge à un moment donné. Un exemple est le consensus tacite entre propriétaires de terres agricoles et habitants de pavillons dans les zones d'habitat diffus. Les premiers comme les seconds ont intérêt, sans se concerter, à ce que les croissances démographiques à venir se localisent dans des extensions urbaines nouvelles plutôt que de permettre une densification raisonnée des zones déjà urbanisées : les propriétaires fonciers trouvent de nouvelles possibilités de récupération de la rente urbaine et les habitants des zones pavillonnaires protègent les espaces non construits interstitiels qui forment la qualité de leur environnement immédiat.

Il est possible de discuter des principaux éléments qui prévalent à la décision locale d'urbanisme à partir d'entretiens réalisés auprès d'élus et de cadres responsables de l'urbanisme de la région [voir Delattre (2013) pour plus de détails]. Considérons que la décision se forme en deux étapes : tout d'abord, un arbitrage sur le fait de modifier (ou non) les documents d'urbanisme, puis, une fois cette décision prise, le choix de l'étendue des surfaces allouées à l'urbanisation nouvelle.

Concernant la décision de modification des documents liés à l'urbanisation, il apparaît alors assez vite qu'elle est peu liée au besoin effectif de logements (qui peuvent être réalisés au sein des espaces déjà urbanisés), mais est plutôt le fait de communes endettées ou ayant besoin de financements et désireuses d'accroître leur base fiscale en accueillant des ménages nouveaux : lorsque l'on confronte statistiquement les communes qui ont pris la décision d'urbaniser aux données disponibles sur la population, la richesse des ménages ou l'endettement, ce sont les communes les plus riches (celles qui ont des encours financiers importants ou bien où le revenu moyen des ménages est élevé) qui ont la moins grande propension à modifier leurs limites (voir d'autres exemples ou théorisation chez Fishel, 1987 ; Richer, 1995 ; Brody, 2006 ; Nguyen, 2009) (tableau 1).

Corrélativement, il y a un effet positif du nombre d'agriculteurs sur la décision d'urbanisation, au titre de la volonté de récupération de la rente urbaine par les propriétaires fonciers. Enfin, la localisation des communes, en premier lieu leur voisinage à une grande ville, a un effet positif sur la décision d'urbanisation au titre de la réponse à une demande de familles avec enfants (recherchant des maisons avec jardin) [tel que constaté également par Castel (2007) ou Charmes (2007 et 2009)]. Enfin, ce n'est pas la taille de la population communale qui explique la décision de modifier les documents d'urbanisme (que ce soit en valeur absolue ou en différentiel de croissance), mais la taille des populations des communes adjacentes. En substance, ce ne sont pas les communes les plus peuplées qui s'étendent le plus, mais le phénomène urbain connaît comme des seuils à partir desquels la croissance de la démographie urbaine est reportée sur sa périphérie.

Apparaissent également des effets plus surprenants. Par exemple, il existe une relation entre l'étiquette politique de l'équipe municipale et le choix d'urbanisation : les maires se déclarant affiliés à des partis de gauche ont une probabilité de changer leurs documents de 12 % moindre que les autres. Il ne s'agit pas, à notre sens, d'une sensibilité environnementale répartie différemment entre droite et gauche, mais plutôt d'électorats spécifiques nécessitant des types d'urbanisation différents : les ouvriers / employés sont plus souvent usagers d'immeubles, tandis que les cadres et professions supérieures sont plus demandeurs de logements individuels. De fait, les immeubles nécessitant des zones constructibles moins grandes que les logements individuels pour loger la même quantité de population, par effet mécanique, la sociologie électorale a un effet sur la croissance urbaine. Enfin, la façon dont le maire est élu, en

Enjeux futurs liés à l'usage actuel des sols dans l'agglomération marseillaise

Variable susceptible de jouer sur la décision de changer les documents d'urbanisme	Signe de la relation (la variable joue positivement ou négativement sur la décision)	Significativité statistique (* = significativité minimale, ** = bonne et *** = excellente)
Évolution intercensitaire de la population des communes voisines	+	**
Population des communes voisines	+	*
Nombre d'agriculteurs	+	*
Dépenses d'équipement de la commune	+	*
Commune de la Côte d'Azur (zone très urbanisée où les extensions sont difficiles)	-	***
Évolution de la population de moins de 14 ans	-	**
Revenu moyen des ménages	-	**
Marge électorale du maire en place aux dernières élections	-	*
Encours financiers des communes	-	*
Maire affilié à un parti de gauche	-	*
Chiffre d'affaires des exploitations de la commune	-	*
Évolution intercensitaire de la population	Pas de relation statistique	
Population des communes	Pas de relation statistique	

Tableau 1. Estimation des déterminants décisionnels pour la modification des documents d'urbanisme. (Source: Delattre *et al.*, 2014.)

l'occurrence sa marge électorale aux dernières élections, a également un lien avec les décisions qu'il prend: la probabilité de changement décroît de 3 % pour chaque pas de 10 % de différence en votes avec son opposant le plus direct (mieux un maire est élu, plus il pourra appliquer librement sa politique). En référence à l'électeur médian à la Fishel, les décisions les plus contraignantes sont prises par les maires ayant les assises électorales les meilleures: que ce soit dans un sens de protection patrimoniale ou de consommation des espaces

ouverts, une forte opposition au sein du conseil municipal tend à orienter les décisions vers la stricte réponse aux injonctions légales ou vers des positions conformes à la moyenne des décisions des autres communes à proximité.

En ce qui concerne maintenant l'amplitude des surfaces consacrées à l'urbanisation dans les communes ayant modifié leurs documents d'urbanisme, les variables de population ne sont toujours pas significatives: ce ne sont pas strictement les besoins de logement de la population arrivante qui déterminent l'ampleur de l'urbanisation d'une commune (tableau 2). En revanche, l'importance de la dette dans le budget communal explique, à nouveau, une part significative de la croissance urbaine, rendant compte d'une stratégie d'urbanisation peu onéreuse pour la collectivité (les zones d'habitat diffus) et accroissant l'assiette fiscale. Toutefois, la part d'espaces déjà construits sur la commune est corrélée négativement à l'étendue des surfaces ouvertes et amène à penser que la volonté de protection des espaces naturels et agricoles est d'autant plus forte que la commune a beaucoup construit dans un passé récent (Schläpfer, Hanley, 2003); une sorte d'effet de seuil dans les processus d'urbanisation. Concernant les caractéristiques des habitants, la part des ménages les plus aisés ou la part des plus âgés (au-dessus de 75 ans), voire l'évolution du chômage ont un effet convergent de minoration des croissances urbaines. *A priori* pour des raisons différentes qui tiennent à la préservation des aménités pour les ménages aisés, à la préférence pour les services urbains pour les plus âgés et à la contrainte de revenus pour les chômeurs qui orientent la demande vers les appartements.

Complémentairement, outre le rattachement politique du maire et l'importance de sa marge électorale qui permettent à nouveau d'expliquer les politiques les plus affirmées de contention de l'urbanisation, le nombre de conflits liés à l'urbanisme portés au-devant du tribunal administratif est positivement corrélé à la croissance urbaine; évidemment parce que les plus fortes croissances génèrent des occasions de conflits, mais également parce que les communes les plus conflictuelles ne peuvent contenir l'urbanisation (notamment les recours contre les documents d'urbanisme eux-mêmes, dans les zones à forte plus-value foncière). Enfin, dernier résultat complémentaire, mineur au sens statistique mais intéressant à discuter: il y a une relation négative entre la présence d'une agriculture biologique et les superficies communales nouvellement ouvertes à l'urbanisation (plus il y a de bio, moins la ville s'étend). L'interprétation reste à faire, mais deux explications peuvent être proposées: soit les politiques urbaines restrictives permettent l'implantation des agricultures biologiques (directement par la protection d'espaces dédiés à l'agriculture ou indirectement, au titre d'un signal de stabilité de la ressource foncière disponible dont les producteurs ont besoin pour investir), soit ce type d'agriculture légitime politiquement une décision d'urbanisme restrictive (l'agriculture biologique répond mieux aux préférences des urbains que les agricultures conventionnelles utilisant des intrants chimiques).

Enjeux futurs liés à l'usage actuel des sols dans l'agglomération marseillaise

Variable susceptible de jouer sur la taille de l'extension urbaine	Signe de la relation (la variable joue positivement ou négativement sur la décision)	Significativité statistique (* = significativité minimale, ** = bonne et *** = excellente)
Évolution de la population des communes voisines	+	*
Nombre de conflits d'urbanisme au tribunal administratif	+	*
Poids de la dette dans le budget communal	+	*
Part des ménages les plus aisés	-	***
Part d'espaces construits sur la commune	-	**
Maire affilié à un parti de gauche	-	*
Part de l'agriculture biologique sur la commune	-	*
Part des chefs de ménages de plus de 75 ans	-	*
Chiffre d'affaires des exploitations de la commune	-	*
Évolution du chômage	Pas de relation statistique	
Évolution intercensitaire de la population	Pas de relation statistique	
Population de la commune	Pas de relation statistique	
Marge électorale du maire en place aux dernières élections	Pas de relation statistique	
Densité résidentielle	Pas de relation statistique	
Population des communes voisines	Pas de relation statistique	

Tableau 2. Estimation des déterminants de la taille des surfaces nouvelles allouées à l'urbanisation. (Source : Delattre *et al.*, 2014.)

Pour résumer, les documents d'urbanisme permettent de gérer les espaces agricoles, mais la façon dont ils sont considérés au sein de ces documents diffère selon la nature de la commune. Elle n'est pas équivalente entre une grande ville qui protège ses dernières zones naturelles et un village agricole qui déclassé quelques parcelles en périphérie, elle n'a pas la même finalité

entre une commune riche et une autre endettée... Ceci étant, y compris dans des situations où les rentes urbaines sont supérieures aux bénéfiques agricoles, des exploitations agricoles se maintiennent dès lors que le contexte social et politique est favorable: une dynamique locale forte, une image positive de l'activité (image de marque, renommée touristique, village « bio », etc.), une forte volonté du conseil municipal ou le soutien des habitants envers l'activité agricole locale au titre de la préservation de leur cadre de vie... Sans oublier un niveau acceptable de rentabilité agricole aux yeux des exploitants, niveau qui n'est toutefois pas le même pour chaque individu. En suivant Peres (2007 et 2009), maintenir les derniers espaces agricoles dans l'agglomération marseillaise (voire en reconquérir de nouveaux) revêt d'une combinaison d'éléments tenant à la gestion des municipalités et la sociologie des ménages, au premier rang desquels l'attente des habitants / électeurs se révèle être un pivot.

Les enjeux posés au niveau des collectivités locales et les passerelles entre recherche et action publique

Lorsqu'une institution s'exprime sur l'aménagement du territoire dont elle a compétence, elle ne segmente pas son propos. Les questions d'urbanisme en général et de l'usage actuel des sols dans l'agglomération marseillaise en particulier sont abordées à la fois sous l'angle de la croissance démographique et des questions de préservation des espaces naturels et agricoles, comme de la biodiversité, sachant que l'attractivité résulte autant de l'accueil de populations nouvelles et d'emplois que de la préservation des espaces naturels.

Dans cette perspective, la difficulté à structurer un discours sur le « bon » modèle de développement est à mettre en regard de la difficulté à réguler des pratiques qui, à court terme, sont profitables pour les ménages, les propriétaires fonciers ou les acteurs de la construction, mais qui génèrent probablement des effets négatifs sur l'environnement et la qualité de vie à plus long terme. Dans ce contexte, un argument pourrait être la mise en évidence du coût global du modèle actuel de développement. À court terme, la faible prise en compte des conséquences économiques et environnementales des choix actuels d'urbanisme paraît efficace; en tout cas, la moins onéreuse. À ce titre, l'aménagement de lots à construire par l'artificialisation des terres agricoles répond, dans l'agglomération marseillaise comme dans la majorité des villes de France, à l'intérêt des acteurs de la filière, notamment en assurant un capital aux agriculteurs au moment de la retraite. Pour les ménages, c'est la possibilité d'accéder à un produit type, la maison avec jardin, dans les conditions minimales de contraintes. Toutefois à long terme, les résultats peuvent générer des coûts sociaux importants. Pour les ménages, le taux d'endettement réel doit être analysé en intégrant la charge des déplacements (coût de l'énergie et recours systématique à la voiture); pour les collectivités, c'est une forme urbaine qui rend difficile, voire impossible la rationalisation de services publics, en premier lieu desquels les transports.

Un système urbain trop fortement multipolarisé est menacé de thrombose et, à terme, c'est toute l'attractivité du territoire qui peut être mise en cause.

Socialement, les conséquences sont également marquées et ce sont les ménages les moins favorisés qui subissent les effets d'une structuration de l'espace qui les contraint à aller chercher toujours plus loin leur lieu de résidence. L'accès aux zones d'emploi depuis les lieux d'habitation devient générateur d'une forme d'exclusion sociale ; ce phénomène est assez visible entre les arrière-pays du Var et des Alpes-Maritimes dans lesquels résident les ménages alors que leurs zones d'emploi se situent sur la côte. Il y a comme un effet d'écho entre des communes littorales peu enclines à construire des logements sociaux et les communes rurales qui acceptent d'accueillir des populations nouvelles⁶. L'expérience empirique rejoint donc le point de vue du chercheur en faisant le constat que les mouvements politiques dans bien des communes ne répondent pas toujours à des impératifs d'intérêt public et que des majorités peuvent être réunies autour d'intérêts fonciers. La grande résistance des communes à perdre la gestion de leurs documents d'urbanisme (PLU) dans le mouvement de décentralisation et d'intercommunalité est assez emblématique de cette tendance.

Conclusion

Alors que les abandons agricoles ont atteint un niveau inégalé dans la proximité des agglomérations, peut-être du fait même de ce niveau d'abandon, une attente sociale se forme autour de la responsabilité que pourraient avoir les villes dans la conservation des dernières terres agricoles (Duvernoy *et al.*, 2005) et confère une légitimité politique nouvelle à l'action publique de conservation de ce type d'espace (Hersperger *et al.*, 2012). De plus, le cadre législatif et normatif actuel oblige les collectivités à se fixer des objectifs chiffrés de gestion du foncier agricole⁷ ; le Schéma de cohérence territoriale (SCOT) et sa transcription au plan local d'urbanisme (PLU) en sont l'outil privilégié⁸. Les échelles intercommunales (SCOT) et communales (PLU) deviennent donc les échelles privilégiées de définition et de mise en œuvre des projets agricoles territorialisés.

Dans cette perspective, compte tenu de la variabilité et de l'incertitude du contexte dans lequel les projets territoriaux se développent, comment accompagner la volonté de protection des espaces agricoles et naturels, lorsqu'elle

6 http://www.lemonde.fr/logement/article/2015/02/09/des-villes-toujours-retives-aux-logements-sociaux_4572539_1653445.html.

7 Loi Grenelle I, ou loi n° 2009-967 du 3 août 2009 de programmation relative à la mise en œuvre du Grenelle de l'environnement des 268 engagements de l'État et de la nation : trames verte et bleue, l'agriculture à haute valeur environnementale, primauté du principe de prévention des déchets.

8 Loi Grenelle II, ou loi n° 2010-788 du 12 juillet 2010, qui complète, applique et territorialise la loi dite Grenelle I votée l'année précédente. La loi Grenelle II décline à son tour la loi Grenelle I par objectif, chantier et secteur.

s'exprime? Peut-être en mettant en œuvre de nouvelles formes adaptatives de gestion territoriale dépassant le paradigme de l'urbanisme basé sur un plan « idéal » et statique à appliquer pour gérer un territoire. Les divers plans de la « ville idéale » dessinés tout au long de l'histoire de l'urbanisme ont constamment échoué (Choay, 1965). De plus, du fait des temporalités politiques et institutionnelles, ils ont toujours été mis en œuvre dans un contexte socio-économique différent de celui dans lequel ils ont été conçus, condamnés à résoudre les problèmes du passé (Davoudi *et al.*, 2012). Formellement, il ne suffit donc pas d'intégrer cartographiquement les espaces agricoles ou naturels existants dans les documents d'urbanisme, sans réflexion sur la nature des systèmes productifs ou des écosystèmes, ainsi que les contraintes inhérentes à la pérennité des différents espaces. Réserver des terres à l'agriculture ou à la nature sans créer les conditions permettant la pérennité des exploitations ou des milieux n'est pas très utile.

Il s'agit, à notre sens, d'un des enjeux importants liés à l'usage actuel des sols dans l'agglomération marseillaise : trouver une cohérence nouvelle entre les grandes fonctions de l'espace qui jusqu'à présent ont été concurrentes (urbanisation / agriculture / nature). Des pistes de réflexion existent et des connaissances académiques peuvent être mobilisées, mais elles ne pourront pas se mettre en œuvre sans options politiques claires eu égard à la structuration socio-spatiale de l'agglomération, émanant des décideurs publics comme des citoyens dans leur ensemble, du fait d'arbitrages potentiellement difficiles à réaliser (préserver un biotope ou un espace agricole équivaut à les soustraire au marché foncier urbain).

En résumé

- Dans la région de Marseille, les populations vivent proches des zones naturelles (par exemple le parc national des Calanques). Or, il est attendu qu'un tiers des Zones naturelles d'intérêt écologique faunistique et floristique sera directement confronté à une perturbation issue de l'urbanisation d'ici à 2030, et ce en majorité le long du littoral qui concerne aussi particulièrement Marseille.
- La perte de superficie agricole est très forte dans la région PACA côtière, perte qui se retrouve fortement dans l'arrière-pays marseillais. Du fait de la concurrence pour l'usage des sols (agriculture *vs* construction, concurrence exercée via les prix du sol), les trois quarts de l'agriculture végétale de la région PACA sont potentiellement menacés car dans un rayon de 10 km autour des principales villes de Provence. Par effet de seuil, cette menace pourrait s'avérer être létale pour l'agriculture locale autour de la métropole Aix-Marseille.

Chapitre 3

Les enjeux de l'environnement urbain

Hubert Mazurek

LPED

L'environnement urbain est une notion récente. Elle s'est surtout développée avec l'école de Chicago, puis avec la naissance de l'écologie urbaine dans les années 1970, pour évoluer aujourd'hui vers des concepts de durabilité et de résilience (Sénécal, 2007). Si la relation entre environnement (dans toutes ses acceptions) et milieu rural est facilement intelligible, du fait de l'existence de relations à la nature, à l'agriculture, à l'importance du climat ou des saisons dans cet ordonnancement, etc., la relation environnement et urbain est moins évidente. La ville est considérée comme une construction sociale artificialisée, qui a perdu, depuis le début du xx^e siècle, ses relations privilégiées avec le milieu « naturel ». La ville est aussi un objet complexe, difficile à maîtriser, dans laquelle on appréhende mal, au quotidien, la diversité des situations et des relations et ce que vient faire l'environnement dans son fonctionnement.

Les rapports du GIEC ou d'autres organismes et spécialistes (United Nations, 2011 ; Bulkeley, 2013 ; Revi *et al.*, 2014) sont unanimes : c'est la ville qui contribue le plus, directement ou indirectement, aux émissions de gaz à effet de serre. Inversement, les impacts des changements environnementaux sont et seront plus importants en milieu urbain du fait de la concentration des populations dans un espace restreint, accroissant l'exposition et le risque.

Malgré cette évidence, les enjeux de l'environnement sont encore mal évalués par les gestionnaires et les populations. Nous restons sur nos vieux modèles de la ville protectrice où rien ne peut arriver, ou du moins où tout peut avoir une solution : « La frilosité des villes à répondre aux enjeux du réchauffement climatique n'est-elle pas le révélateur de leur stress face à leur évolution ? » (Juvanon du Vachat, 2015). Ce paradoxe induit à la fois une certaine inertie dans la prise en compte des problèmes, et une certaine précipitation dans le choix des solutions. C'est le terrain des opérations immobilières nouvelles,

des solutions « smart », des écoquartiers, ou de l'hymne à la végétalisation, sans un réel engagement dans une réflexion à plus long terme sur l'évolution de la ville et de ses pratiques.

Marseille, ville méditerranéenne, n'échappe pas à la règle. Les « modèles » de ville ont évolué au gré des « modèles » de société (Touati, 2010; Paquot, 2016). Un paradigme hygiéniste a détruit les vieux quartiers denses du Grand-Carnes vers la Joliette pour laisser la place ensuite à de grands boulevards et immeubles haussmanniens, destinés aux riches bourgeois négociants; la rationalisation des territoires a conduit dans l'après-guerre à la construction de grands ensembles permettant de densifier le logement social; on a alors assisté à la paupérisation des centres-villes; puis est venue une politique d'étalement et de déconcentration des centres-villes par la promotion de l'habitat individuel dans les périphéries urbaines; le paradigme du développement durable reconfigure aujourd'hui la ville autour des quartiers dits durables comme Euroméditerranée ou la percée de trames vertes comme sur l'Huveaune ou le projet des Ayalades.

Chaque modèle a eu sa justification, son apogée, puis son abandon. Thierry Paquot (2016) commence son ouvrage par une remarquable citation de Baudelaire: « La forme d'une ville change plus vite, hélas! que le cœur d'un mortel. »

On comprend alors que les politiques d'urbanisme, si peu préparées à ces changements rapides, doivent prendre toutes les précautions nécessaires pour éviter de « tomber dans le piège » du modèle *a priori*. C'est le plus grand enjeu des aménageurs et scientifiques face à cette confrontation entre ville et changements environnementaux: innover sans tomber dans le prisme du modèle et des convictions *a priori*. Le diagnostic est important (les recherches sur l'environnement urbain sont encore balbutiantes), la recherche de solutions est impérative (l'innovation n'est pas toujours au service de la solution), mais la contextualisation est primordiale (l'espace est une donnée que les environnementalistes connaissent bien, mais que les ingénieurs maîtrisent peu).

Trois enjeux principaux relèvent de cette confrontation entre ville et changements environnementaux: 1) la ville est gourmande; 2) la ville attire et s'étire; 3) la ville est complexe.

Ce chapitre se propose de faire un premier bilan, très incomplet, des recherches menées sur Marseille et ses environs en relation à ces trois enjeux. Beaucoup de points ont déjà été abordés dans d'autres chapitres, comme le phénomène de l'étalement urbain et péri-urbain (abordé dans la partie sur l'usage du sol et les risques); d'autres points fondamentaux sont peu développés du fait d'un manque de programmes de recherches, c'est le cas par exemple de la question de la forte augmentation de la mobilité des populations en inadéquation avec l'évolution des réseaux, des flux et des fonctions urbaines; d'autres enfin ne sont à l'agenda que depuis quelques années et feront l'objet plus d'une prospective que d'un bilan.

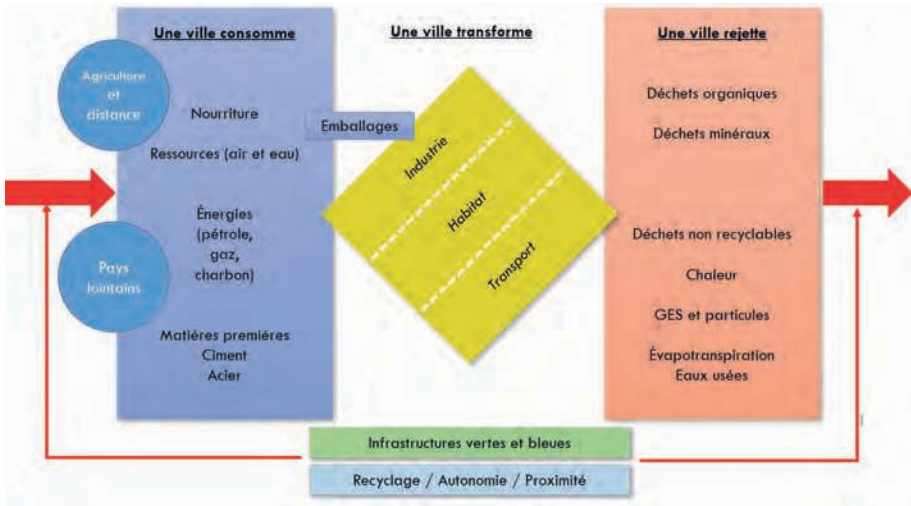


Figure 1. Le métabolisme d'une ville. (Crédits : Hubert Mazurek.)

La ville dispose d'un métabolisme

L'assimilation de la ville à un organisme, ou un écosystème, a inspiré de nombreuses méthodes d'appréciation des problèmes environnementaux et de l'efficacité des actions et des politiques. La ville absorbe des ressources, les transforme et rejette les excédents ; ce processus, dit métabolique, consomme de l'énergie et peut avoir des bilans très déséquilibrés (figure 1).

Beaucoup de villes réalisent ces bilans, comme Bruxelles¹, Paris² ou Barcelone³, et s'en servent comme outil de contrôle et de planification pour trouver un équilibre ou renforcer certains processus de transformation comme le recyclage ou l'amélioration du traitement des eaux usées. Le grand défi de ce siècle est en effet de transformer la ville dépendante en ville autonome.

Marseille ne dispose pas de ce type de diagnostic. Le GREC-Sud, au moyen de son « Cahier thématique du groupe de travail ville » (Briche *et al.*, 2017a et 2017b), nous donne quelques éléments qui fixent les grands déséquilibres au sein de la région, la métropole et la ville de Marseille. C'est une approche qu'il faudrait affiner au niveau des grandes villes : programme de recherche urgent en perspective.

1 Voir par exemple Ecores sprl, ICEDD, BATir (ULB) (2015) *Métabolisme urbain de la région Bruxelles-Capitale*.

2 Voir par exemple <http://www.futurs-urbains.fr/groupe-transversaux/les-groupe-transversaux-du-labex/groupe-transversal-metabolisme-urbain>.

3 Voir par exemple <https://iermb.uab.cat/es/iermb/estudi/el-funcionamiento-del-metabolismo-urbano-metropolitano-indicadores-de-eficiencia-territorial>.

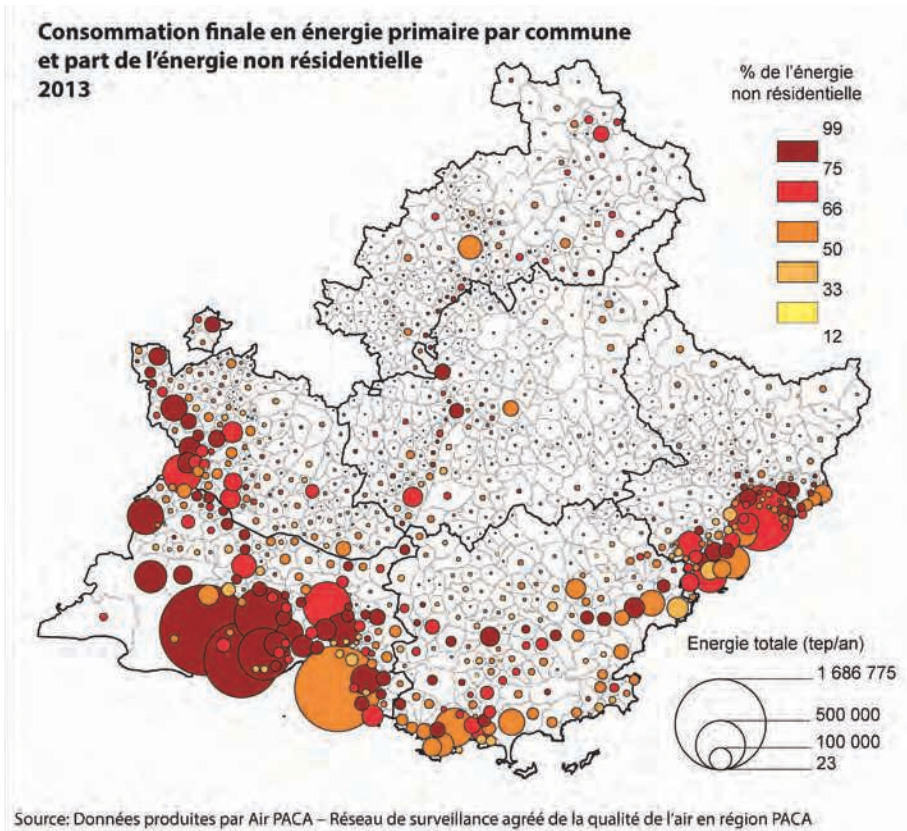
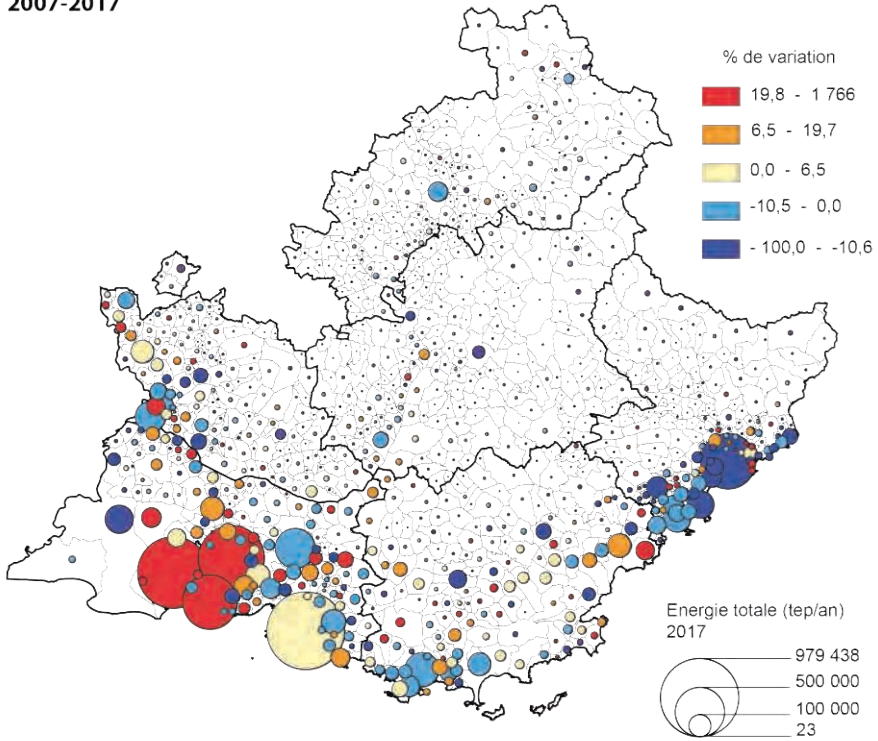


Figure 2. La consommation en énergie en région PACA.

La région PACA est très déséquilibrée dans beaucoup de domaines. Les villes de plus de 200 000 habitants concentrent 50 % de la population régionale et 75 % de la consommation des ressources et de la production des effluents. 80 % de la production industrielle est concentrée dans les unités urbaines de plus de 200 000 habitants (contre 37 % en moyenne en France)⁴. La figure 2 montre de plus que les activités économiques (symbolisées en cercles par la consommation totale d'énergie et en couleur par la part de l'énergie non résidentielle) sont très concentrées dans quelques zones géographiques: le couloir rhodanien, la « grande métropole » marseillaise allant du complexe de Fos à Aubagne et la bande littorale des Alpes maritimes. La consommation des énergies fossiles en région PACA est trois fois plus importante que la moyenne française et les traitements de cokéfaction et de la chimie lourde sur le complexe de Fos constituent une source importante de GES et de pollution.

⁴ INSEE Études (2013) PACA, n° 27.

**Variation de la consommation d'énergie total
2007-2017**



Source: AtmoSud, Système CIGALE, inventaire V6.3

Figure 3. Variation de la consommation en énergie en PACA.

La consommation énergétique reste globalement stable en PACA depuis dix ans, autour de 42 TWh⁵ (10,2 Mtep/an en 2007 et 10,6 en 2017), mais avec une différenciation spatiale régionale très importante (figure 3). La croissance des pôles industriels est bien marquée, ainsi que la croissance urbaine des petites communes périphériques ; alors que l'on observe une baisse de la consommation des villes tertiaires, en particulier de la côte varoise et des Alpes-Maritimes. Seuls 41 % des besoins totaux en énergie sont produits dans la région, malgré son fort potentiel en énergies renouvelables (éolien, solaire et hydraulique), le solaire ne représentant que 3,6 % de la production régionale. Sur un total de 5,2 Mtep/an que consomme le département des Bouches-du-Rhône (soit 50 % de la consommation régionale en 2017), 50 % sont consommés dans les communes de Fos-sur-Mer, Marseille, Martigues et Berre-l'Étang, montrant l'importance de la part de l'industriel dans cette consommation. Une étude du

⁵ RTE (2016) *Bilan électrique et perspectives en PACA*, 44 p.

CEREMA⁶ indique que la métropole Aix-Marseille-Provence consomme en moyenne 8,7 fois plus que celle de Nice-Côte d'Azur. Elle se trouve cependant en dernier des méthodes de production non traditionnelle (hydro-électrique, solaire, biomasse, etc.) et des énergies renouvelables (4 % de la production régionale); bilan encore moins bon lorsque l'estimation est réalisée en rapport au nombre de logements.

Du côté des rejets, les émissions de GES suivent le même schéma que la consommation (figure 4). Sur un total de 26 Mt/an de CO₂ induits émis en Bouches-du-Rhône, en 2017, deux communes représentent 50 % de ces émissions : Martigues et Fos-sur-Mer⁷. 75 % des émissions sont réalisées par ces deux communes avec Marseille, Berre-l'Étang, Tarascon et Aix-en-Provence. Les émissions de Marseille (2 Mt/an de CO₂) le sont principalement dans le secteur des transports, la commune étant faiblement industrialisée.

Globalement, les émissions ont diminué entre 2007 et 2017, passant de 29,7 Mt/an à 25,8 Mt/an, ce qui représente 13 % de réduction, 1,4 % annuel, taux relativement faible au vu des exigences nationales et internationales. La croissance la plus grande des émissions se trouve dans les communes de la périphérie de l'étang de Berre et des grandes villes, du fait de l'expansion urbaine et des transports (entre 20 à 40 % en dix ans). En revanche, on observe une diminution importante des émissions dans les lieux industriels comme Berre-l'Étang (-48 %), Port-de-Bouc (-32 %), Marseille (-4 %) et même Fos-sur-Mer (-1,1 %).

Dans cette approche sur le métabolisme, il est possible de faire des bilans sur l'ensemble des ressources et des déchets. Ces informations existent de fait dans de nombreuses bases de données d'institutions publiques ou privées régionales, mais n'ont jamais été rassemblées pour comprendre les points de déséquilibre de ce métabolisme.

La production du secteur cimentier a par exemple doublé en quinze ans et commence à diminuer depuis la crise de 2008. Certes, la production de ciment est largement délocalisée hors des zones urbaines, mais rentre dans le bilan énergétique des villes qui en sont les principales consommatrices. C'est un secteur extrêmement gourmand en énergie et donc très émetteur de GES. La consommation, elle, ne cesse d'augmenter à un rythme de 3 à 4 % par an. En moyenne, la fabrication d'une tonne de ciment produit 800 kg de CO₂. La cimenterie de Beaucaire produit à elle seule 800 000 tonnes de ciment par an, représentant la construction de 30 000 maisons individuelles; soit 27 tonnes de ciment, et 21 tonnes de CO₂ par maison.

Un autre secteur, souvent oublié des thématiques de l'environnement, est le comportement alimentaire en milieu urbain. On sait que ces comportements

6 CEREMA (2015) *Structuration de la métropole Aix-Marseille-Provence. Chantier «Accompagner la transition énergétique métropolitaine»*, 35 p.

7 Base de données Cigale de AtmoSud : <https://cigale.atmosud.org>.

Émission de CO2 par commune des Bouches du Rhône 2017

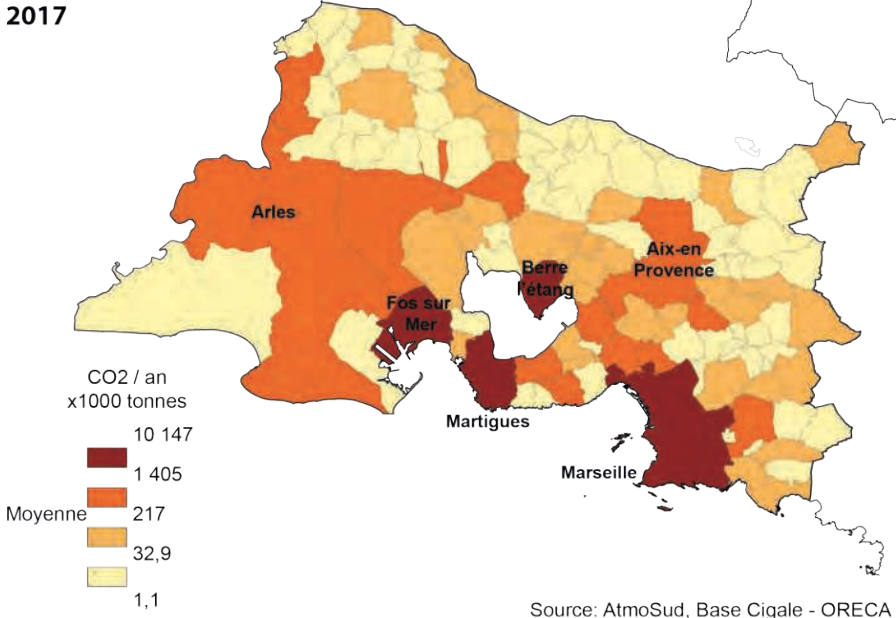


Figure 4. Les émissions de GES par commune dans les Bouches-du-Rhône.

se modifient avec la taille des villes. L'usage des emballages, des plats cuisinés, et le gaspillage alimentaire s'accroissent avec la taille de ces villes et l'importance du tertiaire. En PACA, ce sont 445 kg de déchets ménagers générés chaque année par habitant (soit 15 % de plus que la moyenne nationale) et 8,5 millions de tonnes de déchets inertes.

En 2015, le territoire Marseille-Provence annonçait 641 000 tonnes de déchets à traiter, dont 415 000 tonnes de déchets ménagers (396 kg/an/hab.), et seulement 31 kg dans les tris sélectifs kg/an/hab., soit environ 10 % des déchets; 330 000 tonnes le sont uniquement sur Marseille⁸. Le coût énergétique est aussi très élevé, à cause du transport nécessaire à la collecte, et aux processus de traitement et de stockage.

D'autres ressources seraient à étudier telles que l'eau, les métaux, les fluides issus du pétrole, les produits agricoles, etc. autant dans leur contribution à la ville que dans la génération de résidus et déchets.

L'eau est par exemple un thème intéressant sur Marseille. L'alimentation y est assurée par le canal de Provence qui apporte les eaux des Alpes depuis plus d'un siècle; ce qui a résolu ainsi les problèmes de pénurie et d'épidémie.

⁸ Métropole Aix-Marseille Provence (2016) *Rapport annuel sur le prix et la qualité du service public de prévention et de gestion des déchets ménagers et assimilés*, 66 p.

Mais cette indépendance pourrait être remise en question par les impacts possibles du changement climatique, en relation à une population qui a été multipliée par trois en un siècle et au développement de l'industrie. Une réduction de la ressource vers le milieu du siècle est une option possible qui nécessitera des mesures d'adaptation qui ne sont pas encore bien évaluées (Sauquet, 2015), dans une ville où la culture de l'eau est avant tout celle de l'abondance et de la maîtrise technique (Chalvet *et al.*, 2011). Son traitement est encore plus problématique dans une ville touristique, dont l'image est largement dépendante de l'avenir de ses littoraux et du parc des Calanques. En 2016, les plages ont dû fermer près de vingt jours en pleine saison touristique. Les rejets en mer sont encore importants, en particulier à partir des rivières, comme l'Huveaune, qui ont accumulé les résidus industriels et les plastiques dont on sait qu'ils sont un des principaux contaminants de la Méditerranée.

L'étude du métabolisme urbain devient un enjeu important pour assurer un contrôle réel de l'efficacité écologique d'une ville comme Marseille et sa métropole, et ainsi favoriser les formes de recyclage pour éviter les déséquilibres trop importants, et assurer un modèle de développement économique durable.

La ville s'étire

Un autre enjeu concerne l'utilisation de l'espace, c'est-à-dire la limite de la croissance urbaine comme facteur de soutenabilité. Il est lié à un choix politique important : étalement ou densification du tissu urbain, mais aussi modèle de croissance autour de la centralité ou de la polyfonctionnalité. On pourrait citer de nombreux exemples de villes qui font des choix volontaires dans leur plan d'aménagement en faveur de l'étalement (les villes américaines et latino-américaines par exemple) ou de la densification (Singapour, Dubaï ou Bristol).

Nous avons vu dans le chapitre 2 que l'expansion urbaine aux dépens des espaces à caractère naturel, ou des espaces agricoles est une caractéristique de l'évolution du paysage marseillais. Retrouver un équilibre entre espaces agricoles de proximité et croissance urbaine ne peut se faire qu'avec une politique de densification. Les élus en sont persuadés et multiplient les actions et la sensibilisation dans ce sens, comme l'exposition « Dense, dense, dense » promotionnée en 2017 par la conseillère départementale et adjointe au maire de Marseille déléguée à l'urbanisme. Mais entre l'échec social des grands ensembles et l'échec environnemental des habitats individuels, existe-t-il un « modèle » intermédiaire qui pourrait s'implanter à Marseille autant dans la construction que dans la rénovation ?

Car la densification a des avantages en matière d'efficacité énergétique ou de mobilité, mais n'a jamais réussi à montrer une avancée en matière de qualité de vie ou de qualité environnementale. La densification seule n'a aucune efficacité si elle n'est pas couplée à la redéfinition des fonctions de la ville (Reigner *et al.*, 2014).

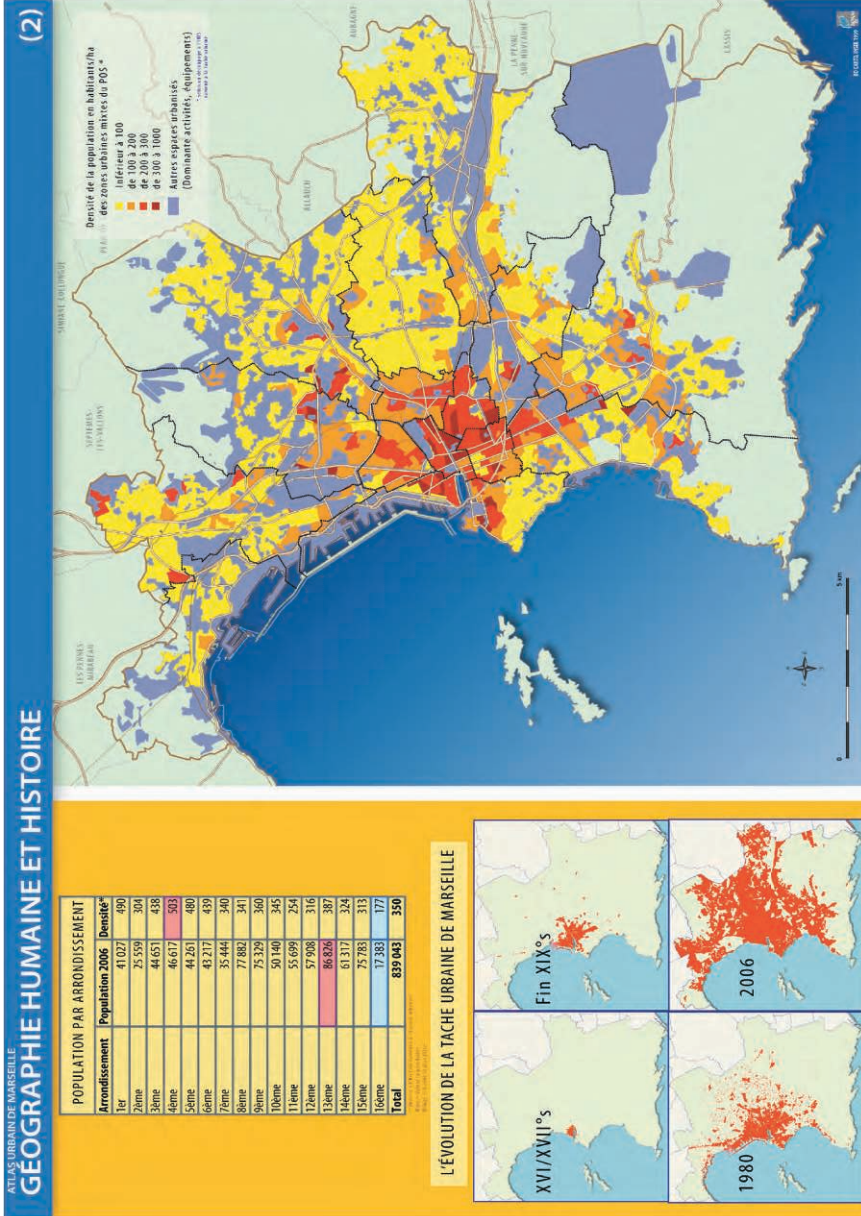


Figure 5. Atlas urbain de Marseille, p. 5. (Crédits: AGAM, mai 2009.)

La figure 5 (*supra*), extraite de l'*Atlas urbain de Marseille*, réalisée par l'AGAM, pose le problème réel de la problématique environnementale des villes en général: leur hypercentralité. On retrouvera dans les cartes de cet atlas (Mixité emploi/habitant, Zonage POS, Densité de logement, Densité de l'emploi, etc.) la même structure urbaine caractéristique de notre histoire occidentale: un centre-ville concentrateur et une périphérie lâche. Cette centralité, et la densification dans une large mesure, pose un certain nombre de problèmes, dont nous avons déjà discuté dans d'autres chapitres:

- les influences prévisibles de l'étalement et/ou de la densification sur les impacts des catastrophes naturelles et anthropiques, incluant, dans le cas de Marseille, la question de la gestion du littoral (voir le chapitre 6);
- les influences sur le climat urbain et sur l'imperméabilisation, et de façon générale l'artificialisation des sols et de l'espace urbain densifié;
- les influences nécessaires à la gestion et à l'économie de l'espace, en particulier pour une optimisation des réseaux et des ressources.

Le modèle universel de la ville, centre-périphérie, conditionne tout type de transport, *a fortiori* lorsque les fonctions (administrations, production, récréation, résidentiel, etc.) sont spatialement spécialisées.

Les mobilités participent de manière très significative au changement climatique et sont elles-mêmes très dépendantes de l'étalement et de la forme urbaine. Mais les problèmes de mobilité ne sont pas seulement dus à un manque de réseau viaire ou de moyen de transport collectif; ils dépendent avant tout de la morphologie urbaine et de la distribution des activités et des services. Il est nécessaire de réfléchir à l'optimisation des déplacements par la structuration (regroupement, concentration) des lieux de vie (habitats, commerces, loisirs, etc.) en relation aux lieux d'activités (services, industries, zones d'activités, etc.), mais aussi aux lieux de production et de consommation. Ce sont tous les enjeux de la polyfonctionnalité, l'agriculture péri-urbaine et en général de la nécessaire diminution des mobilités quotidiennes et de courtes distances. Il faut ainsi repenser le modèle urbain autour de cette diminution de la mobilité et de la réduction des nuisances et des pollutions par des transports plus efficaces en énergie, voire des transports sans énergie (bicyclette), pour lesquels Marseille a beaucoup de chemin à parcourir.

Si nous désirons comprendre cet enjeu de la mobilité, et ainsi interagir avec les collectivités territoriales en charge de l'aménagement, il est nécessaire de prendre en compte l'ensemble de ces entrées: climat, péri-urbain, usage du sol, qualité de l'environnement, air, etc. pour proposer une modélisation satisfaisante. Les propositions urbaines sont encore aujourd'hui bien timides et les scientifiques ont une réflexion à faire sur l'organisation urbaine et sur la formation des cadres dans ce domaine.

L'étirement de la ville a aussi des impacts sur la fragmentation de l'espace, tant du point de vue géographique, écologique, que social. De nombreux

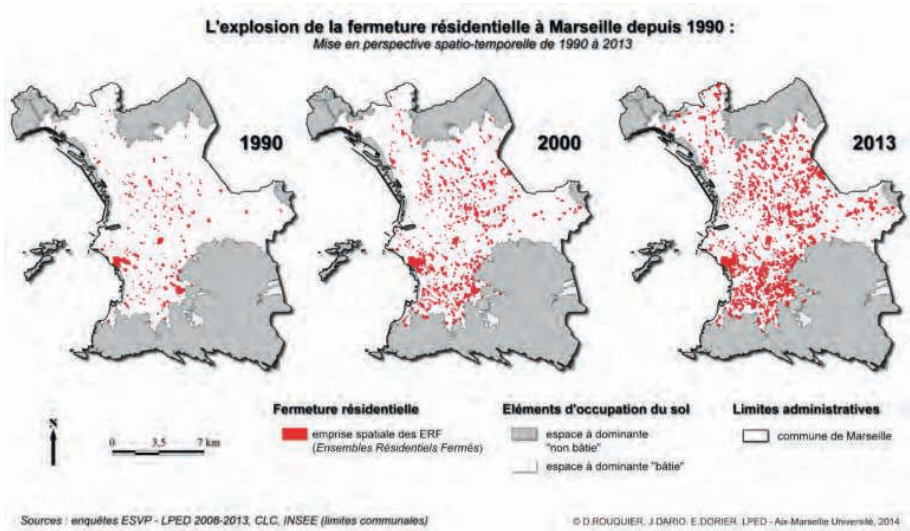


Figure 6. L'évolution des superficies de constructions incluses dans des « résidences fermées ». (Crédits : Rouquier, Dario, Dorier, 2015.)

travaux ont été engagés dans ce domaine par l'équipe du laboratoire LPED (Audren *et al.*, 2016a, 2016b et 2019; Dorier *et al.*, 2010, 2012 et 2016; Robles, Mazurek, 2016). Cette fragmentation de l'espace peut être néfaste dans le cadre de la mobilité et de la maîtrise des flux (fermeture de résidences) ou des inégalités sociales ou environnementales (ségrégation par l'habitat, gentrification, inégalités d'accès aux services, etc.), avec des impacts mal connus dans le domaine de l'environnement (biodiversité, trames vertes, couloirs, espaces à caractère naturel, espaces protégés, etc.) ou de la régulation thermique (ouverture de canyons, fermeture, barrières, etc.).

À Marseille, l'expansion de la fragmentation résidentielle est impressionnante depuis vingt ans (figure 6). Marseille est une ville dans laquelle peut se lire une véritable « crise de la rue⁹ » (Roncayalo, 1996; Mangin, 2006; Audren *et al.*, 2016b),

où une grande partie de la trame est demeurée privée, la problématique représente un fort enjeu, particulièrement dans une période de renouvellement des outils de l'urbanisme et des structures mêmes de l'institution publique (PLU approuvé en 2012, projection du PLU intercommunal, émergence à terme de la métropole...). C'est ainsi que Marseille compte en 2013 plus de 1531 ensembles résidentiels fermés (ERF) occupant 13 % de sa surface urbanisée. (Audren *et al.*, 2016b)

9 Voir les programmes « Résidence fermée » et « Ville passante », menés au LPED en partenariat avec la Ville de Marseille.



Figure 7a. Cœur d’îlot près de la Blancarde. (Crédits : H. Mazurek.)

L’expansion urbaine favoriserait-elle sur Marseille une forme de construction collective qui nuirait à la mobilité et à la possibilité de nouvelles politiques urbaines? La résidence fermée est l’antithèse de la ville durable, dans la mesure où elle fragmente l’espace, empêche la mobilité courte et contraint à un fonctionnalisme de spécialisation.

Un autre aspect de la fragmentation est le morcellement paysager, induit par les constructions, les voies de transport, l’imperméabilisation des sols, ou même la fragmentation sociale (jardins collectifs *vs* jardins privés par exemple). Les « tâches » d’habitat de nature se rétrécissent alors que les barrières entre ces tâches deviennent de plus en plus prononcées. Cette fragmentation des habitats peut conduire à une perte de biodiversité dont on estime mal les conséquences en temps de changement climatique. Le LPED a travaillé sur les espaces « à caractère de nature » (figures 7a, 7b et 7c), du point de vue de leur répartition géographique dans la ville, mais aussi par l’évaluation de la biodiversité animale et végétale. Plusieurs auteurs ont remarqué la diminution de la biodiversité, lors d’inventaires entomologiques, depuis la périphérie (sur des espaces continus comme le massif des Calanques ou de l’Étoile), vers le centre (jardins en cœur d’îlots), correspondant à l’augmentation de la densité du bâti et à l’isolement des jardins privés de leurs sources périphériques (Lizée *et al.*, 2011; Audren *et al.*, 2016b). Un observatoire *in situ* des papillons¹⁰ a

10 <http://madeinmarseille.net/16882-parc-urbain-papillons-biodiversite> (voir l’encadré 10 du chapitre 5 et l’annexe 2 pour plus de détails).



Figure 7b. Parc collectif Borély. (Crédits : Wikimedia.)



Figure 7c. Toits végétalisés et balcons arborés. (Crédits : Ateliers Jean Nouvel.)

d'ailleurs été mis en place pour un suivi de ces populations sur différents types de jardins (figures 8a et 8b *infra*). D'autres programmes, comme « Sauvage de ma rue¹¹ » (voir aussi chapitre 5), permettent de faire un suivi de la flore spontanée du point de vue de leur similarité entre centre et périphérie, et estimer la proportion d'espèces invasives.

La croissance urbaine a toujours été une préoccupation des urbanistes, mais l'étalement n'est entré dans le débat que très récemment, avec les notions d'environnement et de qualité de vie. Les modèles d'occupation (les grands

11 <https://www.tela-botanica.org/projets/sauvages-de-ma-rue>.

ensembles marseillais des années 1970 par exemple, ou la mode des « zones » des années 1980 et 1990) ainsi que le marché du foncier ont façonné la structure de cet étalement, très difficile de reconverter, à cause des pratiques qu’ont générés ces modèles (habitat individuel, voiture individuelle, pratique des zones commerciales et des centres-villes, etc.) (Dumont, Hellier, 2010). Aujourd’hui à Marseille, l’impact environnemental de ces modèles est moins préoccupant du point de vue de la concurrence vis-à-vis des terres agricoles, que du fait du gaspillage énergétique, des convulsions du trafic, de la fragmentation et la dégradation des conditions des habitats. Les recherches de nos instituts doivent s’orienter de plus en plus vers l’étude de toutes ces interfaces entre structures, fonctions, climat, réseaux, fragmentation, biodiversité, pratiques, foncier, etc., afin de proposer de nouvelles solutions en matière de morphologie urbaine.

La ville est complexe

On le voit, la ville est de plus en plus complexe et les réponses, face aux enjeux, doivent prendre en compte cette complexité, mais aussi, et surtout, la diversité des phénomènes mis en jeu et leurs interrelations. Les solutions prédéterminées sont aujourd’hui à exclure car on sait que les modèles ont une durée de vie très limitée; les modèles d’aujourd’hui seront-ils encore valables dans trente ou cinquante ans? Auront-ils une réelle efficacité sur l’atténuation et l’adaptation au changement climatique? Pour l’instant, leur application se limite le plus souvent à des prototypes, des cas particuliers, souvent sur des constructions neuves d’immeubles ou de quartier et très rarement sur de la rénovation voire de la transformation urbaine. La ville durable n’est cependant pas équivalente à l’immeuble ou au quartier durable (Debouverie, 2017). L’îlot expérimental Allar (Euroméditerranée à Marseille; Geiling, Bidet, 2015) en est un bon exemple. L’approche par le projet urbain, la labellisation EcoCité, la modélisation sur un îlot prototype à partir de simulations, l’introduction de schémas architecturaux (toits végétalisés, orientations sur les brises, matériaux particuliers, etc.), les « smarts », etc., s’accordent avec un langage aujourd’hui stéréotypé qui semble indiquer que les architectes ont des solutions, et surtout que la maîtrise technologique réglera le problème de l’urbain face à la nature. Ce principe (appelé « prométhéen » par Salomon Cavin, Bourg, 2010) nous rapporte à l’expérience de Masdar City aux Émirats arabes unis, ville zéro carbone qui devait être un modèle de ville durable, mais qui est aujourd’hui à la limite de la survie, car la dimension humaine a largement été sous-estimée (Mazurek, 2018).

Cette complexité de la ville nous invite à dégager deux principes dérivés de nos recherches :

- La ville se construit aussi par ses individus et par leurs pratiques. L’artificialisation des quartiers durables n’est donc pas forcément un gage de cette durabilité; l’organisation de l’espace urbain et sa rénovation impliquent avant tout la préservation d’un patrimoine, d’un savoir-vivre,



Figure 8a. Le Parc urbain des papillons, un jardin aménagé pour surveiller la biodiversité (terrain prêté par la mairie de Marseille). (Crédits : Magali Deschamps-Cottin.)



Figure 8b. Un parcours dans les quartiers pour des mesures itinérantes du climat urbain et de sa perception (programme EUREQUA). (Crédits : Elisabeth Dorier.)

et d'une certaine participation du citoyen. La ville est permanente et durable; elle est le produit d'une construction de plusieurs centaines d'années, toujours visible et pratiquée aujourd'hui. De même, les choix effectués aujourd'hui en matière de pratiques d'urbanisme (bâti, relation bâti-infrastructure, types de logements, densité, etc.) auront encore un impact dans un siècle, ce qui implique une responsabilité très forte des acteurs dans leur définition, surtout en temps de changement climatique.

- La ville durable n'est pas qu'une compilation de projets urbains, c'est aussi une réflexion sur un nouvel urbanisme intégrant l'ensemble des composantes de la ville. Dans le cas contraire, et les études sur la fragmentation l'ont bien montré à Marseille, la course à l'«éco» conduit le plus souvent à la génération de nouvelles inégalités. La qualité environnementale dans le champ institutionnel «se traduit par la construction de nouveaux référentiels en matière de cadre de vie urbain, participant aux manières actuelles de faire la ville à toutes les échelles. Pour autant, la diffusion de ce référentiel n'est pas en soi un gage de qualité urbaine au regard de l'ambivalence de la production de la ville» (Berry *et al.*, 2015)¹².

Les travaux menés aujourd'hui par les équipes du LPED tentent de dépasser ces approches technifiantes ou normatives pour inclure des référentiels plus subjectifs, tels que qualité de vie, bien-être, relations sociales, quotidien, univers de référence, etc.; les sciences sociales ont largement investi cette notion, géographie, sociologie, mais aussi psychologie environnementale et même psychiatrie sur les perceptions, les nuisances ou les aménités. La façon dont le citoyen s'insère dans son habitat, son quartier, sa ville et compose avec la notion de «Nature en ville» est tout aussi importante que la maîtrise énergétique ou la durabilité d'un bâtiment. Entre Prométhée et Orphée (Salomon Cavin, Bourg, 2010), de nombreuses variantes sont possibles.

Des enjeux particuliers naissent de cette complexité des situations, des structures et des relations entre le social et l'urbain. La nature en ville (jardin, parcs, biodiversité, etc.), les coulées vertes (les Ayalades, l'Huveaune, le Jarret), la végétalisation des quartiers et des habitats (écoquartiers «Les Fabriques», «Smartseille», ou «l'îlot Allar»), les espaces protégés (parc national des Calanques, parc marin de la Côte bleue, réserve du Riou, etc.), mais aussi les espaces pollués (37 sites recensés sur Marseille) sont autant de domaines de réflexion pour les aménageurs et les scientifiques; on en attend une modification substantielle de la vision de la politique et de l'aménagement urbain.

Marseille devient «un laboratoire métropolitain des relations ville-nature» (Barthélémy *et al.*, 2017) car «Marseille recèle, à l'intérieur même du tissu urbain, une quantité de friches, interstices, parcs publics, jardins privés ou

12 Voir aussi les résultats de l'ANR EUREQUA LISST-LPED portant sur «l'évaluation multidisciplinaire et la requalification environnementale des quartiers» (2012-2017).

partagés...». Ce «Petit atlas d'une ville-nature» synthétise six années de recherche de l'écologie urbaine à la sociologie, montrant la diversité des situations et des enjeux autour de l'environnement urbain : espaces protégés et ordinaires, pierre-eaux et végétal, la biodiversité « quelconque », les déclinaisons du vert, une faune étonnante, jardins dans la ville, trames verte et bleue, le vert public et le vert privé, etc.

Ces réflexions transversales sur les enjeux écologiques, que l'on retrouve dans les travaux sur les trames vertes (Barthélémy *et al.*, 2012; Clergeau, Blanc, 2013) ou sur la perception de la nature en ville (Barthélémy, Consalès, 2014), sont à mettre en contrepois à des approches sectorielles auxquelles les collectivités sont encore trop attachées.

Les enjeux sur la complexité font intervenir les composantes sectorielles et techniques de la ville, mais surtout l'ensemble des éléments qui « font ville », c'est-à-dire les pratiques et relations sociales, qui construisent une identité et permettent la durabilité.

En guise de conclusion : quelques réflexions sur les politiques publiques et les programmes de recherche

À l'heure des grands principes énoncés par les COP ou le sommet Habitat III, et même des politiques nationales comme le « plan Climat-Énergie-Territoire » du Grenelle de l'environnement – document-cadre pour les collectivités – la rénovation des politiques urbaines paraît une évidente nécessité.

Cependant, les organigrammes des collectivités restent sectoriels ; leur évolution est lente car liée à des aspects réglementaires qui ne permettent pas d'innover vers le transversal ou le systémique. L'AGAM¹³, depuis la création de la métropole Aix-Marseille Provence, tente de faire converger certaines politiques publiques mais les inerties institutionnelles sont encore là, alors que les grands enjeux de l'environnement et du changement climatique ne nous laissent plus vraiment le temps :

Chamboulement institutionnel, émergence de nouvelles politiques, cadre sociétal en évolution constante, obligent l'AGAM à sans cesse s'interroger sur l'adaptation de ses méthodes de travail, sur l'investissement dans de nouveaux sujets ou thématiques qui contribuent à modifier l'appréhension habituelle des enjeux du développement et du rayonnement du territoire¹⁴.

Les collaborations sont nombreuses entre l'AGAM et des laboratoires de l'OSU Institut Pythéas, sur de nombreux aspects concernant la nature en ville,

13 Agence d'urbanisme de l'agglomération marseillaise.

14 Laure-Agnès Caradec, présidente de l'AGAM, *Références*, juillet 2017.

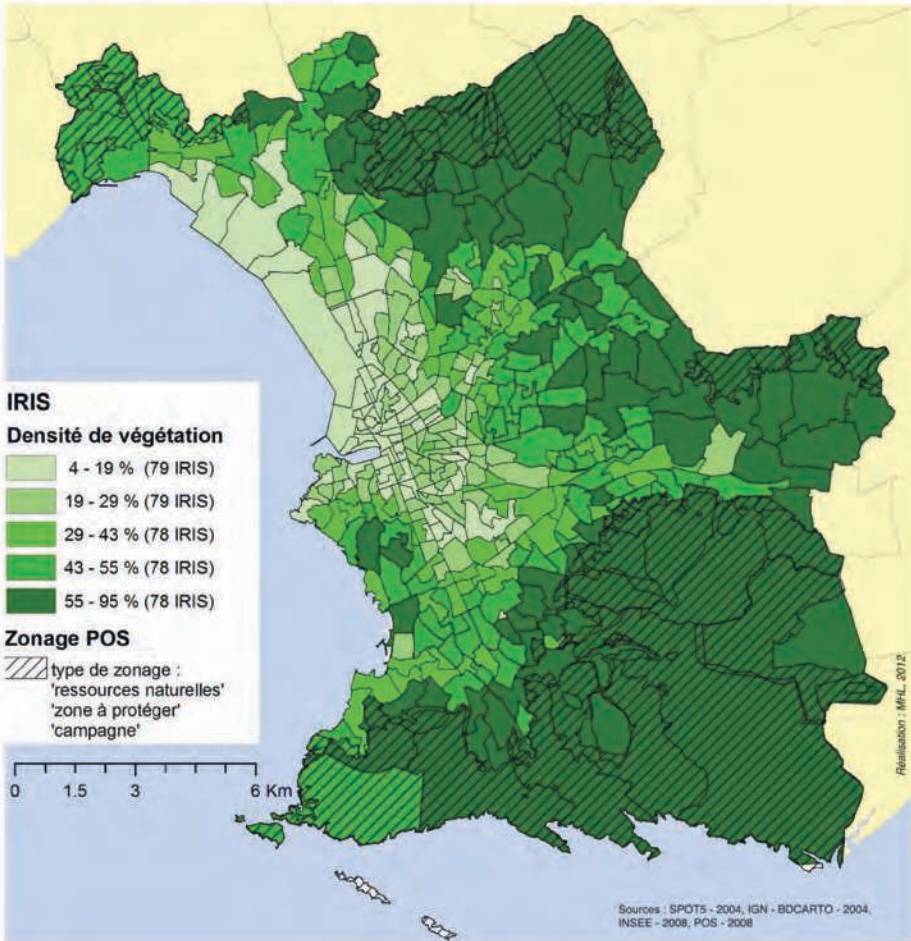


Figure 9a. Carte de la densité de végétation. Les inégalités environnementales se repèrent facilement avec de simples statistiques derrière lesquelles se cachent beaucoup d'autres variables (foncier, densité, qualité, etc.). Les deux cartes montrent une forte coïncidence. (Source: Barthélémy *et al.*, *L'atlas analytique de la trame verte de Marseille*, 2012. L'IRIS est un découpage de l'INSEE.)

le Parc urbain des papillons (figure 8a *supra*), l'observatoire des saisons, la requalification des espaces verts, ville passante, etc.; l'ambition serait de travailler sur des aspects plus transversaux des politiques urbaines, en insistant sur les enjeux dont nous avons parlé dans ce chapitre, en particulier le métabolisme urbain en lien avec le développement économique.

L'approche sectorielle et normative reste cependant prédominante aujourd'hui, ce qui pose un problème important de la mise en œuvre de l'interface que nous voulons construire entre scientifiques et gestionnaires: celui des échelles d'action qui sont de plus en plus décalées entre le politique, le législatif, le mouvement citoyen et les processus écologiques en œuvre.

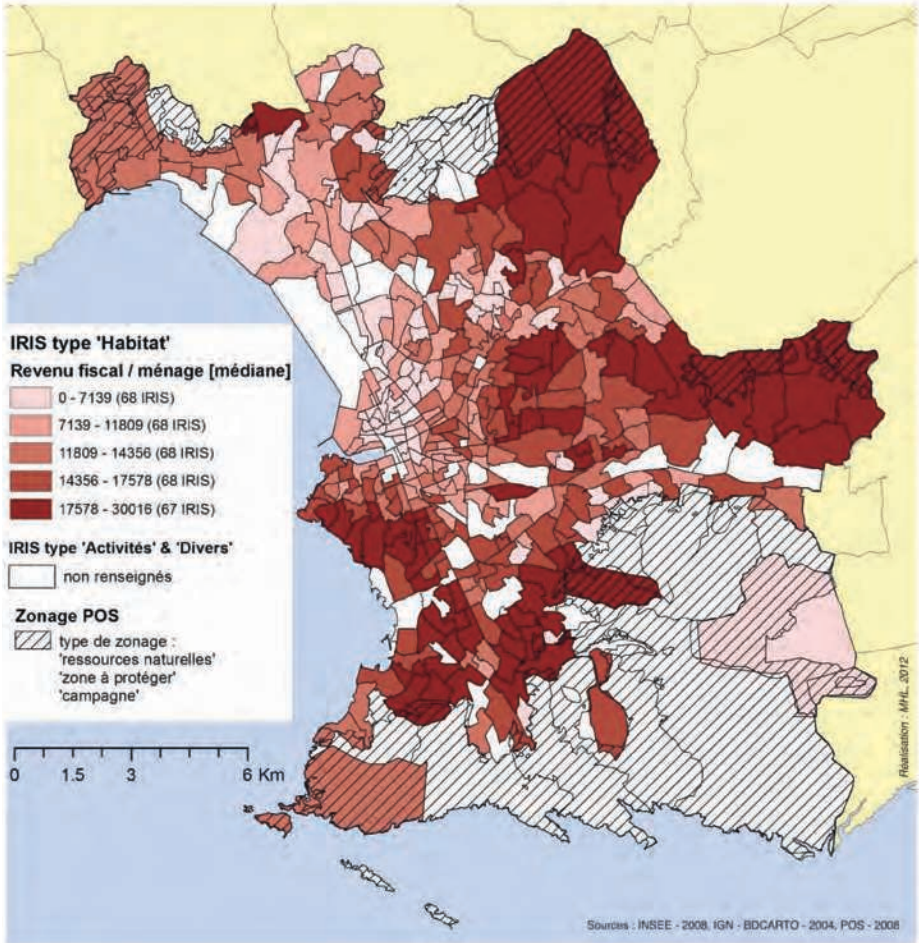


Figure 9b. Carte du revenu des ménages. (Source : Barthélémy *et al.*, *L'atlas analytique de la trame verte de Marseille*, 2012. L'IRIS est un découpage de l'INSEE.)

Les échelles de mesure, d'action, de perception ne sont pas identiques pour le citoyen, le gestionnaire ou le scientifique. Le temps long de la recherche (linéaire) ou de la gestion (cyclique) s'oppose au temps quotidien de l'usage (fragmenté), ce qui rend difficile l'appréhension de l'intégration des pratiques de la société dans les grands problèmes environnementaux. Ce que l'on appelle la consultation ou la participation ne sont pas suffisants face à de tels enjeux.

Il est nécessaire de renouveler les études urbaines vers l'étude de ces interactions, comme le soulignent d'ailleurs les recommandations du seul rapport des Nations unies existant sur l'urbain (chapitre 8, United Nations, 2011); le chapitre met en avant la nécessité de construire une capacité de la société à comprendre et à réagir à ses propres enjeux.

Il nous rappelle aussi qu'un des défis importants pour la communauté scientifique réside dans la responsabilité des choix des programmes de recherches, comme le sont les choix effectués par les collectivités territoriales en matière de politiques urbaines ou d'aménagement du territoire. La manière d'analyser et de rendre compte a des impacts importants du point de vue social, environnemental et économique.

L'innovation dans l'étude des relations environnement-ville réside dans la connaissance et la maîtrise des enjeux de ces relations, plus que dans la maîtrise des approches sectorielles.

Les approches interdisciplinaires nécessitent une association forte entre les sciences de la mesure ou du diagnostic et les sciences sociales pour comprendre les pratiques urbaines et les conditions d'acceptation du renouvellement urbain par les populations (figures 9a et 9b *supra*). Le projet LIFE « Nature in cities: governance for climate change adaptation of coastal metropolises in Provence-Alpes-Côte d'Azur » actuellement en développement par un consortium de laboratoires de recherche et d'institutions publiques est un bon exemple de l'évolution des vieilles logiques de « transfert de connaissances » vers des logiques « d'intégration des connaissances ». Le réseau MC3 (« Mediterranean Cities and Climate Change ») tente aussi ce genre d'approche, en liant scientifiques, professionnels et politiques autour de l'échange d'expériences, heureuses et malheureuses, et la construction d'un savoir collectif facilement appropriable au travers des nouveaux outils de communication que sont les sites web et les réseaux sociaux.

Nous pouvons dire peu de choses aujourd'hui sur ce que peut être un urbanisme soutenable, surtout en Méditerranée; les champs de recherche sont donc largement ouverts. Mais il manque également un certain nombre de valeurs de référence et de mesures de tendance qui permettraient de situer la gestion d'une ville dans un certain contexte. La construction d'indicateurs est un domaine de recherche qu'il ne faut pas négliger et qui rentre dans cette construction de l'interrelation entre recherche et politique. Cette construction d'indicateurs ne peut se faire que par une compilation d'expériences, en particulier dans l'espace méditerranéen, de manière à rechercher à la fois les facteurs de diversité et de spécificité. Les observatoires ont dans ce dispositif de recherche une place tout à fait fondamentale.

La ville comme construction sociale est « durable » puisqu'elle perdure et se développe, prenant chaque jour des formes nouvelles. En revanche, la ville « soutenable » est beaucoup plus difficile à concevoir, car elle implique un choix politique et des notions de seuil et de capacité de résilience face à ces choix politiques. Cette notion suppose une réflexion sur les critères qui influencent les enjeux: impacts des politiques, contribution au changement climatique, gestion territoriale, services écosystémiques, qualité environnementale ou de qualité de vie, etc., qui sont autant de champs importants mobilisant de manière interdisciplinaire la sociologie, l'urbanisme et l'écologie.

En résumé

- Marseille dispose d'un bilan GES, mais ne dispose pas à ce jour de bilan en termes de métabolisme – ressources consommées, transformations et rejets –, qui est pourtant fondamental pour l'élaboration d'une politique de recyclage ou d'autonomie énergétique.
- La consommation des énergies fossiles, dans les grandes villes de PACA, est trois fois plus importante que la moyenne française. En 2017, les communes de Fos-sur-Mer, Marseille, Martigues et Berre-l'Étang, ont consommé 50 % des 5,2 Mtep/an de l'ensemble du département des Bouches-du-Rhône (lui-même ayant consommé 50 % de la consommation régionale), montrant l'importance de la part de l'industriel. La métropole Aix-Marseille-Provence consomme en moyenne environ neuf fois plus que celle de Nice-Côte d'Azur.
- La consommation énergétique reste globalement stable en région PACA depuis dix ans, autour de 42 TWh (10,2 Mtep/an en 2007 et 10,6 en 2017). Mais elle se trouve en dernier des méthodes de production non traditionnelle et des énergies renouvelables (4 % de la production régionale), malgré un potentiel solaire des plus importants.
- Du côté des rejets, les émissions de GES suivent le même schéma que la consommation.
- En 2017, 75 % des émissions des Bouches-du-Rhône en 2017 étaient le fait de Marseille, Martigues, Fos-sur-Mer, Berre-l'Étang, Tarascon et Aix-en-Provence.
- Les émissions de Marseille (2 Mt/an de CO₂) le sont principalement dans le secteur des transports, la commune étant faiblement industrialisée.
- Les émissions en GES de la métropole Aix-Marseille Provence ont diminué entre 2007 et 2017, passant de 29,7 Mt/an à 25,8 Mt/an, ce qui représente 13 % de réduction, 1,4 % annuel, taux relativement faible au vu des exigences nationales et internationales.
- Le bilan en termes de production de déchets et de consommation en eau (et donc de rejet d'eau usée) est aussi peu performant. La production de déchets en Marseille-Provence par habitant est 15 % au-dessus de la moyenne nationale, avec un coût énergétique de collecte et de stockage très élevé et un niveau de recyclage très faible.
- La question du rejet des eaux usées en mer est aussi une problématique importante dans une ville touristique, qui compte de nombreux jours de fermeture des plages pour cause d'insuffisante qualité des eaux.
- L'expansion urbaine aux dépens des espaces à caractère naturel ou des espaces agricoles caractérise l'évolution du paysage marseillais.

- La configuration de Marseille est marquée avant tout par son organisation centre *vs* périphérie qui se renforce actuellement avec les nouveaux projets immobiliers. Un centre qui concentre les services et les activités commerciales et touristiques; une périphérie délaissée. Aujourd'hui à Marseille, l'impact environnemental de ces modèles de centralité est préoccupant du point de vue du gaspillage énergétique, des convulsions du trafic automobile, de la fragmentation et la dégradation des conditions des habitats, autant d'éléments qui renforcent les impacts du changement climatique.
- À Marseille, la fragmentation résidentielle de l'espace est élevée et en augmentation, avec plus de 1531 ensembles résidentiels fermés en 2013 occupant 13 % de sa surface urbanisée. Un autre aspect de la fragmentation est le morcellement paysager, induit par les constructions, les voies de transport, l'imperméabilisation des sols, ou même la fragmentation sociale, qui impliquent une baisse de la biodiversité, et un accroissement des inégalités sociales et écologiques.
- Dans un contexte de changement climatique particulièrement prégnant pour la ville, des problématiques particulières naissent de la complexité des situations, des structures et des relations entre le social et l'urbain. La nature en ville (jardin, parcs, biodiversité, etc.), les coulées vertes (les Aygalades, l'Huveaune, le Jarret), la végétalisation des quartiers et des habitats (écoquartier « Les Fabriques », le « Smartseille », l'ilot Allar), les espaces protégés (parc des Calanques, parc marin de la Côte bleue, réserve du Riou, etc.), mais aussi les espaces pollués (37 sites recensés sur Marseille) sont autant de domaines de réflexion pour les aménageurs et les scientifiques; on en attend une modification substantielle de la vision de la politique et de l'aménagement urbain.

Chapitre 4

Risques et protection

Patrick Arnaud, Thomas Curt, Laurent Peyras et Rémy Tourment

INRAE

Olivier Bellier

CEREGE

Quels sont les risques dans la région Aix-Marseille?

La région d'Aix-Marseille est fortement exposée aux risques naturels et technologiques du fait d'interactions fortes entre les facteurs humains et naturels. Les risques auxquels la population peut être soumise sont les revers de son attractivité humaine et paysagère, ainsi que de la forte concentration et du développement d'activités multiples et d'infrastructures (DREAL PACA).

La région d'Aix-Marseille est caractérisée par une forte concentration et une grande diversité des risques du fait du croisement :

- 1) de forts enjeux comme la densité croissante de sa population et l'afflux massif de touristes, le développement urbain et de réseaux et d'infrastructures ;
- 2) de conditions naturelles favorables aux aléas : un climat méditerranéen caractérisé par des extrêmes qui peuvent générer alternativement des crues ou des feux de forêt ; une forte sismicité ; des reliefs abrupts qui contribuent au ruissellement et à l'érosion des sols ; la proximité d'un grand fleuve (le Rhône) ; un grand linéaire de littoral (DREAL PACA).

En conséquence, la plupart des 1,8 million d'habitants de la métropole Aix-Marseille Provence sont soumis à un ou plusieurs risques. Environ trois quarts des communes ont déjà fait l'objet d'un arrêté de catastrophe naturelle (DREAL PACA). La plupart des risques naturels majeurs recensés en France sont présents dans l'aire Aix-Marseille et tous les risques technologiques sont présents, à savoir :

- des risques naturels: inondations, incendies de forêt, mouvements de terrain, risque sismique;
- des risques technologiques industriels: équipements sous pression, canalisations, réseaux, installations classées, risque nucléaire, risques liés aux transports de matières dangereuses et risques miniers;
- des risques liés aux ouvrages hydrauliques: rupture de barrages, rupture ou «simple» défaillance de digues;
- des risques pour la santé et l'environnement: risques sanitaires, substances chimiques, déchets, qualité de l'air, qualité de l'eau.

La plupart de ces risques sont accidentels et souvent (heureusement) rares, mais certains peuvent être chroniques comme ceux liés à la pollution de l'air. Les prédictions sur les changements climatiques et sur les dynamiques urbaines font l'hypothèse que la plupart de ces risques vont s'accroître dans les prochaines décennies. Dans ce contexte, l'objectif des politiques publiques

Encadré 1 - Qu'est-ce que le risque?

Le risque est défini comme le produit d'un aléa qui peut survenir (par exemple, une crue ou un séisme) et de la vulnérabilité des enjeux qui peuvent y être soumis (par exemple, des personnes, des maisons, une route, etc.). La vulnérabilité des enjeux s'évalue en fonction des dommages qu'ils peuvent subir lors de l'événement.

Les risques naturels et technologiques majeurs font partie de notre quotidien même s'ils ne sont pas toujours perçus par le public, puisque ce sont des événements rares caractérisés par une forte gravité mais une faible probabilité. On cherche à évaluer si un risque est «acceptable» pour une population donnée, c'est-à-dire s'il sera toléré par la population concernée en toute connaissance de cause. Un graphique classique montre que le risque peut être acceptable pour un aléa fort mais une vulnérabilité faible, ou pour un aléa faible et une vulnérabilité forte. Afin de réduire les risques, les démarches peuvent donc viser à réduire, à mieux prévoir, qualifier, quantifier l'aléa (où? quand? avec quelle intensité?), mais aussi à réduire la vulnérabilité des enjeux (comment rendre ma maison moins vulnérable?). La meilleure stratégie consiste à travailler sur les enjeux. Il est d'abord crucial d'éviter d'installer des personnes, des habitations ou des infrastructures dans des zones fortement exposées aux aléas. Par définition, le risque est l'affaire de tous: l'État qui réglemente pour les réduire et qui informe, les départements qui organisent les secours, les communes qui peuvent prendre des arrêtés locaux, et les particuliers qui peuvent réduire leur propre vulnérabilité par une gestion active de leur propriété.



Figure 1. La Nartuby à Trans-en-Provence le 16 juin 2010. (Crédits : Philippe Cantet.)

régionales est de maintenir un cadre de vie, des activités et une qualité de vie attractifs et durables en orientant les politiques d'activités et de développement d'infrastructures ainsi que les politiques urbaines et environnementales de manière à limiter l'exposition des enjeux humains, économiques et technologiques aux risques, aux nuisances et aux pollutions.

Les risques hydrométéorologiques

L'état des lieux

L'eau est une ressource indispensable au développement d'un territoire (pour l'agriculture, la consommation, l'industrie ou les loisirs), mais peut aussi être la source de menaces à travers les risques d'inondation ou de sécheresse. La gestion de l'eau est donc un enjeu fort pour un territoire, nécessitant de préserver cette ressource et de s'en préserver.

La région Provence-Alpes-Côte d'Azur est particulièrement concernée par cette gestion de l'eau pour deux raisons essentielles. La première est liée à sa proximité de la mer Méditerranée qui génère un climat à l'origine des phénomènes climatiques extrêmes du territoire métropolitain français. On parle alors d'un aléa climatique fort. Ces phénomènes concernent d'une part les précipitations violentes des mois d'automne et de printemps favorisant les inondations et les glissements de terrain; et d'autre part les périodes de sécheresse estivale marquée, parfois accentuée par des vents forts, occasionnant une pénurie dans la ressource en eau en plus des risques d'incendie. La seconde raison est la forte urbanisation de la région, particulièrement la zone côtière, qui augmente l'exposition des populations aux risques hydrométéorologiques, mais qui peut aussi créer des tensions sur la demande en eau. On parle alors de la vulnérabilité du territoire.

C'est donc le croisement d'un aléa fort et d'une vulnérabilité forte, tous deux présents sur le territoire, qui conduit à ce risque particulièrement élevé en région Provence-Alpes-Côte d'Azur et précisément sur une métropole telle que Aix-Marseille Provence, où se concentrent ces enjeux liés à la densité de population élevée et à une forte activité industrielle et touristique.

Parmi les risques hydrométéorologiques liés aux conditions climatiques particulières de la région méditerranéenne, les principaux sont les crues et les inondations qui en résultent. Situées au premier rang des catastrophes naturelles dans le monde, les inondations causent en moyenne 20 000 victimes par an. Sur le territoire français parcouru par 160 000 km de cours d'eau, c'est une surface de 22 000 km² qui est reconnue particulièrement inondable, répartie sur 7 600 communes et touchant deux millions de riverains (MTES, 2020¹). Les crues occasionnent ainsi près de 80 % des dommages associés aux aléas naturels et la région PACA n'est pas épargnée (figure 1 *supra*).

Certaines crues concernent de grands fleuves de la région (Rhône, Var). Même lorsque le phénomène est lent et relativement prévisible, il n'en demeure pas moins dévastateur (les crues du Rhône en 2003 ont causé plus d'un milliard d'euros de dégâts; rupture des digues de Camargue en 1994 et 2003).

1 Ministère de la Transition écologique et solidaire (2020) Prévention des inondations, <http://www.ecologie.gouv.fr/prevention-des-inondations>.

Les crues « éclairs » touchent les petits bassins versants particulièrement soumis à des pluies intenses (bassins côtiers fortement urbanisés – Huveaune à Marseille, les Vallas secs à Marseille, etc.). L'anticipation de ces phénomènes est presque impossible à cause du faible temps de réaction des bassins, de la difficulté d'instrumenter tous les petits cours d'eau et du manque de précision géographique à petite échelle des prévisions de pluviométrie.

Les inondations par ruissellement urbain peuvent aussi provoquer de nombreux dégâts avec la saturation du réseau d'assainissement et la coupure de routes (Marseille 2002-2003, Aix-en-Provence 1993, etc.).

Ces crues, fréquentes dans la région, provoquent des dégâts importants et posent des problèmes pour la sécurité des personnes. Elles génèrent des vitesses d'eau importantes dans une région au relief marqué et sont difficiles à prévoir du fait de leur rapidité et de leur forte variabilité spatiale.

L'autre risque lié aux conditions climatiques typiques de la région méditerranéenne concerne la ressource en eau. Si la ressource en eau est globalement abondante en région Provence-Alpes-Côte d'Azur, elle reste inégale dans le temps et dans l'espace. La région marseillaise est la plus faiblement arrosée par les précipitations en PACA et les températures élevées en période estivale induisent une forte perte par évaporation. La région marseillaise puise sa ressource en eau en grande partie de l'eau de la Durance (60 % de la ressource en eau de la région) et du Verdon grâce à la mise en place d'un réseau de distribution et d'alimentation en eau potable performant (Canal de Marseille, Société du Canal de Provence).

C'est une particularité de la région PACA qui, malgré un étiage marqué de ses cours d'eau côtiers (parfois secs en été), bénéficie d'une ressource en eau assurée par les apports des cours d'eau à régime nival et par la présence d'aménagements hydrauliques importants (barrages et canaux de la Durance et du Verdon). Cette ressource peut cependant être compromise par une succession d'années sèches ou des hivers présentant de faibles précipitations sous forme neigeuse rendant le remplissage des retenues parfois problématique.

La gestion du risque

Il existe de nombreux outils mis à disposition des collectivités locales pour répondre à la question de la gestion des risques d'inondations : les Atlas de zones inondables (AZI), les Plans de prévention des risques inondation (PPRI) et plus récemment les Plans d'action et de prévention des inondations (PAPI) ou pour la gestion de la ressource (loi sur l'eau de 1992). Dans le cadre de la Directive inondation (2007), l'agglomération de Marseille (tout comme les communes d'Aix-en-Provence ou Salon-de-Provence) a d'ailleurs été recensée comme un des 122 Territoires à risque important d'inondation (TRI) français sur lequel une cartographie des zones inondables a été réalisée.

En parallèle de la prévention, les outils de prévision visent à alerter les populations sur l'apparition d'une situation à risque afin d'en limiter l'impact.

Basés sur l'utilisation de nouvelles observations des précipitations (les radars météorologiques) et sur la mise en œuvre de modélisations hydrologiques, des outils permettent de prévoir les phénomènes et de proposer une information pour l'alerte et la gestion en période de crues. Ces outils sont alors mis en place pour aider les collectivités locales et les gestionnaires en période de crise. Le territoire d'Aix-Marseille Provence bénéficie bien sûr de tels outils, comme les cartes de vigilance sur l'Huveaune (Vigicrue), l'accès au service d'Avertissement aux pluies intenses à l'échelle des communes (APIC) ou les informations fournies par la plate-forme RHYTMME (Risques hydrométéorologiques en territoires de montagnes et méditerranéens) qui est un bel exemple d'outil d'aide à la gestion des risques hydrométéorologiques (figure 2).

La ville de Marseille et la métropole Aix-Marseille Provence font aussi partie des collectivités ayant mis en place un dispositif de surveillance et de mise en alerte. La SERAM (Société d'exploitation du réseau d'assainissement de Marseille) participe aussi à la gestion du réseau d'assainissement en période d'inondation.

Les acteurs mobilisés pour gérer la crise sont nombreux dans la métropole : le service de prévision des crues Med-Est basé à Aix-en-Provence, la DREAL, la région, les services des Eaux de Marseille ou la société du Canal de Provence pour l'alimentation en eau, les Services de secours (SDIS), etc. Autant d'acteurs mobilisés pour gérer au mieux les risques hydrométéorologiques et proposer des solutions pour une gestion durable du territoire face aux problèmes liés à l'eau.

Prospective

Si le changement climatique est avéré, l'évolution des valeurs extrêmes est plus difficile à observer et à prévoir. Selon le rapport de la Direction générale de l'énergie et du climat sur le climat de la France au XXI^e siècle, les projections montrent une tendance peu significative à l'augmentation des précipitations extrêmes en France méditerranéenne et une tendance à l'augmentation des périodes de sécheresse estivale. Cependant, les tendances au réchauffement sont très significatives et devraient contribuer à l'augmentation de l'évaporation et à une modification du processus de fonte nivale pouvant être décalée dans le temps.

Ces évolutions peuvent influencer la durée de la saison sèche, la gestion des retenues d'eau de la Durance et du Verdon, et avoir un impact sur l'alimentation en eau de la région de Marseille (ou des Bouches-du-Rhône) qui est en grande partie due à l'apport de la fonte nivale.

Indépendamment ou pas du changement climatique, l'évolution de l'occupation du sol peut provoquer une évolution forte des risques hydrométéorologiques. Deux facteurs sont à l'origine de cette évolution des risques :

- la modification du cycle de l'eau : augmentation des phénomènes de ruissellement avec augmentation des débits et des vitesses, réduction de la recharge des nappes avec la réduction de l'infiltration, impact de la couverture

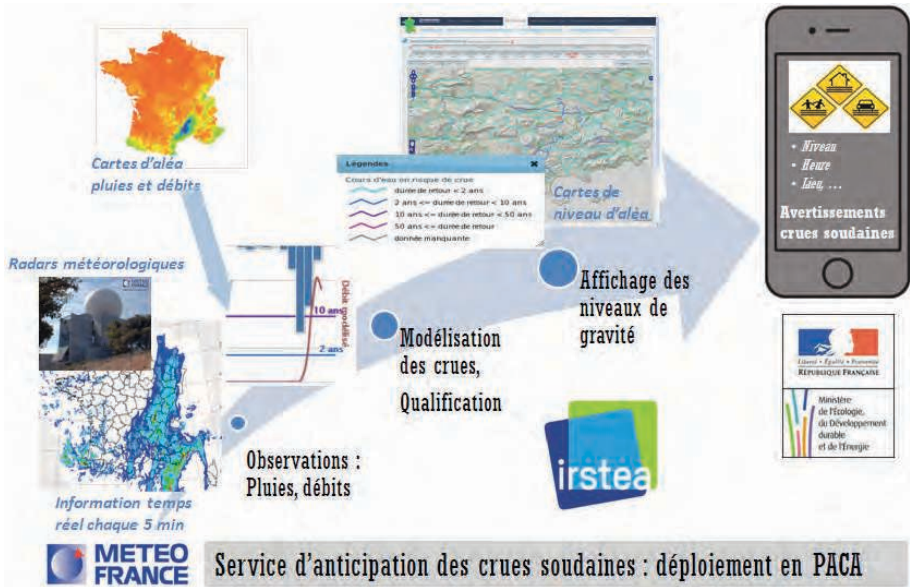


Figure 2. Principe d'un service d'anticipation des crues soudaines déployé en région PACA - projet RHYTMME. (Source : projet RHYTMME.)

végétale sur l'évapotranspiration, l'interception, etc. Dans la région d'Aix-Marseille Provence, ces phénomènes peuvent être dus aux grands incendies, à l'imperméabilisation croissante des sols à la suite de l'expansion des zones urbaines et à la déforestation au profit d'activités anthropiques (culture, viticulture, fermes solaires, zones industrielles, etc.);

- l'augmentation de la vulnérabilité des territoires avec une densification des zones urbanisées et la surprotection de biens pouvant faire oublier le risque. La constante expansion d'Aix-Marseille Provence ne fait qu'augmenter cette vulnérabilité.

Notons que l'évolution de l'occupation du sol et l'augmentation de la vulnérabilité peuvent avoir un impact sur les risques plus préjudiciable à court terme que celui du changement climatique. On peut alors se poser la question de l'acceptation du risque et à quel niveau.

Ces modifications des régimes hydrologiques auront sûrement aussi un impact sur les écosystèmes aquatiques et la gestion de la ressource en eau.

Pour l'avenir, les enjeux sont donc la sécurité des personnes (prévention mais aussi prévision et alerte), la sécurité des ressources (qualité et quantité, évolution de l'agriculture, etc.), la prise en compte de l'évolution climatique et de l'occupation du sol dans le dimensionnement des infrastructures et l'aménagement du territoire. Cette sécurité sera en grande partie réalisée par une meilleure

connaissance des phénomènes mis en jeu et qui sont par nature difficilement contrôlables et par une réduction de notre vulnérabilité. Sur un territoire autant soumis aux aléas hydroclimatiques que la région d'Aix-Marseille et présentant autant d'enjeux économiques et sociaux, une attention particulière est nécessaire pour proposer des règles d'usages de l'eau et d'aménagement du territoire qui garantissent des solutions durables face à la gestion de l'eau et des risques associés. C'est un des défis auxquels doivent répondre les chercheurs, les gestionnaires, les décideurs et les usagers de ce territoire.

Les risques d'incendies de forêt

État des lieux

L'aire Aix-Marseille fait partie des « points chauds » d'activité des incendies de forêt et de milieux naturels (prairies, garrigues, landes, etc.) en France et en Europe (figure 3). Trois quarts des communes de la région Provence-Alpes-Côte d'Azur ont connu au moins un incendie depuis 1973. En moyenne, on compte 4 000 départs de feux par an et 24 000 ha de forêts et de milieux naturels brûlés par an. Les incendies menacent les populations, les habitations, les infrastructures et les réseaux, générant ainsi un coût humain et économique important. Cette région est favorable aux incendies car elle regroupe plusieurs facteurs prédisposant à leur démarrage puis à leur propagation : un climat caractérisé par une longue saison de sécheresse et un vent fort, une végétation abondante et souvent inflammable et une forte pression anthropique (densité humaine, densité de l'habitat, des réseaux routiers, des infrastructures) qui génère un nombre important de départs de feux. Elle comprend aussi une forte concentration des enjeux humains et technologiques. Le fort risque incendie dans l'aire Aix-Marseille résulte donc du croisement d'un fort aléa et d'une forte vulnérabilité des enjeux humains, économiques et écologiques.

Les causes de ces incendies sont connues grâce à la base de données Prométhée qui recense tous les incendies de forêt et de milieux naturels dans les quinze départements du sud-est de la France depuis 1973². La plupart des départs de feux sont causés par l'homme, la part des incendies d'origine naturelle (foudre) étant de 5 %. La part des ignitions volontaires est importante et la pression humaine est particulièrement forte en été. Les départs des feux sont souvent accidentels (c'est-à-dire causés par les infrastructures comme les décharges publiques ou les voies ferrées, ou par l'homme à proximité de ces infrastructures), mais ils peuvent aussi être dus à des personnes privées : brûlage de végétaux, barbecues, etc. Ces causes sont particulièrement fréquentes dans la région car la concentration humaine (tourisme estival) et l'habitat permanent sont particulièrement denses, notamment à proximité des forêts et des espaces naturels dans les zones dites d'interfaces habitat-forêt

² <http://www.promethee.com>.

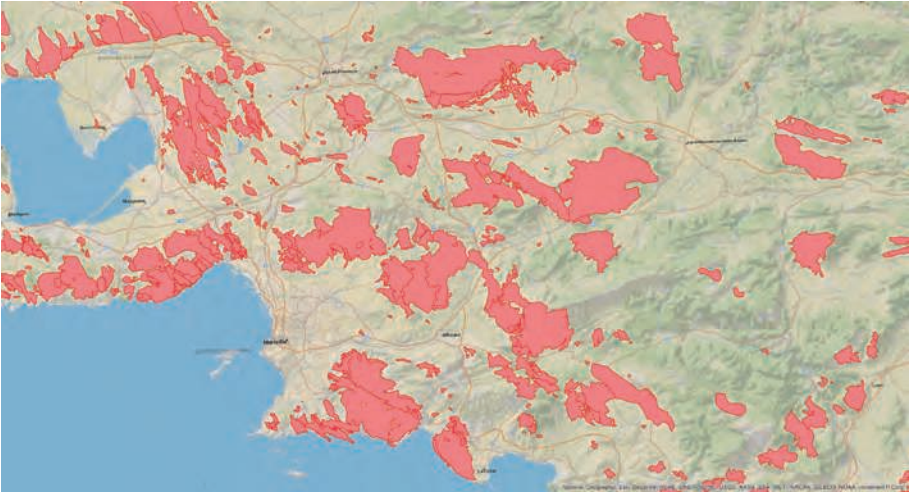


Figure 3. Carte des grands incendies dans l'aire Aix-Marseille depuis 1960. (Source : ONF / INRAE.)

ou rural-forêt. La connaissance des causes et de leur localisation permet de focaliser la prévention des incendies et la surveillance par les pompiers. Les interdictions de circulation en forêt (en été et pendant les périodes à risque) et du brûlage de végétaux (même en saison moins sèche) semblent donc justifiées pour l'aire Aix-Marseille au vu des causes spécifiques locales.

Les zones brûlées sont situées dans des végétations très inflammables et combustibles (garrigues, pelouses, forêts de pins ou de chênes) dans lesquelles l'homme met le feu volontairement (pour éliminer les résidus d'exploitation ou pour diminuer la biomasse) ou accidentellement. La répétition des incendies favorise le développement de végétations inflammables comme les garrigues et les pelouses. Inversement, certains types d'occupation du sol ou de végétation sont très peu inflammables et combustibles (oliveraies, vignes, zones cultivées et fortement pâturées, etc.) et donc rarement incendiées. Ils peuvent même être très efficaces pour limiter les départs de feu ou pour créer des coupures de combustible qui ralentissent ou stoppent la propagation du feu.

Il existe une saisonnalité des incendies : la plupart surviennent en été car les conditions météorologiques sont très favorables et les activités humaines et touristiques sont au maximum. Cela est vrai pour l'ensemble de l'aire Aix-Marseille. Cependant, des pics d'activité peuvent aussi exister de l'automne au printemps, liés aux activités agricoles, pastorales ou forestières dans les secteurs les plus ruraux, mais aussi dans les zones de contact entre l'urbanisation et les milieux naturels (les interfaces habitat-forêt), qui se développent rapidement.

L'organisation spatiale du paysage dans l'aire Aix-Marseille influe sur la localisation du risque incendie. En effet, les départs de feux surviennent préférentiellement à proximité des habitations, des infrastructures (usines, routes, lignes

électriques, voies ferrées, etc.) et des zones d'activité agricole ou pastorale. La localisation des grandes zones de végétation combustible influe ensuite sur la propagation de celui-ci et sur l'extension des zones brûlées. La combinaison de ces deux facteurs crée à la fois les zones de fort aléa et de fort risque, là où les incendies sont fréquents et intenses, et où existent de forts enjeux.

La plupart des feux sont très petits (95 % des incendies parcourent moins de 7 ha dans les Bouches-du-Rhône). Cette taille réduite est notamment liée à l'efficacité de la politique de prévention et des forces de lutte. Cependant, les quelques grands incendies qui surviennent constituent la plus grande part du risque : 1,3 % des incendies ont une surface supérieure à 100 ha, et ils brûlent au total 83 % des surfaces brûlées du département. L'impact humain, économique, écologique et médiatique de ces grands incendies est très important.

La mise en place d'une politique renforcée associant la prévention et la lutte depuis 1993 a clairement permis de réduire le nombre et surtout la taille des feux par rapport à la période précédente. Cet effet de la politique a peut-être été renforcé par de meilleures conditions météorologiques (étés moins secs et moins ventés) au cours de la même période. Pourtant, l'efficacité même de cette politique peut faire craindre l'augmentation des grands incendies à plus long terme du fait de la réduction des surfaces brûlées qui a permis l'augmentation de la biomasse combustible. Par ailleurs, l'augmentation avérée des températures et l'extension probable de la période à fort risque météo pourraient conduire au développement de ces grands feux problématiques.

La gestion du risque

Les acteurs de la prévention et de la gestion du risque incendie sont nombreux dans l'aire Aix-Marseille : sécurité civile et préfecture, DREAL, sapeurs-pompiers, services du conseil général et des métropoles. L'aléa est bien connu et son estimation est facilement accessible aux décideurs publics, aux gestionnaires et aux particuliers (voir liens ci-dessous, source DREAL PACA). Un suivi des procédures « risques » est réalisé au sein de la base de données nationale GASPAREL (Gestion assistée des procédures administratives relatives aux risques), essentiellement consacrée aux risques naturels, dont les résultats sont présentés sur le site Internet « Portail de la prévention des risques majeurs³ ». Les PPR technologiques sont gérés au niveau de l'application d'une base de données nationale GIDIC (Gestion informatisée des installations classées). Le portail CARTORISQUE a vocation à regrouper l'ensemble des cartes des risques naturels et technologiques majeurs⁴.

3 <http://www.prim.net>.

4 <http://cartorisque.prim.net>.



Figure 4. Après l'incendie de Rognac (août 2016). (Crédits : Fabien Guerra.)

La prospective : risque incendie et développement durable dans l'aire Aix-Marseille

Une politique durable pour les risques doit s'appuyer sur la prise en compte de l'évolution de l'aléa et des enjeux menacés à moyen terme. En effet, la probabilité de développement d'un incendie évolue assez rapidement avec le climat et ses changements, l'occupation du sol, l'organisation du paysage et la politique de prévention et de lutte.

Plusieurs questions importantes se posent en matière de risque incendie et de développement durable dans l'aire Aix-Marseille.

Les changements climatiques en cours augmentent la probabilité des incendies et leur intensité, ils allongent la période à risque et, sur le long terme (quelques décennies), ils favorisent l'accroissement de la biomasse combustible et les dépérissements forestiers qui produisent du combustible mort.

Les décideurs publics et les acteurs de la lutte devront aussi faire face à une augmentation des incendies particulièrement dévastateurs liés à des événements climatiques exceptionnels comme celui de 2003 et de 2016, tels que les grands incendies des Maures (Var) ou l'incendie de Rognac-Vitrolles pendant l'été 2016, qui a menacé la périphérie nord de Marseille, détruit vingt maisons et un lycée ainsi que paralysé la circulation routière et aérienne (figure 4).

Depuis plusieurs décennies, l'augmentation des constructions à proximité des forêts et des milieux naturels combustibles développe des zones « d'interfaces habitat-forêt » qui génèrent des départs de feux, mettent en danger

Encadré 2 - La recherche-action sur les incendies en région Aix-Marseille pour une politique durable

Les recherches régionales visent à adapter les territoires au risque incendie :

- en matière de prévention du risque incendie, à mieux évaluer l'aléa météo par un suivi de l'état hydrique du combustible, à détecter les impacts des changements climatiques sur le risque incendie et sur les écosystèmes, à caractériser la végétation combustible (notamment par l'utilisation de capteurs LIDAR), à modéliser l'aléa d'éclosion, et à mieux cartographier les enjeux (notamment des zones d'interface habitat-forêt [figure 5]);
- en matière de risque, à améliorer la connaissance sur les événements passés pour mieux prédire le risque, à évaluer la vulnérabilité des écosystèmes et des enjeux naturels et anthropiques, des bâtis et des réseaux en croisant les cartes d'aléa avec les cartes d'enjeux et à modéliser le risque futur;
- en matière de lutte, à améliorer les techniques de lutte et à évaluer l'efficacité-coût de la lutte.

Ces données ont notamment été utilisées pour appuyer des décisions publiques (CESER PACA: mission changement climatique) et pour l'établissement de plans de prévention des risques incendie de forêt (PPRif des Bouches-du-Rhône, plans départementaux de DFCI et plans de massifs : exemple du plan de massif des Calanques¹).

1 <http://www.calanques-parcnational.fr/fr/des-actions/protger-et-preserver/plan-massif>.

les biens et les personnes, et compliquent l'action des pompiers lors d'incendies. Le développement des maisons, des réseaux et infrastructures dans l'aire Aix-Marseille augmente fortement le risque puisqu'il accroît la présence de personnes et de biens à proximité des zones dangereuses.

Bien qu'il existe encore des incertitudes liées aux modèles climatiques et aux scénarios socio-économiques, l'augmentation conjointe de l'aléa météorologique et des enjeux exposés (maisons, routes, infrastructures critiques) conduit à une augmentation du risque.

Face à ces évolutions, la prévention et la gestion durable du territoire sont les éléments essentiels pour réduire le risque incendie et ses impacts sur le long terme dans l'aire Aix-Marseille. Les documents permettant de connaître le risque existent et sont régulièrement améliorés. Les principales pistes (cf. CESER PACA 2016, PNACC2) sont une gestion forestière durable visant à diminuer la biomasse, favoriser des essences adaptées, maîtriser l'urbanisation

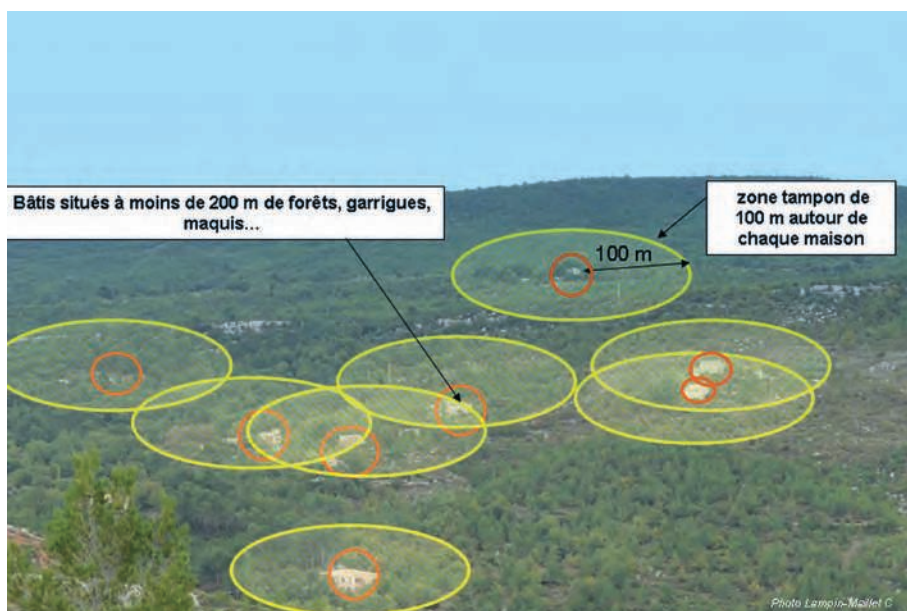


Figure 5. Cartographie des zones d'interfaces habitat-forêt. (Source : Lampin *et al.*, 2010.)

et responsabiliser les acteurs privés (débroussaillage et autoprotection, alerte précoce), favoriser le sylvopastoralisme, le brûlage dirigé et l'agriculture pour entretenir des coupures de combustible au sein des paysages.

Si le risque incendie est globalement fort dans l'aire Aix-Marseille, il faut garder en tête que le feu y est depuis des millénaires un outil utilisé par l'homme pour gérer la végétation ainsi qu'une perturbation courante pour la plupart des écosystèmes. Cette perturbation est même nécessaire au maintien de la biodiversité et de certaines espèces dans quelques écosystèmes « contrôlés par le feu ». Une conséquence majeure de ce constat est qu'il est donc peu vraisemblable (et pas forcément souhaitable) d'« extirper » complètement l'incendie de nos paysages. L'objectif d'une gestion raisonnée à long terme du risque incendie serait plutôt d'éviter les incendies dévastateurs qui ont un fort impact sur les personnes et les espaces vulnérables au feu et de tolérer un certain nombre d'usages du feu qui sont compatibles avec les activités humaines et le fonctionnement des écosystèmes.

Les risques liés aux ouvrages hydrauliques et aux digues

Contexte et état des lieux

On décompte près de 9 000 km de digues en France métropolitaine protégeant plusieurs millions de personnes contre les aléas des crues soudaines et des submersions marines. Précédemment, les digues étaient gérées par environ 1 000 gestionnaires

Encadré 3 - Liens utiles sur les risques en région PACA

- Toutes les informations publiques sur les risques naturels et technologiques de Provence-Alpes-Côte d'Azur seront accessibles à partir de : <http://www.paca.ecologie.gouv.fr>.
- Portail de la prévention des risques majeurs : <http://www.paca.developpement-durable.gouv.fr/le-contexte-regional-au-niveau-des-risques-r399.html>.
- Préfecture des Bouches-du-Rhône : <http://www.bouches-du-rhone.pref.gouv.fr/risques>.
- Météo-France : <http://www.meteo.fr>.
- Ministère de l'Écologie et du Développement durable : <http://www.ecologie.gouv.fr>.
- Ministère de l'Écologie et du Développement durable (prévention) : <http://www.prim.net>.
- Légifrance (service public de l'accès au droit) : <http://www.legifrance.gouv.fr>.
- Direction départementale de l'équipement des Bouches-du-Rhône (DDE 13) : <http://www.bouches-du-rhone.equipement.gouv.fr>.
- Direction départementale de l'agriculture et de la forêt des Bouches-du-Rhône (DAF 13) – 154 avenue de Hambourg – 13285 Marseille Cedex 08 – tél. : 04 91 76 73 00.
- Direction régionale de l'industrie de la recherche et de l'environnement (DRIRE PACA) : <http://www.paca.drivre.gouv.fr>.
- Direction régionale de l'environnement Provence-Alpes-Côte d'Azur (DIREN PACA) : <http://www.paca.ecologie.gouv.fr>.
- Service départemental d'incendie et de secours des Bouches-du-Rhône (SDIS 13) : <http://www.sdis13.fr>.
- GeographR : http://geographr.typepad.fr/pole_metier_climat_air/2017/02/ceser_paca_adaptation_changement_climatique.html.
- INRAE : <http://www.inrae.fr>.
- CESER PACA – mission changement climatique : [http://www.ceserpaca.fr/nouvelles/sites-internet/faq/detail-actualite.html?no_cache=1&tx_ttnews\[tt_news\]=1617&tx_ttnews\[backPid\]=1](http://www.ceserpaca.fr/nouvelles/sites-internet/faq/detail-actualite.html?no_cache=1&tx_ttnews[tt_news]=1617&tx_ttnews[backPid]=1).
- Programme national d'adaptation au changement climatique (PNACC1 et 2) : <http://www.developpement-durable.gouv.fr/adaptation-france-au-changement-climatique>.



Figure 6. Dignes du Petit Rhône après confortement en Arles. (Crédits : Patrice Mériaux.)



Figure 7. Dignes à la mer à Saintes-Maries-de-la-Mer. (Crédits : Rémy Tourment.)

de nature très variée et avec des moyens financiers et humains très hétérogènes. La région Provence-Alpes-Côte d'Azur compte environ 2000 km de digues de protection contre les inondations et 200 gestionnaires.

Ces vingt dernières années ont été marquées par des événements dramatiques ayant conduit à une prise de conscience générale du danger lié à la présence de digues. Une rupture de digue provoque en effet une vague de submersion bien plus dangereuse que l'inondation à laquelle elle était censée soustraire les populations.

Afin de se protéger contre les débordements du Rhône, l'homme a construit depuis des siècles des digues fluviales. Il s'agit d'ouvrages de protection contre les inondations dont au moins une partie est construite en élévation au-dessus du niveau du terrain naturel et destiné à contenir épisodiquement un flux d'eau afin de protéger des zones naturellement inondables.

Dans la zone aval du Rhône, les premiers endiguements datent de l'époque romaine. Le système continu de protection que l'on connaît aujourd'hui a été élevé dans les années 1845-1860, après les grandes crues du milieu du XIX^e siècle. La construction de ces ouvrages se place dans un vaste programme porté par l'État sous l'empereur Napoléon III. Il distingue la « protection des plaines », qui sera assurée par des ouvrages en terre constitués de limons prélevés sur place, de la « protection des villes » par les quais maçonnés.

Dans leur état actuel, les digues fluviales entre Beaucaire / Tarascon et l'embouchure représentent 210 km répartis entre le Rhône, le Petit Rhône et le Grand Rhône (figure 6 *supra*). À ces ouvrages en terre s'ajoutent 5,5 km d'ouvrages maçonnés en traversée des villes. Il s'agit des quais d'Arles, des quais de Tarascon et de la Banquette de Beaucaire.

Concernant la protection contre la mer, une digue à la mer s'étend sur 25 km le long du littoral camarguais (figure 7 *supra*). Elle est élevée dans les années 1860 pour protéger les terres de Camargue des entrées marines. Elle est associée à plusieurs ouvrages connexes : épis, brise-lames et tenons, construits à partir des années 1930 au droit du village des Saintes-Maries-de-la-Mer et complétés dans les années 2000. La maîtrise de l'érosion est en effet toujours nécessaire en complément de la protection contre les inondations, mais cela est encore plus important en domaine maritime.

Le département des Bouches-du-Rhône compte également un grand barrage relevant de la réglementation PPI : le barrage de Bimont sur la Cause au nord du massif de la Sainte-Victoire (figure 8). Il s'agit d'un barrage-voûte de 87 m de hauteur et retenant 39 millions de m³ à sa côte maximale. Mis en service en 1952 pour des besoins d'alimentation en eau de plusieurs communes de la région aixoise, l'irrigation de 8000 ha, l'alimentation de la zone industrielle de la vallée de l'Arc et de la centrale thermique de Gardanne, il est construit sur la commune de Saint-Marc-Jaumegarde et domine les quartiers bas d'Aix-en-Provence puis tout le bassin de l'Arc depuis Aix-en-Provence jusqu'à l'étang de Berre.



Figure 8. Barrage de Bimont. (Crédits : Mathieu Sutter.)



Figure 9. Inondations généralisées au sud de Tarascon en décembre 2003. (Crédits : Ville d'Arles.)

Les risques liés aux ouvrages hydrauliques

Si les ouvrages hydrauliques remplissent des fonctions très utiles pour notre société telles que la protection contre les inondations pour les digues fluviales ou maritimes, ou le stockage d'eau pour l'alimentation en eau potable et l'irrigation pour les barrages, ils induisent néanmoins un risque dans les zones protégées par les digues et dans les zones situées en aval des barrages. Ce risque peut être qualifié de risque couplé technologique et naturel, aléa naturel (risque hydrométéorologique ou hydrologique, risque sismique, etc.) étant souvent (pas uniquement) l'événement initiateur du risque technologique.

Ainsi, la métropole marseillaise a connu plusieurs événements d'inondation provoqués par la rupture de digues fluviales (figure 9 *supra*). Les principaux événements les plus récents sont les crues de l'hiver 1993-1994 et les inondations de décembre 2003.

Les mécanismes qui affectent les ouvrages hydrauliques sont complexes et de différentes natures selon les ouvrages et leur environnement. Pour les ouvrages en terre tels que les digues fluviales, les principaux mécanismes sont les suivants :

- *l'érosion par surverse* qui se produit lorsque la crue naturelle est supérieure au niveau de sûreté de la digue. En général, une digue fluviale présente un niveau de sûreté correspondant environ à la crue ayant une période de retour de 100 ans ;
- *l'érosion interne* qui traduit un mécanisme d'arrachement et de transport des matériaux au sein de la digue ; elle peut être due à la présence de terriers d'animaux fouisseurs, au développement de végétation arbustive ou encore à des percolations non contrôlées dans le remblai ;
- *la liquéfaction* qui traduit un effondrement granulaire du matériau, dû une sollicitation dynamique telle qu'un séisme ou à une surcharge du matériau ;
- *l'affouillement* du remblai, qui peut être provoqué par le courant le long du parement des digues et aggravé par la végétation ;
- *le glissement* qui traduit des pentes de talus trop raides au regard de la stabilité des matériaux.

La gestion du risque des ouvrages hydrauliques dans Marseille et sa région

Les ouvrages hydrauliques nécessitent en permanence des actions de la part de leur gestionnaire : diagnostic, auscultation, entretien, maintenance, réparation et confortement. Ces actions doivent être conduites avec une vision plus large que l'aménagement, en prenant en compte toutes les composantes de la gestion du bassin versant et des enjeux.

Les acteurs œuvrant dans la gestion du risque lié aux ouvrages hydrauliques

Les instances en charge ou concernées par la gestion globale du fleuve Rhône ou de la mer sont les suivants :

- la DREAL de Bassin est responsable du pilotage du plan Rhône : initié dès 2005 après la survenue de crues majeures en novembre 2002 puis en décembre 2003 sur le Rhône aval et construit autour de la stratégie globale de prévention des inondations définie en 2004, le Plan Rhône constitue un vaste projet pour l'aménagement et la gestion du fleuve sous-tendu par une triple ambition : concilier la prévention des inondations et les pressions d'un développement urbain et des activités en zone inondable, respecter et améliorer le cadre de vie des habitants et enfin, assurer un développement économique de long terme ;
- élaborées et mises en œuvre par l'État en partenariat avec les régions Provence-Alpes-Côte d'Azur, Languedoc-Roussillon, Rhône-Alpes, Bourgogne, Franche-Comté et avec la Compagnie nationale du Rhône, les orientations stratégiques de ce projet de développement sur le fleuve s'articulent autour de six grandes thématiques : culture et patrimoine, inondation, qualité des eaux, ressources et biodiversité, énergie, transport fluvial, tourisme. Le volet « Inondations » est piloté par la Mission Rhône (DREAL de bassin Rhône-Méditerranée, Service prévention des risques) ;
- les DREAL PACA et Midi-Pyrénées et les DDTM, chargées de la mise en place et du contrôle des politiques publiques en matière de gestion des risques d'inondation, ainsi que des procédures administratives.

Sur les digues du bas Rhône, c'est un établissement public, le SYMADREM, qui a pour mission l'entretien, la gestion et la surveillance des digues, quais et ouvrages maritimes, et qui réalise des études et des travaux sur son territoire de compétence, en vue d'améliorer la protection des biens et des personnes par rapport aux risques d'inondation du Rhône et de submersion marine.

Les actions de recherche pour la gestion des risques des ouvrages hydrauliques

L'INRAE développe des connaissances nouvelles et des méthodologies pour l'analyse de risques, le diagnostic et la gestion des ouvrages hydrauliques. Ses domaines d'intervention scientifiques et thématiques sont l'hydraulique, l'hydrologie, le génie civil et la géomécanique, appliqués aux ouvrages hydrauliques. Des outils et méthodes d'analyse et d'aide à la gestion intégrée des risques sont proposés au travers de l'analyse des enjeux et de leurs vulnérabilités en s'intéressant particulièrement aux liens entre la décision et l'information :

- la géomorphologie, hydrologie et hydrodynamique pour l'étude des aléas hydrométéorologiques et hydrologiques ;
- la géomécanique appliquée aux aléas naturels et ouvrages ;

- le génie civil appliqué aux ouvrages hydrauliques et de protection ;
- l'aide à la décision fondée sur une représentation et un traitement d'informations hétérogènes et incertaines.

À ces travaux de recherche s'ajoute un important volet d'appui technique et d'expertise au bénéfice des services de l'État, des collectivités territoriales et des bureaux d'études.

Prospective

Les gestionnaires de digues doivent faire face à des contraintes techniques et réglementaires de plus en plus complexes, et se sentent souvent désarmés devant ces exigences nouvelles. Leur besoin de se former et d'échanger leurs expériences pour y répondre a mené à la mise en place récente d'un réseau de gestionnaires de digues en France, l'association France Digue. Les enjeux des années à venir sont identifiés de la façon suivante :

- disposer et mettre à disposition des gestionnaires des méthodes pour ausculter et diagnostiquer les digues sur de grands linéaires : un seul point faible d'une digue peut conduire à la défaillance d'un système sur un aménagement de plusieurs kilomètres. Des technologies nouvelles (fibres optiques, auscultation thermographique, etc.) associées à des modèles mathématiques et physiques sont des solutions du futur. L'usage de drones est envisagé comme vecteur pouvant faciliter le recueil de différents types d'informations (visuelles, topographie LIDAR, thermométrie infrarouge, etc.);
- développer des matériaux écologiques présentant de réelles aptitudes à la résistance aux mécanismes de rupture, telle que la surverse ;
- développer des méthodes d'évaluation des risques, de diagnostic et d'analyse de risque et de gestion des risques ;
- développer des démarches d'évaluation de la vulnérabilité des zones protégées par les digues : vulnérabilités sociales, économiques et environnementales, disposer d'une échelle de criticité commune et reconnue par les différents acteurs permettant de comparer les conséquences en termes de risque de différents scénarios ;
- développer des bases de données rassemblant les informations sur les digues : SIRS Digues, WIKI Bardigue⁵, etc.

Les enjeux de la montée des eaux et de la protection des zones côtières du littoral sont importants, notamment en Camargue. Cette question est d'ores et déjà au cœur des thèmes de recherche des organismes de recherche tels que l'INRAE, avec des projets comme Digue 2020 visant à créer une plateforme de recherche sur les digues maritimes pour améliorer la maîtrise du risque de submersion.

⁵ <http://www.france-digues.fr/sirs-digues>.



Figure 10. Dommages relatifs au séisme de Provence (ou de «Lambesc»), le 11 juin 1909. (Crédits : Collection Guy Perrier.)

Les risques sismiques

Le séisme de Provence, événement de la mémoire collective du risque sismique en France métropolitaine et en région PACA

Le 11 juin 1909, le séisme de Provence (ou de «Lambesc», magnitude 6) tua 46 personnes. Le 6 avril 2009, un siècle après, le séisme de L'Aquila (magnitude 6,3) en Italie produisit 295 morts, rappelant que de tels séismes (de magnitude 6 à 6,5), bien que modérés, n'en restent pas moins meurtriers.

Le séisme de Provence est le dernier en Provence et le plus catastrophique qu'ait connu la France durant les derniers siècles. Il a détruit ou endommagé plusieurs villages dont Rognes, Saint-Cannat, Lambesc, Vernègues et Pelissanne ainsi que plusieurs quartiers de Salon-de-Provence. Ce séisme reste très présent dans la mémoire des Provençaux plus de cent ans après son occurrence : ruines, bâtiments endommagés, archives familiales ou collections de cartes postales en témoignent encore (figure 10).

Les séismes sont une des catastrophes naturelles les plus destructrices au monde et constituent un des risques majeurs en France et plus particulièrement en région Provence-Alpes-Côte d'Azur, et des progrès majeurs restent nécessaires pour mieux appréhender l'aléa et le risque sismique.

PACA: une région à sismicité modérée, mais une des plus importantes du territoire français en termes d'aléa sismique

Même si à l'échelle mondiale, la région Provence-Alpes-Côte d'Azur est caractérisée par un aléa sismique modéré, elle n'en demeure pas moins, à l'échelle nationale, l'une des régions les plus concernées par le risque sismique (figure 11). Comme en témoigne son histoire, sa sismicité historique y est une des plus importantes du territoire métropolitain, avec depuis le xv^e siècle plusieurs séismes d'intensité égale ou supérieure à VIII (Lambesc en 1909, région de Manosque en 1509 et 1708, région de Nice en 1494, 1618, 1644, 1854, etc.), impliquant l'existence de failles actives ayant un potentiel sismogénique élevé (jusqu'à des magnitudes de 6,5). La densité de population y est localement très importante (métropoles aixoise, niçoise et marseillaise). Si l'intensité des séismes historiques est relativement élevée en PACA (intensité maximale de VII à IX et périodicité séculaire), elle ne subit qu'une faible microsismicité. L'origine et les caractéristiques de cette sismicité étaient, jusqu'à peu, mal connues: pourquoi et comment des séismes d'intensités importantes se produisent-ils dans cette zone alors que la déformation aux limites est très faible? Quelles sont les sources principales des futurs séismes? Et comment appréhender le risque sismique dans des régions à aléa modéré?

Aléa sismique en région à sismicité modérée

Les dernières recherches ont contribué à répondre partiellement à certaines de ces questions par une meilleure compréhension du comportement sismogénique des failles en domaine à sismicité modérée, notamment par le croisement des approches géologiques et géophysiques et plus spécialement en Provence, où les failles sont emblématiques et éminemment sismogènes (c'est-à-dire propices au déclenchement des séismes).

L'ensemble des disciplines liées au risque sismique doit maintenant mettre en commun les compétences couvrant l'aléa sismique – tectonique, sismologie, géodésie, etc. –, la vulnérabilité et le génie parasismique – ingénieurs, architectes, juristes, économistes, historiens et archéologue, etc. Une avancée significative a été réalisée aussi bien dans le développement des méthodes d'analyse que dans la connaissance des objets étudiés et des comportements en cas de crise.

Une meilleure compréhension existe maintenant des caractéristiques de la déformation active, du comportement sismogénique et de la prise en compte du risque dans les régions à sismicité modérée, problématique particulièrement prégnante en région PACA et d'actualité au niveau mondial (Fukushima), tant sur la maîtrise du risque «normal» (mise à jour de la réglementation parasismique, pression immobilière, etc.) que du risque «spécial», essentiellement lié aux activités industrielles (pétrochimie, grands ouvrages hydrauliques, nucléaire, ITER, etc.).

Quels acquis? Qu'a-t-on appris depuis un siècle? Aléa et prévision

Le cadre géodynamique global et régional des séismes de la région PACA, c'est-à-dire le moteur à l'échelle de la tectonique des plaques, de la formation des grandes structures et de l'évolution des failles régionales, est maintenant connu de manière assez fiable même s'il existe quelques controverses scientifiques dans le détail. Les grandes zones (failles) où peuvent se produire des séismes importants sont mieux identifiées. La géologie des séismes, la paléosismologie, s'est beaucoup développée et a permis d'améliorer la connaissance des séismes majeurs très anciens (d'il y a 10 000 ans, voire plus de 100 000 ans). La compilation des archives historiques (sismicité historique) et archéologiques (archéosismicité) a également permis une amélioration de cette connaissance dans un passé plus proche à échelle humaine. Enfin, le développement des réseaux de surveillance et des techniques géophysiques nous permet de mieux connaître les structures du sous-sol proche et profond et leur comportement, même si les moyens de les utiliser manquent parfois.

On sait aujourd'hui ce qu'est un séisme : c'est une rupture et un glissement soudain le long d'une faille affectant la croûte terrestre en réaction à des contraintes tectoniques accumulées au cours du temps. On ne connaît en revanche pas encore parfaitement les phénomènes qui contrôlent les caractéristiques des mouvements sismiques et leurs effets sur le sol (accélération, liquéfaction). L'instrumentation, permanente et temporaire, et la simulation numérique ou modélisation aident toutefois à améliorer la compréhension de ces phénomènes.

Le séisme correspond à un phénomène complexe caractérisé par une grande variabilité. Il en résulte qu'il est actuellement impossible de prévoir de manière fiable l'occurrence des séismes sur une échelle de temps courte (quelques heures à quelques jours). Cette lacune concernant la prévision scientifique à court terme a été très largement illustrée par la polémique qui a suivi le séisme de L'Aquila⁶. En effet, la prévision des mouvements est entachée d'une grande incertitude. Cette « méconnaissance » épistémique diminue et se réduira à terme, mais la variabilité intrinsèque et aléatoire du phénomène « séisme » est, elle, incompressible.

Les pistes d'amélioration sont l'identification des phénomènes physico-chimiques qui semblent précurseurs, c'est-à-dire qui précèdent certains séismes. La difficulté réside maintenant dans le fait que les mécanismes qui sont à l'origine des précurseurs ne sont pas encore compris. C'est d'autant plus vrai dans la région PACA où les « gros » séismes sont rares et leur origine controversée. D'autre part, la source d'un séisme (c'est-à-dire l'initiation de la rupture) est générée sur une surface de faille restreinte de quelques dizaines, voire centaines de mètres carrés et en profondeur, alors que la surface de faille

6 Le 6 avril 2009, magnitude : 6,3. Parmi les « gros » séismes ayant affecté l'Italie dont la détection de prétendus « précurseurs » par un géophysicien « éclairé » avait fait polémique après que ce séisme fut particulièrement meurtrier, le bilan définitif faisant état de 309 morts.

sur laquelle se propagent la rupture et le glissement lors du séisme est, elle, bien connue mais très étendue et peut faire 100, 1 000 voire 10 000 km².

Pour les failles les plus actives et les mieux connues en région PACA de bonnes informations « déterministes » existent sur les séismes du passé les plus gros et donc les plus pénalisants. Cela permet une prévision à long terme fiable (magnitudes maximales des séismes et récurrence, c'est-à-dire le temps de retour de ces séismes maximums du passé et du futur) mais avec une large incertitude. Cette incertitude sur l'aléa déterministe nous conduit à avoir une approche statistique de l'aléa que l'on appelle « probabiliste » et qui est de plus en plus développée.

Prévention et vulnérabilités

En l'absence de technique de prévision fiable, la prévention reste sans conteste le seul moyen de minimiser les risques de destruction matérielle et de perte en vies humaines en diminuant la vulnérabilité. Sans prévention adéquate, un séisme comme celui de Lambesc produirait aujourd'hui de nombreuses victimes, quelques centaines de morts, des milliers de blessés, et des destructions sans précédent en France, pouvant s'estimer en millions, voire milliards d'euros de dégâts (d'après une étude menée par le ministère de l'Environnement).

Là où la Terre a tremblé, elle tremblera de nouveau. Cette loi naturelle permet une première étape vers la prévention car elle permet d'établir des cartes de zones potentiellement sismiques. Et par conséquent, à défaut de prévoir quand elle tremblera de nouveau, il est possible de définir où. L'évaluation de l'aléa sismique reposera donc, entre autres, sur l'identification et la localisation des séismes du passé et des failles qui les ont générées.

La deuxième étape de la prévention sismique consiste à prendre un ensemble de mesures pour réduire l'impact d'un séisme sur les populations, les constructions et l'activité économique :

- 1) en informant de l'existence du risque et du comportement à avoir en cas de crise (séisme) ;
- 2) en construisant de manière adéquate des bâtiments résistants à l'agression des séismes possibles (construction parasismique / vulnérabilité physique).

Vulnérabilité physique

En ce qui concerne la vulnérabilité physique, le retour d'expériences de catastrophes passées permet aujourd'hui de mieux cerner la « pathologie sismique », d'identifier les bonnes dispositions constructives et les très mauvaises, et, *in fine*, d'édicter des règles parasismiques qui sont efficaces quand elles sont respectées. De plus, de grands équipements expérimentaux (table vibrante, mur de réaction, centrifugeuse) ont permis de progresser sur le comportement mécanique des bâtiments et des équipements. Ils sont efficacement utilisés pour qualifier et dimensionner tous les modèles utilisés en ingénierie parasismique.

Vulnérabilité socio-économique et gestion de l'événement

Aspect économique: les connaissances scientifiques sur les phénomènes provoquant des catastrophes permettent d'élaborer des mesures (ouvrages, politiques) de prévention. Ces mesures nécessitent des coûts d'investissement qu'il s'agit de mettre en balance avec les dommages évités (dommages incluant des éléments non marchands et donc difficilement «monétarisables») et les compensations à prévoir. Les connaissances scientifiques sur les sociétés humaines ont permis de développer des théories et des méthodes de gestion de ces risques monétaires, et d'évaluer en termes monétaires des risques qui ne le sont pas. Enfin, elles offrent différentes possibilités de gérer ces risques en y intégrant les mesures de prévention qui les réduisent, ou des mesures de précaution en cas d'incertitude scientifique sur les phénomènes et sur les sociétés.

Aspect sociologique: les études menées en psychologie sociale ont montré par voie expérimentale pourquoi il est essentiel de situer l'analyse de la pensée sociale à l'articulation de l'individuel et du collectif en matière de risque sismique. Dans cette analyse, les pratiques des individus et des facteurs psychosociaux tels que leur sociabilité et leur implication personnelle sont particulièrement utiles pour l'étude des représentations sociales et des conduites liées au risque sismique.

Ces études ont montré avant tout la nature normative des représentations sociales du risque sismique, qui estompe leur composante fonctionnelle. Ce résultat explique l'efficacité réduite de ces représentations dans la prescription des conduites collectives liées au risque sismique (par exemple, le faible engagement dans la prévention collective, dans les travaux de renforcement parasismique des immeubles, etc.). Nous avons également constaté que les effets de l'implication personnelle sur la structure de la représentation sociale étaient conditionnés par l'existence des pratiques relatives au risque. Ce résultat suggère une réponse pratique à la question de la prévention collective du risque sismique.

On sait qu'une représentation sociale plus structurée, plus organisée, permet d'augmenter notre capacité à guider les conduites avant, pendant et surtout après l'événement. Ainsi, une stratégie visant à encourager la prévention collective du risque sismique est peu efficace si elle vise seulement à augmenter l'implication personnelle des individus par rapport au risque (augmenter leur intérêt, leur appréhension, insister sur la gravité des conséquences du risque, etc.). On peut penser qu'elle sera plus efficace si elle vise à impliquer les individus après s'être assurée qu'ils possèdent un niveau suffisant de pratique, soit par l'expérience vécue du séisme, soit, plutôt, par des exercices de simulation et des formations pratiques. Les études montrent que c'est sous ces conditions conjuguées que la représentation sociale du risque sismique renforce sa visée pratique et sa capacité à guider les conduites collectives.

Prospectives

L'aléa: même si nous commençons à bien connaître les failles de la région Provence-Alpes-Côte d'Azur et leurs séismes caractéristiques, de nombreux progrès restent à faire en ce qui concerne le comportement sismogénique de ces failles lentes et à sismicité modérée. Pour cela, en complément de la sismologie et de la géodésie, une des approches fondamentales pour appréhender l'aléa sismique, c'est-à-dire l'occurrence des séismes et leurs caractéristiques (magnitude, récurrence), est la tectonique active, couplée à la paléosismologie. Sur la base de méthodes éprouvées en domaine de tectonique très active à vitesse de déformation rapide et à aléa élevé (caractérisé par de forts séismes fréquents), une nouvelle méthodologie pluridisciplinaire, intégrant l'analyse de la topographie cumulée sur le long terme (en utilisant notamment les MNT⁷, pour avoir un signal tectonique significatif tout en discriminant les effets de l'érosion), l'imagerie géophysique fine du sous-sol et la paléosismologie sont en cours de développement en France et en région PACA, avec des résultats probants pour certaines des failles locales.

La prévision et la prévention: certains précurseurs sont identifiés mais leurs relations avec le phénomène sismique ne sont pas encore connues, les lieux où les séismes sont susceptibles de se produire sont connus, la prévision statistique des séismes attendus à long terme est réalisée, en revanche la prévision des caractéristiques des vibrations est liée à des méthodes empiriques qui restent encore à améliorer. La fiabilité des modèles de propagation des ondes sismiques est liée à la nécessité d'une bonne connaissance de la structure du sous-sol, qui est généralement non disponible. Les spécialistes savent faire «l'autopsie» d'un séisme et comprendre ce qui s'est passé, mais on ne sait pas encore dire ce qui va se passer, même si on commence à avoir des idées assez précises de ce qui peut se passer.

En ce qui concerne la vulnérabilité et la prévention, de gros efforts sont à faire et de nombreuses questions restent ouvertes:

- Comment dimensionner les ouvrages géotechniques?
- Comment évaluer puis diminuer la vulnérabilité des bâtiments existants (les méthodes de diagnostic mais aussi de renforcement)?
- Comment appréhender avec certitude (et en tenant compte des incertitudes) la vulnérabilité des industries à risque spécial (nucléaire, Seveso)?
- Comment tenir compte du vieillissement des matériaux nouveaux utilisés en construction parasismique (patins isolateurs, corrosion des armatures, renforcement des sols, etc.)?
- Comment les pressions foncières conduisant à urbaniser des zones à sols médiocres tendent-elles à augmenter la vulnérabilité face au séisme?

7 Un modèle numérique de terrain (MNT) est une représentation de la surface de la terre (topographie) sous forme de coordonnées (x, y, z: latitude, longitude, altitude) adaptée à une utilisation par ordinateur.

Et enfin, en ce qui concerne la vulnérabilité socio-économique, nous pensons aujourd'hui avoir les « outils » et une connaissance suffisante de « l'événement sismique », pour faire des scénarios d'événement plausibles afin de réaliser des exercices. Toutefois, un constat important reste d'actualité, il est nécessaire après un événement de pouvoir évaluer très rapidement les dommages à l'échelle de la zone affectée ainsi qu'au niveau d'un ou de plusieurs bâtiments.

Parmi les questions fondamentales que l'on doit évoquer, il y a celle de l'apport de la recherche à la société civile : quels acquis, quelles demandes, quelles perspectives ? Les apports de la recherche en termes de réponses opérationnelles pour la gestion du risque sismique au quotidien devraient être un objectif final et fondamental de nos recherches. Pour y répondre, il faut associer les scientifiques, les acteurs de la prévention du risque et de la société civile (des élus, des industriels, des représentants de l'État, des experts, des constructeurs, des assureurs et des enseignants). De nombreux thèmes devraient être abordés en commun : la connaissance du phénomène sismique, la culture du risque, la construction parasismique, la vulnérabilité du bâti ancien, la préparation à une crise sismique, etc. Pour chaque point, les dimensions techniques, politiques, sociales et économiques doivent être discutées, car chacun de ces acteurs pourra apporter un éclairage différent en fonction de ses expériences et de ses compétences.

Parmi les thèmes cruciaux qui restent à appréhender, nous pouvons mentionner :

- l'information la sensibilisation des citoyens ;
- la réglementation : sa mise en œuvre et son application ;
- les grands barrages et risques sismiques. Problème d'autant plus important avec le changement climatique car on peut se demander si nos barrages sont dimensionnés pour nos futures « pluies » et inondations ;
- le risque industriel (Seveso, nucléaire) : nos industries face aux séismes ;
- la prévention : le génie parasismique, la gestion de crise ;
- la société civile et l'éducation face aux séismes ;
- les besoins de la société civile dans le domaine de la recherche.

En conclusion, on connaît les failles qui génèrent des séismes, on commence à comprendre ces derniers même si nous ne savons pas les prédire. De plus, on sait construire parasismique mais on ne s'en donne pas forcément les moyens, notamment en ce qui concerne l'application de la réglementation. Des pistes de « besoins de connaissance » et surtout de pluridisciplinarité peuvent être proposées dans les domaines suivants : l'information et la formation, la prise en compte des paramètres psychologiques, les « outils » socio-économiques ainsi que l'implication des assurances, tout en améliorant notre connaissance de l'aléa. Une bonne prévention réside et repose initialement sur une bonne appréhension des aléas régionaux (les failles et leurs séismes) et locaux

(conditions locales et effets de site). Des perspectives et des améliorations sont à envisager en ce qui concerne l'instrumentation (ouvrages / bâtiments), la doctrine d'amélioration de l'existant et la gestion de crise, etc.

Il convient aujourd'hui avec le recul de se demander : quel fut l'apport du Plan Séisme vis-à-vis de ces différents thèmes ? Ce dernier était un plan interministériel, mis en œuvre entre 2005 et 2010, par le ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de la Mer (MEEDDM) de l'époque, afin de réduire la vulnérabilité des personnes au risque sismique et d'accompagner la nouvelle réglementation mise en place. Quel fut son apport réel ? Doit-on le « réactiver » ? Ou bien en mettre en place un plan spécifique en région PACA. Le bilan de l'analyse concernant le risque sismique, de l'aléa à la vulnérabilité, dans les zones à sismicité modérée telle que la région PACA, reste donc « l'humilité... » (« conclusion » empruntée à P. Y. Bart, ISTERre, Grenoble, lors de la Journée sur le « risque sismique » organisée sous l'égide d'ECCOREV et OT-Med, le 10 octobre 2014).

Les protections contre les risques et les défis pour le futur

De multiples acteurs s'organisent pour organiser la protection de la métropole contre les risques naturels et technologiques : métropole Aix-Marseille Provence, CR PACA, DDTM13, CG13, DREAL PACA, Pôle Risques, DRGT PACA, RiskPACA, SIMADREM, CEREMA. Le Pôle Risques (maintenant pôle de compétitivité Cluster SAFE⁸) a notamment pour mission de favoriser des solutions de gestion et de prévention des risques en faisant le lien entre sphère publique et entreprises. L'anticipation scientifique est souvent possible mais l'anticipation économique est souvent difficile. Le chantier Nature Environnement de la métropole marseillaise est ouvert à ces approches. Il existe aussi des fonds européens pour la gestion des services environnementaux (type Feder ou H2020 pour 2014-2020).

Les aléas sont généralement bien qualifiés du fait de la production de bonnes connaissances sur le type et la localisation des aléas, qui fournissent des informations sur le géoréférencement, la cartographie, des analyses historiques, etc. disponibles sur des sites web publics et dans des rapports : Atlas des risques majeurs PACA, Dossier risques majeurs BDR, DREAL Risques naturels en PACA, site RiskPACA, etc. Il existe de nombreuses politiques publiques, réglementations, stratégies de prévention et de lutte.

Les risques évoluent dans le temps et dans l'espace en fonction des évolutions socio-économiques et environnementales, notamment celles liées aux changements climatiques et aux changements d'occupation du sol. Il est ainsi essentiel de comprendre comment peut évoluer la vulnérabilité des personnes sur le territoire Aix-Marseille.

⁸ <http://www.safecluster.com>.

Un premier enjeu est de passer de la connaissance de l'aléa à celle de la vulnérabilité des enjeux. Connaître l'aléa est important mais cela ne suffit pas, notamment pour le décideur public : il faut aussi être capable de déterminer quels enjeux seront vulnérables et quels seront les dommages probables. Pour cela, il faut passer de la seule connaissance du phénomène (de l'aléa) à celle de la vulnérabilité, de la capacité de résistance et de résilience (retour à l'état initial) des sociétés, des infrastructures et de l'environnement naturel. C'est un fort enjeu partout pour l'aire marseillaise du fait de la cohabitation et de la concentration de nombreux enjeux humains, technologiques et naturels.

Plusieurs pistes existent :

- déterminer des indicateurs de vulnérabilité pour chaque type d'enjeu ;
- associer des sciences environnementales avec des sciences humaines et économiques (exemple : projet DigSur) ;
- normaliser des méthodes transposables dans d'autres régions ;
- combiner les approches pour qualifier les différentes vulnérabilités sur un même territoire (économique, environnementale, sociologique).

Une autre piste est la modélisation des risques futurs. En effet, on voit que certains aléas évoluent sous l'effet des dynamiques naturelles et humaines, souvent renforcées par les «forçages» externes comme les changements climatiques : par exemple, le risque incendie a tendance à s'étendre en fin de saison du fait des changements climatiques. De même, les risques évoluent en réponse aux politiques de gestion. Pour prévoir les risques futurs, il faut être capable d'anticiper les évolutions, mais la recherche est encore peu développée du fait des incertitudes et du manque de données. Pour modéliser ces évolutions et prédire notamment des événements rares (séisme), il est nécessaire de disposer de bons modèles et de bases de données fiables sur le long terme.

Pour ce faire, il existe des pistes telles que :

- la rupture des digues de protection de deux trémies de la voie ferrée Tarascon / Arles (trémies dites «du mas Tessier» et «des Ségonnaux»). L'inondation de la plaine du Trébon et des quartiers nord d'Arles a concerné 9 400 personnes et causé 334 millions d'euros de dommages ;
- le projet «Dignes2020» déposé au contrat de plan État-Région 2014-2020 ;
- les digues maritimes, cas du trait de côte (*La gestion du trait de côte*, éditions Quae, 2010) ;
- la modélisation des incendies sous l'impact des changements globaux (projet européen Fume).

Une thématique de recherche émergente dans l'aire Aix-Marseille est l'approche «multirisques». En effet, de nombreuses communes et de nombreux secteurs sont potentiellement concernés par plusieurs aléas. Il est possible que deux aléas se produisent en même temps (concomitance) ou à la suite l'un de l'autre (cascade), ce qui peut générer un effet domino (exemple : un séisme génère une

rupture de digue, qui génère une vague de submersion). C'est une question de plus en plus présente chez les gestionnaires. Des recherches en cours existent en PACA (basse et moyenne Durance et cartographie multirisque sur le territoire Asse-Verdon-Vaïre-Var) soumise à la fois aux crues torrentielles, aux mouvements de terrain avalanches, aux séismes et aux feux de forêt. Certains de ces aléas sont mal connus et doivent être mieux caractérisés.

L'approche consiste à hiérarchiser les enjeux (bâtiments, accessibilité, environnement) là où plusieurs aléas existent, en fonction de leur rôle, de leur importance et de leur fonction au sein d'une commune, et de caractériser l'intensité des dommages en fonction de la probabilité d'occurrence des aléas. Les actions à mener sont d'informer, d'aménager et de se préparer en fonction des informations obtenues par cette démarche.

Les stratégies de prévention reposent souvent uniquement sur l'expertise technique (domaine de l'ingénierie), elle propose des choix techniques et de gestion en réponse au risque. L'analyse des risques nécessite une approche des différentes dimensions territoriales, sociales et politiques. Afin de permettre une meilleure acceptabilité des mesures de prévention par la population, il faudrait favoriser des recherches en sciences humaines et sociales (histoire, sociologie du risque) et en analyse de la décision politique :

- la notion d'acceptabilité du risque par la population est souvent peu creusée. Elle est aussi difficile à manier car l'acceptabilité est variable suivant l'acteur considéré et l'échelle considérée. Elle est généralement très faible mais elle peut fortement varier selon les personnes (assureur *vs* personne privée ou décideur public) et le type de risque (exemple : pollution chronique de l'air *vs* phénomène violent et rare de type séisme).
- l'impact de la ségrégation sociale sur l'exposition aux risques est également intéressant.
- l'analyse coût-bénéfice (approches économétriques) et le travail avec les assureurs sont eux aussi intéressants (rappel : les collectivités sont assurées si elles sont sous régime d'arrêté CatNat, sinon ce sont des assureurs privés).
- l'analyse socio-anthropologique et historique est essentielle pour comprendre quel a été le comportement des différents acteurs lors d'une crise passée et leur récupération (notion de résilience sociale), quelles leçons ont été apprises après des événements historiques catastrophiques et comment la mémoire en est conservée.

Sur le long terme, les questions de remédiation, atténuation et adaptation sont prépondérantes. En somme, il existe trois grandes stratégies pour diminuer les risques :

- 1) réduire l'aléa : gérer le risque existant, prévention, communication, information, implication des acteurs (maîtres d'ouvrage GEMAPI, personnes privées, décideurs publics);

- 2) réduire la vulnérabilité des enjeux : mesures réglementaires, gestion à long terme, etc. ;
- 3) atténuer les dommages sur les enjeux pour les rendre supportables par la société. Selon les cas, on peut agir sur l'un ou l'autre, voire sur plusieurs composantes. Face aux changements globaux, il est intéressant d'avoir une adaptation pour prévenir les évolutions possibles : il existe une stratégie nationale d'adaptation au changement climatique (cf. rapport Conseil économique et social, 2014).

Pour en savoir plus

- <http://www.symadrem.fr>.
- <http://www.france-digues.fr>.
- <http://www.rhone-alpes.developpement-durable.gouv.fr/le-site-internet-plan-rhone-est-en-a693.html>.
- <http://barrages-cfbr.eu/-CFBR-.html>.

En résumé

- La région d'Aix-Marseille est caractérisée par une forte concentration et une grande diversité des risques environnementaux.
- La région marseillaise puise sa ressource en eau en grande partie de l'eau de la Durance (60 % de la ressource en eau de la région) et du Verdon, ce qui la rend complètement dépendante des Alpes.
- L'agglomération de Marseille (tout comme les communes d'Aix-en-Provence ou Salon-de-Provence) est dans une zone à risque important d'inondation du fait des conditions climatiques et de la forte urbanisation du territoire. La ville de Marseille et la métropole Aix-Marseille Provence ont mis en place un dispositif de surveillance et de mise en alerte.
- En moyenne, on compte 4 000 départs de feux par an et 24 000 ha de forêts et de milieux naturels brûlés par an sur la métropole Aix-Marseille Provence, la plupart en été. 95 % des départs de feux sont générés par l'homme, 5 % par la foudre.
- La plupart des feux sur la métropole Aix-Marseille Provence sont très petits (95 % des incendies parcourent moins de 7 ha dans les Bouches-du-Rhône). Cette taille réduite et le nombre déclinant des feux sont notamment liés à l'efficacité de la politique de prévention

et des forces de lutte depuis 1993. Cependant, les quelques grands incendies qui surviennent constituent la plus grande part du risque: environ 1 % des incendies brûlent environ 80 % des surfaces touchées par les incendies. Leur fréquence et leur intensité devraient augmenter du fait des changements climatiques, de l'augmentation et de l'évolution des paysages végétaux.

- Les principales pistes pour réduire le risque incendie et ses impacts sur le long terme dans l'aire Aix-Marseille sont de nature à diminuer la biomasse, favoriser des essences adaptées et maîtriser l'urbanisation, ce qui implique de responsabiliser les acteurs privés et favoriser le sylvopastoralisme, le brûlage dirigé et l'agriculture pour entretenir des coupures de combustible au sein des paysages.
- Le séisme ayant eu lieu le plus proche de Marseille est le séisme de Provence à Lambesc le 11 juin 1909. La métropole Aix-Marseille est dans une zone à risque sismique faible (Marseille) à modéré (Aix-en-Provence).

Chapitre 5

La biodiversité et les changements globaux

Laurence Affre

IMBE

Magali Deschamps-Cottin, Valérie Montes et Christine Robles

LPED¹

La biodiversité sur l'agenda des décideurs

L'attention grandissante portée aux menaces planétaires depuis le milieu du siècle dernier souligne que l'homme a pris progressivement conscience de son influence à l'échelle globale. En effet, pour la première fois dans l'histoire de la planète, le changement contemporain qui affecte notamment les systèmes climatologiques et biologiques de la Terre a pour origine les activités humaines ; ce changement correspond à la période que certains ont qualifiée d'anthropocène (Crutzen, Stoermer, 2000). Si des débats persistent pour déterminer à partir de quand fixer cette période (Steffen *et al.*, 2011), on observe que très tôt des mesures visant à protéger les espaces et les ressources ont surgi dans l'organisation des sociétés, ce qui sous-tend l'enracinement des préoccupations environnementales dans les mouvements de conservation et de préservation de la nature (Bergandi, Blandin, 2012).

On peut ainsi reconnaître le divorce homme / nature selon différents marqueurs et identifier dans les archives lointaines la volonté de « corriger » cette relation. Mais ce n'est qu'à partir des années 1970 que la question de la protection des éléments de la nature est progressivement reconnue d'intérêt

1 Avec la participation, pour IMBE, de Virginie Baldy, Christine Ballini, Alex Baumel, Armin Bischoff, Nathalie Boutin, Céline Bertrand, Élise Buisson, Stéven Criquet, Thierry Dutoit, Anne-Marie Farnet, Stéphanie Fayolle, Catherine Fernandez, Sophie Gachet, Raphaël Gros, Nicolas Kaldonsky, Jean-Philippe Mévy, Elena Ormeno, Daniel Pavon, Philippe Ponel, Arne Saatkamp et Thierry Taton ; pour LPED, d'Isabelle Laffont-Schwob et Nicolas Montes ; ainsi que de Didier Aurelle (MIO) et de François Mesléard (Tour du Valat).

Encadré 1 - Diversité biologique : définition

La diversité biologique, ou biodiversité, née de la contraction de *biological diversity*, représente selon la Convention sur la diversité biologique (1992) «la variabilité des organismes vivants de toute origine y compris, entre autres, les écosystèmes terrestres, marins et autres écosystèmes aquatiques et les complexes écologiques dont ils font partie; cela comprend la diversité au sein des espèces (notamment diversité génétique) et entre les espèces, ainsi que celle des écosystèmes».

général, comme en France où celle-ci est élevée au rang de « bien public » dans la loi de 1976. Comme le soulignent Meinard et Mestrallet (2014), il s'agit là d'un statut provisoire et contingent du moment : « un bien public est une notion abstraite utilisée pour modérer les débats de façon à promouvoir une certaine pratique collective globale, moralement chargée ».

Ainsi, la question de la protection de la nature évolue vers de nouvelles attributions en considération d'une transmission aux générations futures (Gautier, Valluy, 1998), c'est-à-dire une orientation morale qui va s'affirmer ensuite, marquée par le rapport Brundtland (1987) et sa nouvelle définition du développement durable visant à prendre en compte dans la gestion des ressources non seulement les besoins des générations présentes, mais aussi ceux des générations ultérieures. Son origine remonte aux premières inquiétudes sur la finitude des ressources (Vivien, 2003) qu'illustre l'appel retentissant du Club de Rome (Meadows *et al.*, 1972) dans un contexte où les problématiques environnementales ont pris de l'importance sur la scène internationale et dans les agendas politiques comme en témoigne la conférence internationale des Nations unies sur le thème de l'environnement à Stockholm en 1972.

On peut citer l'apparition des premiers ministères de l'Environnement, dont la France est le troisième pays à se pourvoir en 1971. Ce tout nouveau ministère de la Protection de la nature et de l'environnement cherche la voie pour réduire l'effet délétère de l'homme à l'égard de ce qui l'entoure, et en particulier d'une nature « iconoclaste » dont il n'existe pas de définition unifiée (Lochet, Quénet, 2009). Les critiques portant sur l'idée d'une nature « socialement construite » (Aubertin *et al.*, 1998) ont certainement favorisé l'apparition de nouveaux concepts. Au début des années 1980, le terme de *diversité biologique* (encadré 1) s'impose dans l'arène scientifique (Lovejoy, 1980) pour être finalement remplacé par son équivalent *biodiversité* (Meinard, 2011), retenu pour communiquer sur le rythme alarmant, sans précédent, avec lequel s'éteignent les espèces (Wilson, 1992).

Mais là aussi, la notion de biodiversité, loin d'offrir une définition stabilisée, recouvre des interprétations diverses (Aubertin, 2005) qui ont évolué dans

le temps au sein même des champs académiques censés les préciser (Meinard, 2014). Ce foisonnement de définitions n'est pas sans jeter le trouble chez les décideurs quand il s'agit de mobiliser un savoir, d'évaluer un risque, de prendre une décision, et d'engager des actions (Levrel, 2006; Chevassus-au-Louis *et al.*, 2009). La difficulté est d'identifier cette biodiversité en tant que « bien commun », « construit indissociable du contexte dans lequel il est invoqué » (Lascoumes, Le Bourhis, 1998), pour en réduire le risque d'érosion. Or la problématique de la biodiversité est encore un enjeu de divergences, de doutes, ou d'ignorance scientifique, appartenant à la classe des « univers controversés » (Godard, 1997), comme ce fut le cas pour le changement climatique avant qu'une convergence n'émerge peu à peu.

En résumé, pour le décideur public ou privé, la biodiversité représente d'abord un problème à résoudre (Theys, 1993; Blandin, 2009). L'attention est alors portée sur les liens entre la biodiversité et les activités humaines, plus précisément « l'évaluation économique de cette biodiversité et des services qui lui sont attachés » (Chevassus-au-Louis *et al.*, 2009). La Convention sur la diversité biologique (1992), les rapports sur l'évaluation des écosystèmes pour le millénaire *Millennium Ecosystem Assessment* ou *Millennium* (Durajappah *et al.*, 2005) et sur l'économie des écosystèmes et de la biodiversité (Sukhdev *et al.*, 2010) témoignent d'une orientation économique qui s'accroît pour résoudre ces conflits de relation homme-nature. Le glissement du concept de biodiversité vers celui des services écosystémiques depuis une dizaine d'années est représentatif de cette évolution majeure (Gómez-Baggethun *et al.*, 2010). En mettant l'accent non pas sur la biodiversité en soi, mais sur les services qu'elle offre à l'espèce humaine, on élève alors les atteintes à la biodiversité au même rang de calamités globales que celles du changement climatique.

Ainsi, la notion de biodiversité ne relève plus d'une définition mais d'une préoccupation commune à l'humanité (Micoud, 2005) et de la sphère publique (Lascoumes, 2012). La théorie des « services écosystémiques » est basée sur l'idée qu'en raison de notre dépendance à ses aménités, la nature est dotée de valeur (Daily, 1997; Costanza *et al.*, 1997). L'hypothèse des pionniers de cette approche holistique pour une utilisation durable des ressources naturelles basée sur la préservation des écosystèmes est que « si les scientifiques peuvent identifier les services écosystémiques, quantifier leur valeur économique, et, finalement, élever la conservation en adéquation avec l'idéologie de marché, alors les décideurs reconnaîtront la folie de la destruction de l'environnement et travailleront à préserver la nature » (McCauley, 2006). Dit d'une autre façon, cela consiste à appréhender les enjeux de la biodiversité au travers des conséquences économiques résultant de sa dégradation. Bien que remontant aux années 1970 (Bonin, Antona, 2012), cette approche a été portée à l'avant-garde de la scène politique plus récemment avec le rapport sur l'évaluation des écosystèmes pour le millénaire précédemment cité (Durajappah *et al.*, 2005).

À la manière du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), qui a contribué à des politiques d'impulsion pour atténuer le changement climatique avec ses rapports successifs dont les politiques internationales se sont emparées, les principaux résultats des travaux du *Millennium* réalisés par 1 300 scientifiques font état de la dégradation de 15 écosystèmes sur 24 étudiés. Le rapport fournit pour chacun d'eux des évaluations économiques et des conseils pour guider les efforts internationaux vers une meilleure gestion des ressources biologiques. Selon la même perspective, un des derniers rapports de la Plate-forme intergouvernementale sur la biodiversité et les services écosystémiques (IPBES, 2019), produit à partir d'une compilation de travaux réalisée par 145 experts de 50 pays et plus de 300 contributeurs, confirme la trajectoire d'une dégradation persistante et rapide des écosystèmes. Dans ce rapport, l'institution qui est à la biodiversité ce que le GIEC est au climat, souvent nommée «le GIEC de la biodiversité» (Beck *et al.*, 2014; Borie, Hulme, 2015), alerte sur la détérioration des écosystèmes sauvages et domestiques conduisant de plus en plus à l'érosion du vivant, en conséquence directe ou indirecte des activités humaines, au point de menacer le bien-être de l'humanité entière.

L'ambition de tels messages en direction de la sphère politique et sociétale est de promouvoir des stratégies nationales volontaristes, mais aussi de motiver des feuilles de route opérationnelles au niveau local, au sein des organisations publiques et privées, et auprès des individus, en utilisant des méthodes compréhensibles aussi crédibles que prévisibles par l'intégration du capital naturel dans les décisions (Daily *et al.*, 2011). Les méthodes, les contenus et le langage ont ainsi évolué dans le temps à la faveur de modèles scientifiques devenus plus robustes et de l'apport des sciences sociales pour susciter plus efficacement l'action par le désir d'agir.

Les évaluations des experts donnent aujourd'hui à entrevoir des visions plus positives du futur dès lors que des actions seraient engagées. Si la santé des écosystèmes pourrait décliner avec une baisse des précipitations en conséquence du changement climatique dans les régions méditerranéennes, la notion de «seuil» utilisée dans certaines études complémentaires permet d'avancer des scénarios plus optimistes. Selon cette approche, Guiot et Cramer (2016) avancent ainsi qu'un «réchauffement de 2 °C entraînerait une diminution de 12 à 15 % de la zone du biome méditerranéen», mais qu'une hausse limitée à 1,5 °C permettrait d'éviter ce changement, sans précédent au cours des derniers 10 000 ans. Toujours selon ce procédé, le risque climatique de perte de plus de la moitié de l'aire de répartition d'un grand nombre d'espèces serait réduit «de 50 % (plantes, vertébrés) ou de 66 % (insectes) à 1,5 °C contre 2 °C de réchauffement» (IPCC, 2018).

Cette formule permet de retenir les bénéfices espérés de l'action en termes d'atténuation du phénomène climatique sur les écosystèmes et sur la distribution des espèces. L'approche économique des services écosystémiques procède du même plaidoyer : la richesse dégagée par les écosystèmes terrestres du monde

est évaluée approximativement à l'équivalent du produit intérieur brut mondial annuel (IPCC, 2019), ce qui donne à voir un angle de la contribution de la nature au service de l'humanité. Mais la mobilisation du concept de « services écosystémiques » interroge notre lien avec la nature (Méral, Pesche, 2016) par les valeurs utilitaires qu'on lui accorde en opposition à de valeurs intrinsèques (Figuières, Salles, 2012; Schröter, 2014; Maris, 2014); et ceci soulève de vifs débats. C'est aussi un terrain éminemment politique, où s'affrontent des intérêts divergents entre acteurs et qui appellent à construire des formes nouvelles de gouvernance (Theys, 2002), comme l'ont illustré les travaux d'Ostrom (1990).

Tout ceci illustre la complexité des interactions entre les systèmes humains et les systèmes naturels ou plus globalement entre l'organisation des systèmes sociaux, économiques et politiques vis-à-vis des systèmes écologiques dans lesquels ils s'inscrivent. De façon incontestable, cette biodiversité décline rapidement en raison d'effets directs ou indirects des activités anthropiques (IPBES, 2019) ayant pour conséquence la perte et la fragmentation des habitats, la surexploitation de certaines espèces, les pollutions, l'introduction d'espèces invasives et le changement climatique.

La perte et la fragmentation des habitats demeurent la première menace vis-à-vis du maintien de la biodiversité (Fahrig, 2003). Le processus de fragmentation commence par une réduction de surface continue d'habitats; s'ensuit une fragmentation accentuée avec l'accroissement des distances entre fragments d'habitat, conduisant à leur isolement et au changement de propriété des milieux séparant les fragments. Ces fragmentations sont généralement accompagnées par une réduction des effectifs des populations animales, végétales et fongiques, et par des changements de leur distribution spatiale, ce qui perturbe les ressources physiques et d'énergie, les flux biologiques (pollinisation, dispersion) et les patrons écologiques intra- et inter-fragments à différentes échelles spatio-temporelles. Si l'expansion des zones agricoles et forestières avec l'amélioration des performances productives a accru la disponibilité en ressources alimentaires d'une population humaine croissante, les données montrent depuis les années 1960 que ces changements d'usage des sols ont contribué significativement à la perte d'écosystèmes naturels et au déclin de la biodiversité, même s'il existe de grandes variations régionales (IPCC, 2019).

Il est donc impossible de séparer le fonctionnement des écosystèmes de l'activité anthropique si l'on veut étudier leur évolution. Actuellement, de nombreuses espèces requièrent l'intervention humaine pour leur conservation afin d'assurer leur survie à plus ou moins long terme.

La donnée naturaliste, base indispensable à la connaissance et à la conservation de la biodiversité

Dans ce contexte, la donnée naturaliste constitue ainsi une base indispensable à la connaissance et à la conservation de la biodiversité. Les observations ponctuelles réalisées depuis des siècles par les naturalistes aboutissent dans

Encadré 2 - Les archipels marseillais, un conservatoire de la diversité entomologique ?

En dépit de la rudesse des conditions de vie, les archipels du Frioul et de Riou recèlent une faune d'invertébrés tout à fait remarquable. La première mention des îles de Marseille dans la littérature entomologique remonte probablement à 1828, lorsque le comte Dejean décrit dans son *Species général des coléoptères* l'une des grandes curiosités des îles marseillaises, le coléoptère *Orthomus barbarus* (figure 1a).

Parmi ces espèces remarquables à distribution limitée, il faut également citer la chrysomèle *Cyrtonus rotundatus* (figure 1b), qui présente actuellement une disjonction d'aire, avec une petite population en Catalogne et une autre dans la région de Marseille, essentiellement sur l'archipel du Frioul. Cette espèce paraît avoir eu une distribution plus large dans le passé, avec d'autres localités historiques de France méditerranéenne, où elle paraît actuellement éteinte (Sète, Hyères, Menton). Cette disjonction serait relativement récente selon les analyses phylogénétiques. Sa biologie a été étudiée jadis par Mulsant et Wachanru, qui dès 1849 ont découvert sur le littoral marseillais sa plante-hôte, l'astéracée *Hyoseris radiata*.

Citons encore *Amara simplex*, *Allophylax picipes*, *Zophosis errans*, *Zonites fernancastroi*, etc., qui sont tous des coléoptères à distribution extrêmement réduite dans notre pays mais pour la plupart régulièrement observés au Frioul. La présence sur Ratonneau d'une quarantaine, l'hôpital Caroline (qui a servi à partir du début du XIX^e siècle à accueillir les voyageurs soupçonnés de véhiculer une maladie contagieuse) et la proximité du port de Marseille, siège depuis des siècles d'un important trafic de marchandises, pourraient laisser penser que la présence de ces espèces résulte d'apports accidentels suivis d'une acclimatation. C'est probablement vrai pour certaines d'entre elles, mais il faut noter que la chorologie de la plupart de ces insectes est cohérente avec une répartition surtout ibéro-provençale (voire maghrébo-ibéro-provençale), qui s'observe également chez les plantes (*Cheirolophus intybaceus*, *Ulex parviflorus*, *Lithodora fruticosa*, etc.) et chez les mollusques (*Hypnophila boissii*, par exemple).

Ceci plaiderait plutôt en faveur d'une distribution relictuelle, avec un ancien peuplement plus vaste que l'actuel et un maintien sur certaines îles marseillaises, qui ont ainsi pu jouer un rôle de refuge. Quelle que soit la signification biogéographique de ce peuplement d'invertébrés, il existe sur nos archipels un véritable enjeu de conservation pour de nombreuses espèces dont certaines paraissent proches de l'extinction.



Figures 1a et 1b. Le coléoptère *Orthomus barbarus* (à gauche) et la chrysomèle *Cyrtonus rotundatus* (à droite). (Crédits : Philippe Ponel.)

le meilleur des cas à des publications accessibles qui consistent notamment à énumérer les espèces rencontrées sous forme de listes floristiques ou faunistiques. Ces multiples observations ponctuelles servent encore de base à la réalisation d'ouvrages de portée nationale (fiores et série « Faune de France »). Par contre, elles n'ont que rarement servi à réaliser des catalogues complets au niveau régional et surtout local, déclinés à des échelles biogéographiques (massif ou région naturelle) ou administratives (commune).

Pour la métropole Aix-Marseille Provence, deux ouvrages remarquables de référence sont encore actuellement largement utilisés : le *Catalogue des plantes vasculaires des Bouches-du-Rhône* (1981) de René Molinier et le *Catalogue des coléoptères de Provence* (1908-1954) d'Henri Caillol. Citons aussi la publication récente de deux ouvrages « grand public » et très bien documentés concernant la flore et la faune du département des Bouches-du-Rhône (respectivement Pires, Pavon, 2018 et Johanet, Kabouche, 2019). Concrètement, les synthèses publiées signalant la présence des espèces (voir par exemple la liste des plantes vasculaires du site classé des Calanques dans Véla *et al.*, 2011 et celle des espèces d'intérêt patrimonial de la Côte bleue du secteur de Lavéra-La Couronne dans Barret, Schwob, 2005) sont rares, et celles traitant de la dynamique de la flore ou de la faune de « petits » territoires sont quasiment inexistantes. Des études de cas locaux permettent pourtant de mettre en exergue leur importance, comme l'étude de la germandrée petit-pin (*Teucrium pseudochamaepitys*). Cette plante protégée rare et dont la quasi-totalité en France se situe dans le pays marseillais a mis en évidence l'effet négatif de l'urbanisation et des activités « industrielles » des quartiers nord et ouest de Marseille sur ses populations aujourd'hui très fragmentées (encadré 2).

Encadré 3 - Enjeux vis-à-vis de la biodiversité des sols

Les sols hébergent une biodiversité invisible mais spectaculaire par le nombre de taxons de chaque règne du vivant, par ses *valeurs* écologiques, économiques et aménitaires, et finalement par sa vulnérabilité. Les sols situés en zones urbaines et péri-urbaines restent encore trop peu étudiés et décrits. Pourtant, à l'interface avec les autres compartiments de l'environnement, ils sont au cœur des grands enjeux planétaires tels que la production de biomasse, la production alimentaire, le changement climatique, la qualité de nos paysages ou la protection de la biodiversité. Si les préoccupations sur la qualité des sols sont très anciennes, la prise de conscience politique de l'importance d'une préservation et d'une gestion durable de cette ressource, suivie des mesures concrètes de sa protection, est très récente, à l'instar des deux autres principales ressources terrestres : l'eau et l'air. La déclaration de Winfried Blum, secrétaire général de l'Union internationale des sciences du sol (IUSS) : « On boit l'eau, on respire l'air, mais on ne mange pas le sol. Il ne nous nourrit qu'indirectement », exprime particulièrement bien les raisons de cet oubli.

Les sols représentent pourtant une ressource naturelle vitale, non renouvelable à notre échelle de temps, et dont la qualité doit être préservée afin d'assurer durablement la productivité et la santé des plantes, des hommes et des autres animaux, et de maintenir ou d'améliorer la qualité de l'eau et de l'air (Tóth *et al.*, 2007). En condition naturelle, le sol est en équilibre constant entre ses propriétés pédogénétiques et la végétation qui se développe à sa surface. Cet équilibre peut cependant être perturbé sous l'action des forçages anthropiques, ce qui peut induire de profondes altérations de la qualité des sols et des « services écosystémiques » qu'ils procurent. Nombreux sont les sols vulnérables en région méditerranéenne car ils sont naturellement enclins à la dégradation en raison :

- 1) de leurs propriétés intrinsèques (sols peu épais) ;
- 2) du couvert végétal souvent clairsemé ;
- 3) des conditions climatiques (alternance de périodes de sécheresse et de fortes précipitations) ;
- 4) des conditions topographiques favorisant leur érosion (Lahmar, Ruellan, 2007).

À cela s'ajoutent les dégradations liées aux activités humaines telles que l'agriculture, les activités industrielles, l'urbanisation croissante ou encore le tourisme. De fait, les sols méditerranéens sont parmi les sols les plus anthropisés de la planète, et dans certaines situations les seuils d'irréversibilité de leur dégradation sont déjà atteints, voire dépassés (Yaalon, 1997 ; Lahmar, Ruellan, 2007). Pour conserver à la fois la résilience des écosystèmes (Chapin *et al.*, 2000) et la fertilité des sols, de plus

en plus d'études soulignent l'importance de leur composante biologique et en particulier de leurs communautés microbiennes (Lavelle, Spain, 2001). Néanmoins, ces relations ont été essentiellement étudiées dans les systèmes agricoles, et restent encore trop peu documentées dans les autres sols, qu'ils soient naturels ou artificiels.

Ainsi, les mises au point de méthodologies et de référentiels scientifiquement valides pour la caractérisation des profils pédologiques, l'évaluation des volumes et des matériaux disponibles, des potentiels agronomiques, et l'inventaire de la biodiversité sont autant d'enjeux impératifs pour l'établissement de cahiers des charges préalables aux aménagements.

Par ailleurs, l'approche historique repose sur les données contenues dans les collections, les archives et les diverses sources historiques mobilisables qui constituent la mémoire des deux ou trois siècles derniers en matière de distribution des espèces végétales et de l'organisation spatiale du territoire. Par exemple, les herbiers forment des témoins privilégiés des mutations de la société à travers les bouleversements de la végétation et des espaces qui l'accompagnent (Santini, 2012). Les botanistes réalisaient des collections régionales de la flore « banale », des espèces rares, voire endémiques mais également des espèces introduites. Les « sources » végétales ainsi constituées permettent de reconstituer la dynamique d'écosystèmes fortement perturbés. Si la réalisation de synthèses floristiques et faunistiques semblait autrefois difficile, le développement actuel d'outils informatiques permettant un archivage quasiment illimité des données naturalistes rend leur réalisation plus abordable, comme le portail SILENE². Toutefois, cet outil ne peut fournir des résultats pertinents que si la donnée de base qu'il capitalise (observation, collecte, publication) est sans cesse implémentée, actualisée et géolocalisée. Il convient à tous les naturalistes de poursuivre les études taxonomiques car il reste des espèces à découvrir localement, voire de « nouvelles » espèces à décrire.

Il convient à tous les acteurs de l'environnement (DREAL, Conseil scientifique régional du patrimoine naturel, Conservatoire botanique national méditerranéen, gestionnaires d'espaces naturels, associations, bureaux d'études, laboratoires de recherche) de poursuivre la récolte de données en termes de chorologie, qui est l'étude de la répartition cartographique des espèces et de la dynamique de la biodiversité à moyen terme dans des écosystèmes à enjeux multiples.

2 Système d'information de localisation des espèces natives et envahissantes: <http://www.silene.eu>.

Encadré 4 - Enjeux vis-à-vis de la biodiversité des milieux aquatiques d'eau douce

La conservation des espèces d'eau douce est particulièrement contrainte du fait des changements globaux et de la pression anthropique croissante. En effet, ces milieux d'eau douce, qu'il s'agisse des cours d'eau ou des plans d'eau, subissent d'ores et déjà les conséquences du changement climatique. Des périodes de sécheresse plus longues sont attendues dans l'avenir avec une réduction des débits et/ou des volumes d'eau disponibles en période estivale; des événements hydrologiques extrêmes avec modification des transports de substrat existent déjà en raison du climat méditerranéen; et d'une manière générale, les fluctuations saisonnières pourraient être de plus en plus marquées. Parallèlement, et de manière plus spécifique à la zone méditerranéenne, pour satisfaire la demande de la population de plus en plus importante, les prélèvements d'eau augmentent, en particulier en période de sécheresse où la ressource est limitée.

Cette pression humaine directe sur la ressource s'ajoute à celle du climat et se traduit par une réduction accrue des flux d'eau dans les milieux et, par voie de conséquence, par une modification des propriétés physico-chimiques. Beaucoup d'infrastructures sont également créées pour répondre à de nouveaux besoins (prévention des inondations, production d'hydro-électricité, irrigation) et favoriser le synchronisme entre volumes disponibles et demande (Kondolf, Batalla, 2005); ces infrastructures régulent généralement les flux d'eau et réduisent ainsi la variabilité naturelle des débits et les transferts de sédiments, et induisent des modifications des régimes thermiques (Cowell, Stoudt, 2002). L'impact sur la qualité des habitats de la partie inondée mais aussi des cours d'eau situés à l'aval est indéniable (Kondolf, Batalla, 2005). Ces retenues viennent aussi altérer voire complètement détruire la continuité des cours d'eau et donc la libre circulation des espèces. Parallèlement, pour pallier les problèmes de sécheresse, les agriculteurs ont de plus en plus recours à l'irrigation, ce qui augmente encore la pression sur la ressource. Enfin, l'anthropisation des bassins versants impacte aussi directement, via les rejets, la qualité chimique des cours d'eau et donc les milieux de vie des organismes.

Face aux perturbations induites par les modifications de leur milieu de vie, la survie des organismes aquatiques, par rapport aux organismes vivant en « milieux ouverts », est contrainte par les possibilités limitées de dispersion. En effet, celles-ci s'opèrent nécessairement sur un gradient amont / aval plus ou moins important selon les capacités propres de mouvement des organismes, depuis le micro-habitat pour les macro-invertébrés benthiques par exemple jusqu'à l'ensemble du réseau pour certains poissons migrateurs.

La biodiversité et ses multiples enjeux

Contrairement à ce que l'on rencontre dans la plupart des autres grandes villes européennes, la métropole Aix-Marseille Provence n'est plus entourée par une ceinture agricole péri-urbaine, mais par des massifs calcaires qui placent les espaces naturels constitués de garrigue et de pinède (90 km² sur le seul territoire de la commune) aux portes de la ville. Dans sa globalité, la métropole marseillaise donne l'impression d'une ville entre les collines avec une forte juxtaposition entre espaces urbanisés et espaces naturels. Ainsi, les préoccupations initialement d'ordre écologique deviennent aussi sociologiques, révélant de véritables enjeux socio-écologiques vis-à-vis de la biodiversité des milieux terrestres collinéens, littoraux, urbains et édaphiques (encadré 3 *supra*), ainsi que des milieux aquatiques d'eau douce (encadré 4).

Dans la garrigue des collines périmarseillaises, les conditions climatiques (notamment la sécheresse estivale) ont sélectionné au cours du temps des traits de vie particuliers qui confèrent aux espèces animales et végétales l'originalité et la valeur des écosystèmes méditerranéens. Nous pouvons ainsi rencontrer une flore très diversifiée riche de dizaines d'espèces protégées ou endémiques (sablaine de Provence, ophrys de Provence, germandrée faux petit-pin) et une faune exceptionnelle, dont l'emblématique lézard ocellé (le plus grand lézard d'Europe) ou encore la magicienne dentelée (le plus grand insecte d'Europe). Cet écosystème riche et fragile concentre aussi un espace récréatif et touristique pour des millions de personnes (plus d'un million de visiteurs par année dans le seul massif des Calanques) où la biodiversité est moins connue pour sa valeur intrinsèque que pour la valeur patrimoniale de certaines espèces bien connues (thym, romarin, asperge sauvage, sauge, lavande, etc.).

Dans le cadre du changement global, la disparition des espèces structurantes de la garrigue est une hypothèse qui inquiète, car la mise à disposition de niches écologiques laissées vacantes conjuguée à la proximité d'espèces invasives (agave, griffe de sorcière, figuier de Barbarie) pourrait conduire à une garrigue bien différente tant du point de vue paysager que des « biens et services » rendus par cet écosystème. Les enjeux écologiques et sociétaux de la préservation de la biodiversité ne se limitent donc pas aux espèces remarquables mais concernent également les espèces communes qui structurent l'écosystème de garrigue (chêne kermès, romarin, ciste blanc, ajonc de Provence), en assurent le bon fonctionnement, permettent l'expression d'une biodiversité végétale et animale originale et garantissent aux usagers la pérennité d'un espace naturel de proximité exceptionnel.

Le littoral périmarseillais, lieu de confluences environnementales (variété de paysages) et humaines (variété d'usages), représente un territoire biologiquement très riche ainsi qu'un lieu très investi par les sociétés qui, au fil du temps, ont noué des relations symboliques fortes avec cet habitat. Cependant, la densité des populations humaines y est en constant accroissement, entraînant

Encadré 5 - L'Observatoire des saisons Provence

L'Observatoire des saisons (ODS) Provence est un programme de sciences participatives créé en 2015 par l'Institut méditerranéen de biodiversité et d'écologie marine et continentale (IMBE, Aix-Marseille Université) en partenariat avec le Centre d'écologie fonctionnelle et évolutive (CEFE-CNRS, Montpellier) pour le volet scientifique, et l'association Tela Botanica pour le développement et l'animation.

Il vise à mobiliser les citoyens par l'action en les invitant à collecter des données sur la phénologie des êtres vivants, notamment des plantes. L'objectif est d'aider les scientifiques à comprendre l'impact du changement climatique sur nos écosystèmes provençaux. L'ODS Provence a été dans un premier temps développé dans un réseau de collèges du département des Bouches-du-Rhône, avec l'implication des enseignants de sciences et vie de la Terre (SVT) d'une vingtaine d'établissements (et le soutien du conseil départemental 13), et il s'est par la suite ouvert au grand public (figure 2a).

Le projet permet de sensibiliser les citoyens aux sciences ainsi qu'aux thématiques du changement climatique et de la biodiversité. Les participants sont invités à suivre une liste spécifique d'espèces présentes en Provence, dont le cycle est intrinsèquement lié aux variations du climat. Ils deviennent ainsi de véritables acteurs de la recherche scientifique. Leurs observations viennent enrichir une base de données analysée par un collectif de chercheurs travaillant sur les problématiques climat-biodiversité.

L'ODS Provence constitue la déclinaison régionale de l'Observatoire des saisons qui, au niveau national, a déjà recueilli dix années de données grâce à l'implication d'observateurs et observatrices qui ont suivi la phénologie d'espèces réparties sur tout le territoire métropolitain. Ces données ont permis aux chercheurs de constituer une base de données homogène, ce qui rend maintenant possible l'intégration d'espèces à répartition plus locale. L'analyse de ces données à l'échelle de la Provence donnera dans quelques années des analyses plus fines que celles faites à l'échelle nationale. Les deux observatoires présentent une complémentarité intéressante pour comprendre l'impact du changement climatique à différents niveaux, l'ODS Provence ciblant plus particulièrement les espèces à répartition provençale.

un taux élevé d'artificialisation – appelé « littoralisation » – qui menace les nombreux habitats côtiers d'intérêt communautaire sensibles à la fragmentation, aux espèces invasives, aux pollutions d'origine anthropique et aux aléas de la submersion marine ou des phénomènes d'érosion côtière. Dans ce contexte, ce littoral est ancré dans une situation paradoxale aux enjeux multiples :



Figure 2a. Sortie de terrain de l'Observatoire des saisons Provence. (Crédits : Floriane Flacher.)



Figure 2b. Programme Sauvages de PACA. (Crédits : Christine Robles.)

- 1) stress abiotiques typiques dans la région : vents violents, salinité et sécheresse extrêmes, quasi-absence de sol;
- 2) taux élevé d'espèces endémiques et/ou rares et présence d'habitats avec des statuts de conservation (ZNIEFF) et réglementaires au niveau européen, national et local;
- 3) pression anthropique forte du fait de son insertion dans un tissu urbain de près de 1,5 million d'habitants;
- 4) pollutions, héritées et actuelles, organiques et inorganiques notoires des sols et des eaux;
- 5) fort attachement et appropriation ancienne par les usagers locaux;
- 6) espace naturel libre d'accès de droit.

Le littoral périmarseillais a ainsi été identifié dans la charte du parc national des Calanques comme une zone atelier prioritaire et un site-modèle provençal de

Encadré 6 - Le programme Sauvages de PACA

Des approches participatives ont été développées dans le cadre de programmes de suivi de la biodiversité en ville comme le programme Sauvages de PACA. Ces programmes de sciences participatives permettent d'acquérir de nouvelles connaissances en écologie urbaine et de mettre en place des suivis sur le long terme. Ils font appel aux citoyens pour alimenter, grâce à leurs observations de terrain, des données utilisables par les chercheurs. Ils mobilisent un large public, aussi bien des particuliers que des établissements scolaires. Les citoyens réalisent des observations sur le terrain et consignent leurs observations sur des sites Internet dédiés par des saisies en ligne (figure 2b *supra*).

Les données recueillies alimentent les bases de données des chercheurs en écologie urbaine qui visent à répondre aux questions suivantes :

- 1) Quelle est l'évolution de la biodiversité en ville ?
- 2) Quels rôles jouent les milieux micro-habitats urbains dans le maintien et la dynamique (flux) des espèces végétales ?
- 3) Quelles relations y a-t-il entre les communautés observées et la gestion des rues, afin d'appréhender la meilleure façon de construire et de gérer une rue pour améliorer la biodiversité et donc le cadre de vie des citoyens ?

Ce type de programme participatif permet de sensibiliser à l'environnement et à la flore en ville, par la pratique directe d'un protocole scientifique sur le terrain et sa saisie informatique. Il permet ainsi aux citoyens de se connecter avec cette nature dite ordinaire qui a pris de l'importance après les lois Grenelle sur l'environnement.

l'Observatoire hommes-milieux (OHM) « Littoral méditerranéen » (labellisé par l'INEE et l'INSHS du CNRS en janvier 2012).

Quant à la ville, appréhendée en tant qu'objet d'étude en écologie depuis à peine deux décennies, les études éparses montrent qu'elle présente une biodiversité composite résultant de perturbations et de forçages hétérogènes (climat, aménagement, pratiques de gestion, modes actuels et passés d'occupation et d'utilisation des sols, etc.). La ville est soumise à des changements graduels, mais également à des changements soudains et rapides liés à des perturbations anthropiques directes. Elle comporte donc des assemblages inédits en termes de communautés qui nécessitent des connaissances à la fois descriptives, corrélatives et dynamiques. Sous l'influence actuelle d'une densification importante des espaces urbains afin de limiter l'étalement périphérique, la biodiversité intra-urbaine est d'autant plus au centre des réflexions menées sur la ville durable en termes de qualité environnementale et de « services écosystémiques » associés (limitation pollution, réduction îlot de chaleur urbain, aménités vertes, etc.). Les nouvelles politiques environnementales lancées ces dernières années en France sous l'impulsion du Grenelle de l'environnement amènent en effet à reconsidérer la place de la nature en ville. La gestion écologique des espaces verts vise à redonner à la faune et à la flore des habitats de qualité et entraîne le développement accru de la biodiversité ordinaire (espèces communes) dans les espaces publics, tandis que la végétalisation des toits et des façades offre des opportunités pour créer de nouveaux écosystèmes (bâtiments à « biodiversité positive ») et services écosystémiques (rétention des eaux pluviales).

Ces changements en termes de cadre de vie ont des conséquences sur la perception qu'ont les citoyens de la nature en ville, non habitués à ces nouveaux modèles de végétalisation de leurs espaces et de développement de la faune associée (encadrés 5 *supra*, 6 *ci-contre* et 7 *infra*). Parallèlement, les espèces introduites dans les espaces très artificialisés et les fortes perturbations des milieux urbains posent la question de l'homogénéisation biotique aussi bien au niveau spécifique que fonctionnelle, ainsi que de la connectivité en paysage urbanisé (flux de gènes, diffusion espèces invasives, etc.). La connaissance du fonctionnement de la biodiversité en milieu urbain nécessite des approches à échelles fines aussi bien spatiales (quartiers, rues, espaces à caractère naturel, etc.) que temporelles. Ces processus sont analysés au regard des formes d'urbanisation résultant de l'histoire d'occupation des sols, de l'aménagement urbain et des pratiques de gestion des espaces publics et privés en portant l'attention aux espaces urbains et péri-urbains, ainsi qu'aux zones rurales qui s'urbanisent sous la même impulsion.

Comment les espèces et les écosystèmes répondent-ils aux différents forçages ?

Les processus impliqués dans la répartition des espèces et leur abondance dans les habitats sont toujours au cœur des problématiques écologiques, des échelles

Encadré 7 - La ville sélectionne les espèces par leurs traits biologiques

Les communautés végétales spontanées présentes en zones urbanisées montrent une réponse fonctionnelle aux perturbations environnementales associées aux usages de ces espaces (pratiques et gestion) et aux modifications du paysage. Les traits biologiques des espèces végétales se développant dans deux types d'espaces urbains et péri-urbains, les jardins privatifs et les friches post-culturelles, ont ainsi été étudiés selon un gradient d'urbanisation, afin d'appréhender par des descripteurs biologiques simples la reproduction des espèces et leurs relations avec l'environnement : mode de pollinisation, mode de dissémination, stratégie de vie de l'espèce sensu Grime (2006) et type biologique selon la classification de Raunkiær (1934). D'un point de vue fonctionnel, la flore des friches post-culturelles ne diverge pas sensiblement de celles des jardins privatifs en zone de moyenne et faible densité de bâti excepté pour le mode de dissémination. Les pratiques annuelles d'entretien appliquées sur ces deux types d'espaces pourraient en partie expliquer les similitudes fonctionnelles observées tandis que les barrières physiques auxquelles sont soumises les espèces végétales dans les jardins (haies, murs, etc.) agiraient comme des filtres sélectifs sur la dispersion de celles-ci. En revanche, la composition fonctionnelle de la flore des jardins des zones de forte densité de bâti (noyau villageois, centre-ville dense) montre une composition fonctionnelle différente des jardins des zones périphériques moins denses. Si le mode de dissémination prédominant en milieu urbain au sein de la flore spontanée est l'anémochorie (dispersion des fruits et graines par le vent) (Knapp *et al.*, 2012), la situation particulière des jardins privatifs entourés de bâti de hauteur relativement importante oblige les espèces à utiliser d'autres modes de dispersion. On y observe, par exemple, des espèces se disséminant par endozoochorie, c'est-à-dire principalement par les oiseaux.

Ce constat suggère l'importance de la faune en milieu urbain pour maintenir des flux de graines dans des milieux potentiellement isolés. Réciproquement, les ressources apportées par les espèces végétales, notamment les espèces ornementales aux périodes de floraison et de fructification parfois prolongées, contribuent au maintien de la faune en milieu urbain. De la même façon, si des travaux menés antérieurement sur la flore spontanée des espaces publics en milieu urbain montrent que les espèces à pollinisation anémogame (dispersion du pollen par le vent) sont majoritaires (Benvenuti, 2004; Lososová *et al.*, 2006), le manque d'habitat approprié rend les insectes pollinisateurs plus rares (Cheptou, Avendaño, 2006), la conformation des jardins et la hauteur du bâti sont des paramètres qui peuvent influencer les flux de pollens en limitant leur dispersion (Evans, 2010).

En réponse à cette contrainte, les espèces entomogames ont pu être sélectionnées au niveau des communautés. Ce résultat pourrait s'expliquer également par la forte présence d'espèces cultivées très florifères dans les jardins privés et notamment en zone de forte densité de bâti où par exemple la flore est constituée à plus de 70 % d'espèces ornementales à Marseille (Deschamps-Cottin *et al.*, 2013). Cette végétation très florifère peut avoir un effet attractif pour les pollinisateurs (Molina-Montenegro *et al.*, 2008) et la flore spontanée à proximité pourrait bénéficier de ces pollinisateurs « invités » par les espèces ornementales. Par ailleurs, on observe que les espèces des communautés végétales des jardins des zones de forte densité de bâti pratiquent un mode de pollinisation alternatif en plus de la pollinisation entomogame : l'autogamie. En effet, l'autofécondation est une stratégie adoptée par certaines plantes, notamment en milieu urbain pour pallier le déficit de pollinisateurs (Cheptou, Avendaño, 2006).

spatiales larges (biogéographiques) aux échelles régionales (Brown, 1984). À l'échelle régionale, la distribution d'une espèce dépend d'une combinaison de facteurs environnementaux abiotiques et biotiques déterminant sa niche écologique (Grinnell, 1917; Elton, 1927; Hutchinson, 1957), niche qui peut varier dans le temps et dans l'espace. En réponse à l'hétérogénéité des conditions environnementales, les attributs biologiques des espèces leur permettent de se développer, de boucler leur cycle de vie et ainsi contribuent à leur persistance (Brown, 1984).

À ceci se rajoutent les activités humaines qui modifient la répartition des espèces au travers de la destruction ou la fragmentation des habitats, de l'exploitation des espèces, de l'introduction d'espèces, des dérèglements climatiques ainsi que des changements des régimes de perturbations naturelles et d'usages des terres. Connaître les forçages impliqués dans la répartition des espèces (encadré 8 *infra*) constitue donc un prérequis pour la mise en place des mesures de gestion de la biodiversité, mise en place illustrée ici par trois cas d'étude de la métropole Aix-Marseille Provence.

La sabline de Provence et son héritage évolutif

La distribution de la sabline de Provence, *Arenaria provincialis* (*Caryophyllaceae*), plante protégée et endémique des affleurements calcaires situés entre Marseille et Toulon, a été finement étudiée. *A. provincialis* (figure 3a *infra*) est la seule sabline du sud de la France à pouvoir coloniser les éboulis et les lapiaz à basse altitude et à proximité de la mer (Youssef *et al.*, 2011). Cette niche écologique particulière, très rare, voire unique pour le genre *Arenaria*, peut s'expliquer par le cycle annuel et hivernal d'*A. provincialis*.

Encadré 8 - Forçages et dynamique de la biodiversité

Les feux constituent une perturbation fréquente dans les écosystèmes terrestres de la métropole Aix-Marseille Provence. Ils font partie de la dynamique naturelle de la végétation et sont même nécessaires au maintien de certaines espèces et communautés végétales. Pour d'autres espèces, ils ont un impact négatif sur leur survie. S'il n'est pas attendu une augmentation de la fréquence des feux pour les décennies à venir, en revanche il est attendu une augmentation de la fréquence des grands feux (> 100 ha) et des feux les plus intenses ou dynamiques, du fait de la combinaison entre changements climatiques et accumulation de la biomasse végétale combustible dans le paysage régional. Cette perspective présente donc un enjeu fort dans la vie quotidienne et l'aménagement du territoire. Il est par exemple important de déterminer des seuils de fréquence et d'intensité des feux qui permettent ou non le maintien des espèces végétales structurantes des communautés. Dans la région de Marseille, il existe un fond floristique commun d'espèces résistantes aux incendies, mais une forte fréquence de feu diminue la richesse et la diversité des communautés végétales ainsi que l'abondance des espèces compétitrices et zoochores, et favorise le développement de strates basses dans les forêts. Ces changements floristiques pourraient à leur tour augmenter le risque d'un nouveau feu et son intensité.

La récurrence des feux influe ainsi fortement sur la dynamique forestière et sa régénération. Parallèlement, l'érosion et le brûlage appauvrissent progressivement le sol en matière organique dans les sites fréquemment incendiés du massif de l'Étoile et du plateau du Grand Arbois. Sur les sols squelettiques, une végétation pyrophyte se développe apportant au sol une matière organique récalcitrante à la minéralisation microbienne. Une trop grande fréquence conduit à une perte de ressources disponibles et une dégradation de la structuration physique des sols. En outre, les activités enzymatiques impliquées dans la dynamique des cycles des nutriments et du carbone sont très nettement impactées par la répétition des feux. Les communautés microbiennes sont largement simplifiées au profit des populations opportunistes, à croissance rapide et de faible diversité catabolique. Il est donc indispensable de comprendre les processus et les flux chimiques, qui contribuent directement ou en interaction avec d'autres paramètres, à la reconstitution du milieu soumis à des feux répétés.

D'un autre côté, les évolutions climatiques attendues peuvent induire des conséquences complexes sur le fonctionnement des sols et la dynamique du carbone dans ce compartiment. Ainsi, l'élévation de la teneur en CO₂ atmosphérique devrait conduire à une augmentation de la biomasse végétale et donc des résidus de végétaux sur le sol. Le réchauffement climatique

peut, *a contrario*, provoquer un taux plus élevé de minéralisation par les micro-organismes du sol, si les conditions du sol ne sont pas limitantes (eau, éléments nutritifs, pH, etc.). Parallèlement, l’empreinte anthropique s’accroissant, les pollutions organiques et minérales pourraient également fortement modifier les structures des communautés microbiennes et leurs activités. Il sera donc nécessaire de mieux comprendre la régulation du fonctionnement de la composante microbienne du sol, actrice majeure des flux de matière et d’énergie, et de la prendre en compte dans la gestion des territoires et les modes d’occupation des sols.

Autre caractéristique unique, son fruit est une capsule fermée emprisonnant le plus souvent une graine, rarement deux, énorme en comparaison avec les graines des autres *Arenaria*. Cette spécificité a des conséquences immédiates sur la dispersion : le fruit a une vélocité plus élevée, tombe plus près de la plante mère et se « faufile » par petits rebonds entre les cailloux sans risquer de rester accroché en surface grâce à son enveloppe bien lisse. Dès la germination, la plantule est capable de développer un système racinaire atteignant rapidement les éléments fins et humides du sol en profondeur grâce aux réserves importantes de cette graine énorme.

Les travaux de phylogéographie, visant à reconstruire l’histoire des populations à partir de déductions fondées sur la divergence moléculaire de leur ADN, ont montré que la sabline abrite dans son génome les indices d’une histoire remontant au début du Pléistocène (Pouget *et al.*, 2013). Ainsi, à la suite d’une expansion ancienne, il existe maintenant deux grandes lignées chez *A. provincialis*, héritage évolutif structurant la distribution en deux entités géographiques (figure 3b *infra*).

Séparées par la vallée de l’Huveaune, ces deux lignées se rencontrent ponctuellement au nord du cap Canaille près de La Ciotat, dans la zone centrale de la distribution actuelle à la fois source ancestrale, zone de contact, et carrefour des flux de gènes. Il faut noter que chez les plantes une telle diversité génétique est rarement observée au niveau intraspécifique et à une échelle de distance inférieure à 100 km. Cette diversité ne peut s’expliquer que par la persistance de ses populations sur le très long terme, ce qui supporte l’hypothèse d’une très grande stabilité de son habitat et de son milieu tout au long du Pléistocène, soit durant les deux derniers millions d’années. La confrontation de cette histoire et de cette structure à la fois génétique et géographique à celle plus récente des paysages nous montre que les deux lignées d’*A. provincialis* se trouvent dans des situations écologiques contrastées.

La lignée du sud-ouest occupant les Calanques réunit des populations abondantes, dans un environnement rocheux et aride, depuis peu protégé par le parc national des Calanques. D’un autre côté, la lignée du nord-est

regroupe des populations plus rares et plus isolées dans un environnement plus montagneux (Étoile, Sainte-Baume), plus humide et donc plus forestier. Cette structure paysagère est le fruit d'une dynamique d'ouverture-fermeture déterminée par le climat et le mode d'usage agricole des terres. La reconquête des milieux ouverts par les ligneux amène une contraction d'aire de la sabline vers des refuges locaux situés au niveau des crêtes ou dans les éboulis. Cette contraction d'aire est plus particulièrement observée pour la lignée nord-est. La lignée sud-ouest quant à elle présente une plus grande stabilité démographique sur le long terme avec une empreinte très claire de cette stabilité au niveau du polymorphisme des séquences d'ADN (Le Galliot, 2017). La zone de plus longue persistance, dite « ancestrale », est située au centre est de sa distribution sur plusieurs communes subissant actuellement de très fortes pressions d'aménagement causées par l'étalement urbain (Aubagne, Carnoux-en-Provence, Cassis, Ceyreste, La Ciotat, La Penne-sur-Huveaune, Roquefort-la-Bédoule).

La présence de marqueurs originaux au sein de chacune des lignées et au niveau des limites de l'aire (au sud-ouest à Marseilleveyre et au nord-est au sommet de la Sainte Baume) montre que les populations les plus éloignées écologiquement, car presque séparées par mille mètres d'altitude, sont bien distinctes génétiquement.

La conjonction de ces deux observations, forte structure phylogéographique et forte différenciation écologique, soutient la proposition d'unités de conservation distinctes représentées par les populations marginales situées aux extrêmes de la distribution et aux extrêmes du gradient écologique. Ce type de connaissance, bien que largement développées pour la conservation des espèces animales (Moritz, 2002) est encore trop rare pour la conservation des plantes méditerranéennes (Médail, Baumel, 2018). L'étude comparative de la diversité génétique d'*A. provincialis*, c'est-à-dire de son héritage évolutif, avec la diversité floristique de la zone d'étude a montré que la composante génétique n'était pas corrélée spatialement avec d'autres facettes de la diversité végétale comme la richesse spécifique ou encore la présence d'espèces rares, patrimoniales et protégées (Pouget *et al.*, 2016).

Ainsi, cibler un seul aspect de la biodiversité, telle que la flore patrimoniale, pour définir des priorités de conservation ou des aires de protection n'est pas satisfaisant pour garantir la préservation des autres aspects de la biodiversité. En particulier, ce n'est pas suffisant pour préserver la diversité génétique qui conditionne la biodiversité future (Moritz, Agudo, 2013); ceci souligne la nécessité d'une approche de la conservation qui s'adapte aux problématiques propres aux différentes facettes de la biodiversité.

Le corail rouge et ses défis en milieu marin

L'impact des activités humaines sur les écosystèmes marins est maintenant clairement démontré et problématique quant à l'avenir de la biodiversité marine. Le corail rouge de Méditerranée, *Corallium rubrum*, fournit une bonne



Figure 3a. La sabline de Provence *Arenaria provincialis* en fleur. (Crédits : Alex BaumeL.)

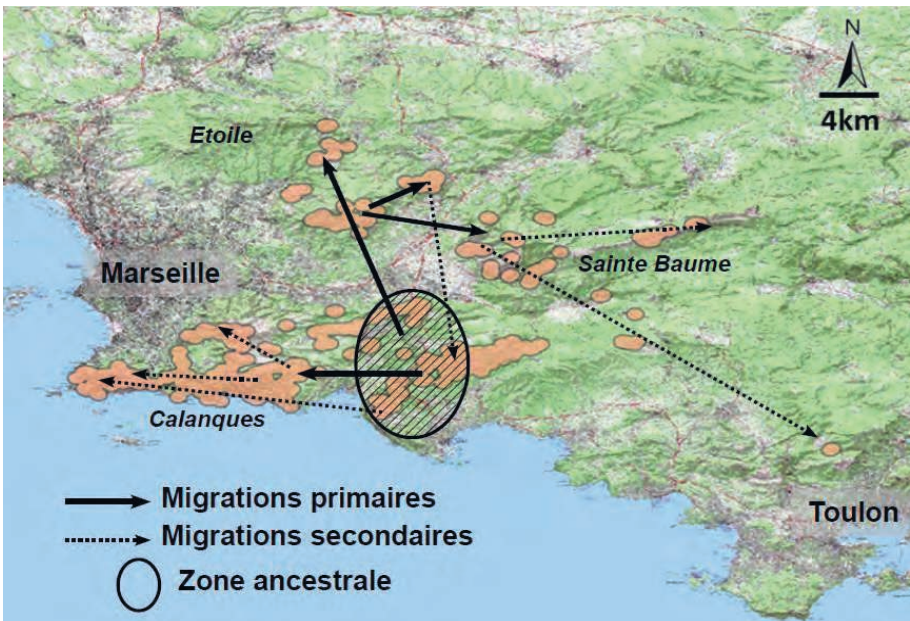


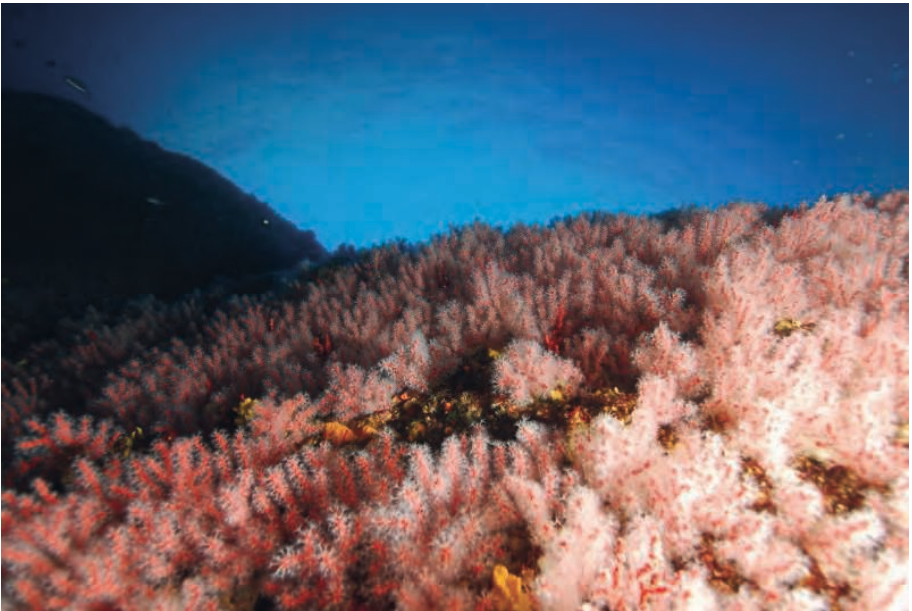
Figure 3b. La distribution et l'histoire de l'expansion de la sabline de Provence. (Crédits : Alex BaumeL.)

illustration des pressions locales et globales auxquelles doivent faire face les espèces marines. Le corail rouge est un cnidaire du groupe des octocoralliaires : chaque unité fonctionnelle, ou polype, d'une colonie de corail rouge comporte huit tentacules (figures 4a et 4b).

Le corail rouge est présent en Méditerranée occidentale, en Adriatique, en Atlantique Est et de manière sporadique en Méditerranée orientale ; il vit de moins de 10 m de profondeur jusqu'à plus de 1 000 m (Knittweis *et al.*, 2016). Il est exploité depuis plusieurs siècles du fait notamment de ses supposées propriétés magiques et thérapeutiques et de son utilisation en bijouterie. En 2012, la production globale (déclarée) de corail rouge atteignait 50 tonnes, alors qu'elle était de 98 tonnes en 1978. Le corail rouge se caractérise par un très faible taux de croissance (moins de 0,5 mm/an en diamètre ; Marschal *et al.*, 2004 ; Boavida *et al.*, 2016) et un âge à première reproduction compris entre 7 et 10 ans (Torrents *et al.*, 2005). Le corail rouge peut ainsi se reproduire à une taille où il est potentiellement peu intéressant à exploiter, un avantage pour se maintenir. Il s'agit également d'une espèce avec une importante longévité : probablement plus de 100 ans (Marschal *et al.*, 2004).

Cependant, son exploitation a conduit à une importante modification des structures de taille de cette espèce (Garrabou *et al.*, 2017). En comparant l'archipel de Riou, zone soumise à des prélèvements réguliers, et la réserve marine de Carry-le-Rouet, zone protégée depuis 1983, on observe que le diamètre basal dans les zones exploitées est en moyenne deux fois plus faible que dans la zone protégée (Garrabou, Harmelin, 2002). L'étude récente d'une population non exploitée en Corse a aussi montré que le corail rouge pouvait être en forte densité avec une proportion importante de colonies très âgées (Garrabou *et al.*, 2017). La récupération complète en taille des colonies de corail après son exploitation pourrait ainsi prendre des dizaines voire des centaines d'années, ce qui implique une régulation de l'exploitation. Or, des actes de braconnage sont encore recensés, et le corail rouge subit également les effets d'épisodes d'anomalies thermiques (température estivale de l'eau de mer anormalement élevée ou stable), épisodes qui ont induit des vagues de mortalités importantes (nécroses) au cours des dernières décennies (Garrabou *et al.*, 2009).

Avec le réchauffement climatique en cours, la question de la possible réponse du corail rouge aux changements associés à son environnement se pose. Expérimentalement, les populations les moins profondes (10 m ou moins) apparaissent plus thermotolérantes que les populations plus profondes (40 m ; Torrents *et al.*, 2008) et ceci se retrouve chez d'autres espèces de gorgones dans la même zone (Pivotto *et al.*, 2015). L'étape suivante est de comprendre, grâce aux nouveaux outils d'étude du génome (Pratlong *et al.*, 2015 ; Pratlong *et al.*, 2018), les mécanismes moléculaires à la base de cette adaptation, à savoir si ces différences de thermotolérance sont d'origine génétique ou pourraient être acquises au cours de la vie de



Figures 4a et 4b. Une colonie de *Corallium rubrum* avec ses polypes déployés et une de ses populations. (Crédits: Frédéric Zuberer.)

l'individu dans des profondeurs et donc des régimes thermiques différents, ou par une combinaison des deux processus (Haguenaer *et al.*, 2013).

De plus, le changement climatique en cours peut interagir avec l'acidité des océans (diminution du pH), pouvant théoriquement entraîner une diminution du taux de croissance de cet organisme calcifiant (Bramanti *et al.*, 2013). Par ailleurs, le corail rouge est organisé en grandes unités génétiques qui correspondent aux principales régions géographiques où il est présent; les colonies des côtes provençales pouvant être génétiquement distinguées de celles de Corse, par exemple (Aurelle *et al.*, 2011; Ledoux *et al.*, 2010; Pralong *et al.*, 2018). Cette différenciation génétique géographique souligne l'importance d'une gestion régionale, voire locale du corail rouge.

Une cyanobactérie toxique et son succès écologique

Dans les écosystèmes aquatiques continentaux dont l'eau est douce ou saumâtre, les perspectives d'une entrée massive d'eau salée dans les étangs ou d'une augmentation de leur salinité, conséquences d'un réchauffement thermique, posent la question de la réponse des espèces vis-à-vis de la salinisation des milieux et du stress halin. À ce titre, la cyanobactérie filamenteuse *Planktothrix agardhii* est capable de synthétiser, dans les étangs de Bolmon, d'Entressen et de l'Olivier – aux alentours de l'étang de Berre –, des microcystines (toxines cyanobactériennes) même hors de son milieu salin de préférence, conséquence de la capacité des cyanobactéries à s'acclimater à différentes conditions environnementales et à coloniser ainsi avec succès de nombreux milieux aquatiques méditerranéens (Vergalli *et al.*, 2016) (figures 5a et 5b). Les populations de *Planktothrix agardhii* présentent aussi une valence écologique élargie vis-à-vis de la salinité par rapport à celle des populations vivant en milieux aquatiques d'eau douce.

Quelles sont les conditions de persistance des espèces protégées?

La saladelle de Girard et son reflet dynamique des activités industrielles

Sur le littoral sableux des marais salés méditerranéens de France et d'Espagne, la saladelle de Girard *Limonium girardianum* (*Plumbaginaceae*) est une espèce pérenne, rare et endémique (figures 6a et 6b *infra*).

Ces marais salés, inclus dans les habitats prioritaires du conseil de l'Europe, Natura 2000 et CORINE, varient entre 0,5 et 2 m d'altitude et sont constitués de sédiments marins et fluviaux (sable, argile, limon) façonnés par le vent en période sèche et par l'eau en période d'inondation. La persistance des marais salés dépend d'un régime hydrique d'inondation saisonnier, couplé à une sécheresse estivale marquée et un mouvement de substrat fréquent. Cependant, depuis la dernière décennie, les marais salés côtiers ont subi



Figures 5a et 5b. Bloom de cyanobactéries *Planktothrix agardhii* sur l'étang de l'Olivier, Bouches-du-Rhône. (Crédits : Stéphanie Fayolle.)

des menaces croissantes en raison du développement des activités humaines telles que l'agriculture, le tourisme, l'urbanisation et l'industrialisation.

Ainsi, localement, l'expansion du grand port maritime de Marseille (GPMM, Fos-sur-Mer) entre 1965 et 1975 a entraîné la destruction de 7000 ha de marais salants. L'habitat favorable de *L. girardianum* correspond à un optimum intermédiaire le long d'un gradient microtopographique, quelques centimètres au-dessus du niveau maximum d'inondation hivernale (Baumberger *et al.*, 2012a), entre des habitats non favorables :

- 1) très secs en hauteur, où la performance des adultes et l'émergence des plantules sont fortement diminuées par des plantes compétitrices (Baumberger *et al.*, 2012b);
- 2) très humides en bas, où l'importance des inondations et les effets délétères de l'anoxie induisent la mortalité des adultes même si elles favorisent l'émergence des plantules (Baumberger *et al.*, 2012c).

Cette position spatiale de *L. girardianum*, relevant d'exigences écologiques très particulières, explique l'aspect « rubané » de ses populations et pourquoi cette espèce est considérée comme étant l'espèce qui décrit le mieux l'habitat naturel d'intérêt communautaire nommé « steppes salées à saladelle ».

Sur le GPMM, les aménagements de darses ont modifié la périodicité et la durée des inondations en augmentant la hauteur d'eau ce qui diminue fortement la survie des plantules et des adultes pour qui tout se joue à une échelle très fine, à 20 cm près (figures 7a et 7b *infra*).

Ainsi, des inondations fréquentes et longues, associées à de fortes salinités, réduisent fortement la viabilité des populations de saladelle. Ces perturbations anthropiques démontrent la nécessité d'une connaissance fine de son écologie et d'une gestion efficace et pérenne par le rétablissement d'un régime d'inondation favorable pour la persistance de ses populations.

Les communautés végétales et microbiennes et l'empreinte fonctionnelle des activités industrielles

En zones littorales et péri-urbaines, l'augmentation démographique, la pression foncière et les activités industrielles présentes et passées entraînent une augmentation des perturbations physiques et chimiques affectant la qualité et le fonctionnement des sols, un phénomène qui peut également interagir avec le changement global et ainsi accroître leur vulnérabilité (Metzger *et al.*, 2006). Dans un souci de préservation de cette ressource non renouvelable à l'échelle humaine, il est donc primordial d'étudier l'impact des forçages anthropiques et de l'usage des sols sur les fonctions écosystémiques assurées par les communautés microbiennes du sol (Guillamot *et al.*, 2014; Clouard *et al.*, 2014). Les territoires concernés par les activités étudiées par les Observatoires hommes-milieux (OHM) du bassin minier de Provence (OHM BMP) et littoral méditerranéen (OHM LM) ont été marqués durant



Figure 6a. La saladelle de Girard *Limonium girardianum* en fleur. (Crédits : Teddy Baumberger.)



Figure 6b. Salins du Caban à Fos-sur-Mer. (Crédits : Teddy Baumberger.)



Figure 7a. Aménagements anthropiques du grand port maritime de Marseille. (Crédits: Teddy Baumberger.)



Figure 7b. Saladelle en période d'inondation. (Crédits: Teddy Baumberger.)



Figure 8. Impact des dépôts de boues rouges sur les écosystèmes terrestres. (Crédits : Stéven Criquet.)

tout le siècle dernier par l'expansion d'activités minières et métallurgiques, encore d'actualité pour l'extraction de l'alumine qui touche les zones de Gardanne et du parc national des Calanques.

Ces activités, actuelles ou anciennes, ont causé d'importantes modifications du paysage au travers notamment des dépôts de résidus (terrils miniers et dépôts de boues rouges) qu'elles ont générés (figure 8). Ces dépôts mènent à des questionnements spécifiques quant à leur capacité à permettre la mise en place ou à inhiber des processus de pédogenèse, à co-structurer une biodiversité végétale et microbienne, et *in fine* à s'intégrer dans l'environnement. Les liens fonctionnels entre les activités microbiennes et certaines propriétés physico-chimiques des sols sont ainsi apparus fragilisés dans certains sols fortement contaminés.

Il est important de prendre également en compte les plantes et leurs interactions avec la dynamique des sols artificialisés considérés (dépôts miniers, friches sidérurgiques, activités portuaires) (voir De Bello *et al.*, 2010), d'autant plus que les processus interactifs co-structurant le couvert végétal et les communautés microbiennes édaphiques sont connus comme étant déterminants mais que les études sur ces processus restent très rares (Bardgett, Wardle, 2010).

Les phryganes et les communautés microbiennes et leur témoignage face à la littoralisation

Face à une anthropisation de plus en plus forte des milieux naturels, de nombreuses études tentent de répondre aux questions liées à l'implication des mécanismes fonctionnels dans la résilience des écosystèmes. Les «phryganes à astragales» représentent un exemple typique d'une situation littorale soumise à diverses perturbations. Cette végétation thermoxérophile méditerranéenne dominée par les coussins épineux d'*Astragalus tragacantha* (astragale de Marseille, *Fabaceae*) est caractérisée par une répartition très morcelée le long du cordon littoral péri-urbain continental et insulaire (Cahiers d'habitats Natura 2000 et 2005). Les travaux de phylogéographie supportent l'hypothèse d'une origine orientale de *A. tragacantha* qui aurait profité des phases arides et froides du Pléistocène pour atteindre son extension géographique maximale (Hardion *et al.*, 2016).

Puis, durant les phases plus chaudes, plus humides et donc plus favorables à la végétation arbustive et arborescente, l'astragale de Marseille se serait réfugié au sein d'un cordon littoral étroit limitant la compétition entre les plantes. Le phénomène de contraction d'aire initié sur le long terme par les fluctuations climatiques naturelles, l'urbanisation du milieu environnant et, dans une moindre mesure, la surfréquentation touristique et de loisirs représentent des causes importantes vis-à-vis de la destruction et de la fragmentation de ses populations.

Ainsi, la persistance de ses populations est actuellement compromise, ce qui se traduit par une forte régression démographique du fait :

- d'une quasi-absence de recrutement au travers des graines ;
- d'un succès reproducteur modéré ;
- d'un accroissement des nécroses individuelles ;
- d'une forte mortalité des individus adultes estimés à 38-42 ans (figures 9a, 9b et 9c) aboutissant à quelque 4900 individus (\approx 1920 individus sur les îles de Marseille et \approx 2980 individus sur le continent Bouches-du-Rhône et Var) dont 90 % de ces effectifs se développent dans le parc national des Calanques.

Les nécroses et la mortalité des individus sont fortement liées à l'action des embruns salés et pollués (pollutions organiques de type hydrocarbures et tensioactifs rejetés par le trafic maritime, les industries pétrolières et par les eaux usées). La caractérisation des contaminations en métaux et métalloïdes et de leurs flux dans les compartiments sol-eau-biocénose a mis en évidence une dispersion de ces contaminants large et éparse dans tout le massif des Calanques jusque sur la partie littorale du massif de Marseilleveyre. Par ailleurs, la compétition générée par des plantes de la garrigue littorale (par exemple, *Brachypodium retusum* et *Pistacia lentiscus*) ou par la plante invasive griffe de sorcière (*Carpobrotus sp.*) réduit le développement des individus d'astragale.

Cependant, *A. tragacantha* présente aussi la capacité remarquable de se maintenir sur des sols contaminés aux éléments traces métalliques et métalloïdes (ETMM)



Figures 9a, 9b et 9c. Floraison, nécrose et mortalité d'*Astragalus tragacantha*. (Crédits : Pierre Jean Dumas.)

Encadré 9 - Parc national des Calanques

Sa carte d'identité

L'établissement public du parc national des Calanques, sous la tutelle du ministère de la Transition écologique et solidaire, est un outil de protection de l'environnement d'excellence au niveau français et reconnu au niveau international pour la qualité exceptionnelle de ses patrimoines naturels, paysagers et culturels.

Créé le 18 avril 2012, le parc national des Calanques est le premier parc national péri-urbain d'Europe à la fois terrestre et marin. Ce parc national méditerranéen est situé dans la Provence littorale, constitué de falaises calcaires et de poudingue, de criques et d'îlots qui offrent autant d'écosystèmes pour de nombreuses espèces. Le cœur du parc national s'étend sur les communes de Marseille, Cassis et La Ciotat. Sa proximité immédiate avec la deuxième ville de France incluse au sein de la métropole Aix-Marseille Provence est une caractéristique marquante de ce territoire.

Ses missions

Les principales missions du parc national des Calanques sont de concilier la préservation des patrimoines naturels et culturels avec les activités humaines; contribuer à la connaissance pour répondre aux grands enjeux méditerranéens; accueillir les publics et transmettre la connaissance; contrôler les activités et faire respecter la réglementation; et enfin concourir au développement durable et au rayonnement du territoire.

La biodiversité terrestre connue en cœur de parc compte 26 habitats élémentaires d'intérêt communautaires reconnus par l'Europe, plus de 1 600 espèces végétales et 1 900 espèces animales. 72 espèces végétales bénéficient d'une protection nationale ou régionale et 26 sont reconnues à très fort enjeu de conservation à l'échelle régionale; 267 espèces animales bénéficient d'une protection nationale. La biodiversité marine connue compte 60 espèces patrimoniales et 14 habitats élémentaires d'intérêt communautaire.

Concrétisation d'un des engagements forts du Grenelle de l'Environnement, le parc national des Calanques est aussi le premier à avoir été entièrement conçu selon les dispositions de la loi du 14 avril 2006, qui a profondément réformé les modalités de création et de gestion des parcs nationaux français. Le parc national des Calanques est alors un véritable projet de territoire partagé, matérialisé par sa charte qui précise le caractère du parc, la réglementation et détaille les objectifs à atteindre à l'horizon de quinze ans. L'équipe du parc l'anime et la met en œuvre avec les collectivités, en associant les acteurs du territoire: habitants, professionnels, usagers, associations, etc.

Sa stratégie scientifique

La stratégie scientifique du parc national des Calanques est, pour la période 2017-2021, un document de cadrage, d'orientation, sur les principaux enjeux de connaissances dont découlera un plan opérationnel en lien avec les autres stratégies de l'établissement. La stratégie scientifique guide ainsi le parc dans la manière de questionner le territoire à l'intérieur et au-delà de ses limites, et donne le ton sur la manière de cheminer en s'appuyant sur une connaissance à caractère interdisciplinaire intégrant les dimensions de progrès social, technique et éthique. Les éclairages scientifiques devraient ainsi appuyer, nourrir, enrichir le parc pour asseoir sa légitimité, y compris dans les processus de réglementation.

La stratégie scientifique se fonde sur une approche systémique des fonctionnalités de la biodiversité et considère autant les processus d'interdépendances écologiques que socio-écologiques et sociopolitiques afin de comprendre et gérer durablement son territoire et son patrimoine.

Un des enjeux de la stratégie scientifique est de faire de l'espace du parc un site atelier pour les nombreux observatoires déjà existants (OSU Institut Pythéas, OHM, OQSM, OET, etc.) afin que le parc soit reconnu comme un site d'observation de référence sur les enjeux de solidarité écologique et des changements socio-environnementaux. Cette dynamique de convergence de ces observatoires aidera à penser en amont les projets en interdépendance et ouvrira vers plus de cohérence pour aborder les enjeux spécifiques. Avec le temps, une mobilisation facilitée des équipes de recherche et des fonds financiers est visée.

tels que plomb et arsenic (Laffont-Schwob *et al.*, 2011 ; Salducci *et al.*, 2019). La tolérance d'*A. tragacantha* aux ETMM reposerait sur la présence d'une double symbiose racinaire avec des espèces fongiques microscopiques (champignons mycorrhiziens) et des bactéries (Laffont-Schwob *et al.*, 2011). Cette double symbiose permet d'envisager l'utilisation d'*A. tragacantha* et des micro-organismes naturellement associés à ses racines pour séquestrer les contaminants au niveau du système racinaire (phytostabilisation). *Astragalus tragacantha* est ainsi devenue une espèce emblématique tant par son importance dans le fonctionnement de cet écosystème littoral que par les « services » de gestion de la pollution des sols qu'elle est susceptible de fournir. Des opérations de renforcement des populations d'*A. tragacantha* sont donc identifiées comme prioritaires au regard des objectifs de protection des patrimoines (OPP) du parc national des Calanques (encadré 9).

Dans la capacité d'un écosystème à répondre à une perturbation ou à la récurrence d'un stress, la diversité des communautés microbiennes peut contribuer à la pérennisation des fonctions essentielles qu'elles soutiennent,

comme le recyclage de la matière organique. Certaines pollutions organiques (hydrocarbures aromatiques polycycliques, HAP) et inorganiques (ETMM) modifieraient plus fortement les diversités bactériennes comparativement à celles des communautés fongiques. Il semblerait que ces communautés microbiennes littorales présentent une capacité adaptative importante puisqu'en apparence le « service écosystémique » de recyclage de la matière organique des sols n'est pas affecté par les différents niveaux de pollution. Cette résilience des fonctions microbiennes des sols aurait pour origine une modification profonde de la structure des communautés qui, de sensibles aux métaux seraient devenues résistantes par diverses stratégies adaptatives incluant la possibilité de modifier la spéciation de certains métaux présents dans les sols, à l'instar de l'arsenic.

Par ailleurs, la sécheresse estivale, la pauvreté des sols ou les stress osmotiques additionnels représentent des contraintes drastiques pour les communautés microbiennes (Farnet Da Silva *et al.*, 2016). Ainsi, l'effet d'un gradient de stress hydrique et halin et l'existence d'une « co-évolution » des micro-organismes des litières et des phyllosphères de *Pistacia lentiscus* sont déterminants via une approche multiscalaire. À l'échelle microlocale, l'âge des feuilles induit des différences physico-chimiques de la biomasse végétale et constitue le facteur structurant majeur des communautés microbiennes. À l'échelle régionale, l'empreinte littorale structure différemment les diversités fonctionnelles des communautés microbiennes des litières et des feuilles phyllosphériques plus âgées. Au final, la phylogéographie d'*A. tragacantha* et de ses espèces proches offre la perspective d'une étude comparative à l'échelle du bassin méditerranéen occidental des processus écologiques, dont microbiens, impliqués dans la régénération démographique sur des substrats différents, soumis ou non aux contraintes du littoral et avec des impacts différents des polluants.

L'urbanisation et ses introductions d'espèces

La ville est le lieu privilégié d'introduction d'espèces exotiques (Hobbs *et al.*, 2006), il peut s'agir d'espèces végétales ornementales ou animales. Ces espèces peuvent être diffusées intentionnellement ou non par l'homme. Les perturbations récurrentes de ces milieux ainsi que leur capacité à fournir des ressources alimentaires ou des habitats semblent favoriser l'établissement de ces espèces exotiques en ville (Chace, Walsh, 2006).

La perruche à collier *Psittacula krameri* (figure 10) est une espèce exotique originaire d'Afrique et d'Asie introduite dans plus de 35 pays autour du globe, où elle est devenue envahissante dans certains cas. Ravageur de culture dans sa zone d'origine, son impact dans les zones d'introduction n'a jusqu'à aujourd'hui fait l'objet que de peu d'études. Les populations sont établies depuis les années 1970 dans la plupart des villes d'Europe. Elles ont notamment colonisé la région parisienne et plus récemment Marseille. Introduite en 1996 à Marseille, la population compte en 2016 plus de 1 800 individus. Les travaux



Figure 10. Perruche à collier *Psittacula krameri*. (Crédits : Marine Le Louarn.)

conduits en collaboration avec le Muséum national d'histoire naturelle ont pour but de caractériser la niche écologique des populations établies sur Marseille et l'Île-de-France afin d'estimer la future distribution spatiale de l'espèce. La proximité au lieu d'introduction, la disponibilité en ressources alimentaires et en cavités de nidification conditionnent la sélection des habitats. Par ailleurs, à Marseille, un autre facteur déterminant semble être la proximité de choucas, autre espèce d'oiseau (Le Louarn, 2014; Le Louarn *et al.*, 2017a et 2017b). Ces résultats laissent présager une colonisation de la plupart des parcs publics.

Ces oiseaux, immédiatement appropriés par le public, ne sont pas perçus comme une menace contrairement à une autre espèce invasive, le moustique tigre, *Aedes albopictus* (figure 11 *infra*) susceptible actuellement de constituer un problème de santé publique. Ce vecteur de la dengue et du chikungunya, accidentellement introduit en métropole au début des années 2000, voit son aire de répartition augmenter, du fait de facteurs anthropiques directs (transports, urbanisation) et indirects (changement climatique). Les travaux interdisciplinaires montrent une augmentation de sa présence dans les espaces urbains et une influence des modes d'aménagement et de gestion des milieux colonisés (parcs publics, jardins privés, etc.). Les stratégies de gestion de cette prolifération se caractérisent par une tension idéologique, symbolique, politique et juridique entre préoccupations environnementales et sanitaires (Claeys, Mieulet, 2013; Claeys *et al.*, 2019).

Les rivières : introductions de poissons et associations de parasites

Les rivières méditerranéennes sont l'objet d'introductions volontaires ou involontaires d'espèces animales dont l'origine est fréquemment humaine (Ribeiro, 2012). Ces déplacements d'organismes méritent une attention particulière dans les actions de conservation de la biodiversité locale et de ses relations avec l'écosystème aquatique. Les répercussions de ces déplacements d'animaux peuvent être lourdes de conséquences sur la biologie et l'écologie des espèces subissant ces nouveaux arrivants (Gherardi, 2010). Les gestionnaires des milieux aquatiques pratiquent en particulier des déversements et des déplacements de poissons et tentent ainsi de maintenir des communautés piscicoles variées face à des contextes de plus en plus dégradés des rivières méditerranéennes (pollution, température en hausse, oxygénation de l'eau en baisse, assèchement estivaux augmentant en fréquence et en ampleur, etc.). Sans remettre en cause l'intérêt de ces volontés bienveillantes à l'égard de la biodiversité aquatique – et des besoins halieutiques –, elles semblent peu encadrées scientifiquement et leurs effets directs et indirects sur la faune et la flore indigènes sont donc sous-évalués (Paterson *et al.*, 2011).

Plusieurs centaines de kilogrammes de poissons issus d'autres rivières (truites arc-en-ciel, truites Fario, chevesnes et gardons) sont régulièrement déversés dans les rivières de Provence. Ces poissons hébergent souvent un nombre important de parasites acanthocéphales intestinaux tels que *Pomphorhynchus laevis*. Ces parasites vont alors se répandre dans l'écosystème receveur et pourront entrer en compétition avec les souches locales, si leur poisson hôte n'a pas été pêché à temps par les pêcheurs. Ces vers parasites occasionnent peu de dommages aux populations de poissons dans leurs écosystèmes d'origines ; ils doivent y être considérés comme des forces évolutives favorisant la biodiversité et maintenant la vigueur des populations (Vidal-Martinez *et al.*, 2009). Peu de choses sont en revanche connues sur leurs effets dans les écosystèmes receveurs et l'homogénéisation biotique qui en découle risque de ne plus permettre d'estimer efficacement les interactions entre hôtes et parasites, mais aussi entre proies et prédateurs (Paterson *et al.*, 2011).

Les faunes parasitaires des poissons communs des rivières méditerranéennes tendent donc à s'homogénéiser et ne plus révéler la biodiversité fonctionnelle des relations hôtes-parasites. Ainsi, il apparaît important de quantifier les apports de poissons introduits et leurs cortèges parasitaires associés, de caractériser les capacités de transmissions de ces parasites dans leur nouvel environnement, d'estimer le risque que représentent ces parasites pour l'écosystème receveur et de reconsidérer les mesures de diversité piscicole des cours d'eau et les décisions de gestion qui en découlent, au vu d'une potentielle homogénéisation biotique. De plus, des études comportementales des hôtes intermédiaires des acanthocéphales, les amphipodes du genre *Gammarus*, devront tester les facteurs environnementaux clés de la transmission de ces parasites.



Figure 11. Moustique tigre *Aedes albopictus*. (Crédits : Magali Deschamps-Cottin.)

L'uniformisation des paysages et l'artificialisation des habitats qui résultent des aménagements urbains se traduisent potentiellement par une érosion accélérée des biodiversités locales. Les pertes locales de richesse végétale et la banalisation de la flore sont susceptibles d'engendrer des processus d'appauvrissement de la diversité microbienne et faunistique régionale. Cette raréfaction conduirait à une réduction du nombre d'espèces susceptibles d'assurer la pérennité des fonctions écologiques supportées par ces biodiversités. Il apparaît urgent de préciser et de hiérarchiser l'influence de différents facteurs environnementaux, de l'échelle locale à une approche plus globale, sur la vulnérabilité des écosystèmes urbains face à l'intensification et à l'étalement de l'urbanisation et aux changements accélérés bioclimatiques.

L'urbanisation et ses continuités écologiques

L'amélioration de la connectivité entre les habitats fragmentés est essentielle à une meilleure viabilité des populations, à la persistance régionale des espèces et à la fonctionnalité des écosystèmes (Burel, Baudry, 1999; Kindlmann, Burel, 2008; Krosby *et al.*, 2010). L'étude des continuités écologiques oriente donc les priorités des réseaux nationaux et régionaux de « trames vertes et bleues » (TVB) dans la préservation, la gestion ou la restauration des habitats.

De nombreux outils de modélisation (Saura, Rubio, 2010; Galpern *et al.*, 2011) permettent aujourd'hui à la fois de mieux quantifier la perméabilité des paysages aux déplacements des espèces et d'identifier les secteurs clés assurant la connectivité écologique, et aident les gestionnaires et les aménageurs du territoire à mieux prendre à compte la problématique de fragmentation et d'anthropisation des habitats sur la biodiversité.

La région Provence-Alpes-Côte d'Azur est déjà soumise à de très fortes pressions anthropiques et il est attendu une poursuite de l'intensification de l'usage des sols ainsi que de fortes conséquences du changement climatique, par exemple sur les forêts. Il sera donc nécessaire de mieux intégrer ces éléments en tenant compte de différents scénarios possibles afin de répondre aux interrogations des gestionnaires (d'espaces naturels, d'infrastructures de transport, etc.) et de mieux impliquer les acteurs du territoire à même de favoriser la connectivité écologique du paysage par une modification de leurs pratiques (Clergeau, Blanc, 2013).

La connectivité paysagère correspond au degré avec lequel le paysage facilite ou empêche les mouvements des individus entre des patches de ressources. Selon les espèces, un même élément du paysage pourra être matrice, tache d'habitat ou corridor. Un paysage urbain soumis à une forte fragmentation voit les grandes taches d'habitat qui le constituent régresser et s'éloigner les unes des autres, réduisant la connectivité structurale (relations physiques entre les différents compartiments du paysage) et fonctionnelle (degré de mouvement ou de flux des individus au sein du paysage). Ce phénomène impacte différemment les espèces, notamment selon leur vagilité. Plusieurs modèles ont ainsi été étudiés : les communautés de rhopalocères et une espèce végétale typiquement urbaine, *Parietaria judaica* (figure 12) (Lizée *et al.*, 2012; Bossu, 2015).

Les rhopalocères, ou papillons de jour, sont de bons indicateurs des changements rapides des milieux. Du fait d'exigences écologiques précises et d'une grande rapidité de réponse aux changements de l'environnement (liée à un cycle de développement court), la présence ou l'absence d'une espèce permet d'évaluer la qualité d'un habitat, mais aussi la qualité d'une mosaïque d'habitats. Les études ont montré une diminution de la richesse spécifique et de l'abondance des individus corrélée à l'augmentation de la densité du bâti (encadré 10 *infra*). Cette perte de diversité se traduit par une diminution du nombre d'espèces et l'apparition de *Cacyreus marshalli* (figure 13), une espèce de papillon originaire du sud de l'Afrique introduite à la fin du xx^e siècle en Europe et qui parasite les plantes horticoles.

À la suite de cette homogénéisation biotique, on observe également une homogénéisation fonctionnelle. En effet, on assiste à une simplification de la composition fonctionnelle, caractérisée notamment par la perte des espèces typiquement méditerranéennes (Lizée *et al.*, 2011). Concernant leur dispersion, paradoxalement, la configuration du bâti explique mieux les variations de richesse et d'abondance des assemblages que la configuration du vert.



Figure 12. Pariétaire de Judée *Parietaria judaica*. (Crédits : Angèle Bossu.)

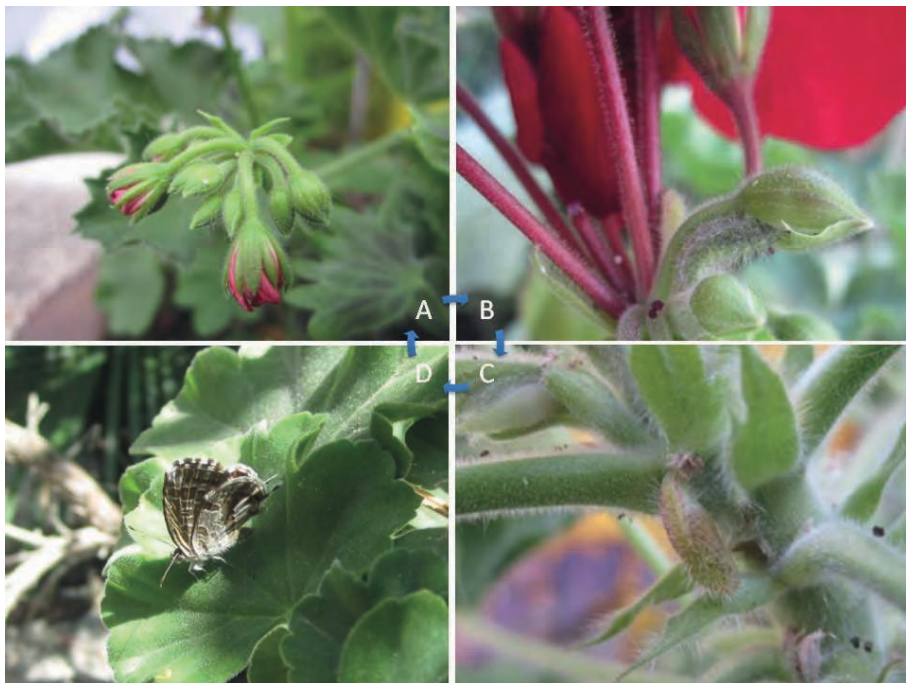


Figure 13. Papillon de jour *Cacyreus marshalli* à différents stades de développement : a) œuf, b) chenille, c) chrysalide, d) imago et plante horticole. (Crédits : Magali Deschamps-Cottin.)

Encadré 10 - Le Parc urbain des papillons : dispositif collaboratif de recherche, formation et sensibilisation à la biodiversité urbaine

Les recherches sur les communautés de rhopalocères en milieu urbain ont montré une diminution du nombre d'espèces et d'individus de la périphérie vers le centre-ville. Elles ont également démontré la sélectivité des espèces en fonction de certains traits biologiques. Afin de suivre sur le long terme et de comprendre l'évolution de cette biodiversité urbaine, le Laboratoire population environnement développement (LPED, Aix-Marseille Université) a mis en place, en 2012, un dispositif expérimental de recherche: le Parc urbain des papillons (PUP) (figure 14 et annexe 2). Sur une ancienne parcelle agricole, une zone d'attraction pour les papillons a été aménagée. Destinée à mieux comprendre l'influence de la structure de l'urbain et des pratiques de gestion des espaces verts, le PUP vise à voir si de nouvelles espèces peuvent se réinstaller en ville si l'on modifie les pratiques, ou si au contraire le filtre de l'urbain est trop fort et empêche la pénétration et la dispersion des papillons.

Cet aménagement a été réalisé sur un terrain mis à disposition par la ville (14^e, Marseille) avec le soutien financier de GrDF (Gaz réseau distribution France, pour la création du dispositif en 2012 et les suivis scientifiques depuis 2010) et en collaboration avec le collectif d'artistes SAFI (pour la conception et la réalisation des éléments d'aménagement, panneaux, plaquette de présentation et livret pédagogique); le lycée agricole des Calanques (pour les plantations et l'aménagement) et l'association Proserpine (pour la sélection des espèces végétales). L'initiative est innovante car, outre l'outil expérimental de recherche unique en milieu urbain, le PUP se veut également un lieu de formation, de médiation et d'échanges à destination de tous les publics (gestionnaires, étudiants, scolaires et grand public). Ainsi, un parcours pédagogique a été pensé et aménagé afin de constituer un support à la médiation scientifique sur l'étude de la biodiversité urbaine, de la démarche scientifique et de l'approche expérimentale menée.

L'analyse paysagère menée autour de Marseille met en avant deux facteurs: l'isolement de ces parcs vis-à-vis des massifs calcaires périphériques (envisagés comme réservoirs de populations) et la forme du bâti. Ce résultat suggère que plus les parcs sont isolés par rapport aux zones périphériques sources de populations et/ou plus la composante bâtie entourant les parcs est agrégée en ensembles de forme complexe, plus la richesse spécifique décroît. Ceci souligne l'importance de deux processus différents:



Figure 14. Parc urbain des papillons. (Crédits : Estelle Pierson.)

- l’immigration vers l’urbain depuis les zones sources extérieures à la ville ;
- l’existence d’une dispersion de ces individus entre taches d’habitat à l’intérieur de la matrice urbaine.

De plus, l’effet prépondérant de la composante bâtie par rapport à la composante végétale sur la richesse et l’abondance des assemblages révèle que, même pour les espèces capables d’immigrer en milieu urbain et d’exploiter les parcs de centre-ville, les opportunités de dispersion entre habitats restent un facteur limitant majeur (Lizée *et al.*, 2015). Ce résultat suggère ainsi l’importance d’intégrer la composante humaine (en particulier les pratiques de gestion), via une meilleure compréhension du rôle de la matrice, dans l’étude du fonctionnement de la biodiversité urbaine.

En milieu urbain, les bâtiments peuvent effectivement représenter des barrières à la dispersion et influencer la connectivité. Nous avons évalué la structure génétique d’une espèce végétale : la pariétaire de Judée (*Parietaria judaica*). Cette espèce anémophile est très fréquente en milieu urbain. L’étude menée sur Marseille a été réalisée le long d’un gradient d’urbanisation. Aucune structuration génétique n’a été mise en évidence suggérant que la diffusion de cette espèce n’est pas impactée par le bâti. L’étude a aussi été réalisée à une échelle plus large où, à Marseille, se sont ajoutées deux autres communes de petite et moyenne taille, Aix-en-Provence et Lauris. À cette échelle régionale, la structure génétique observée indique une faible connectivité entre la population de Marseille et les deux autres communes.

Conservation et restauration sont-elles toujours des solutions?

Selon l'IUCN³, le taux d'extinction des espèces sauvages s'est fortement accéléré depuis plusieurs décennies. La conservation de la biodiversité est ainsi devenue très importante à l'échelle mondiale. Le succès de conservation d'une espèce est très complexe (Godefroid *et al.*, 2011) et s'avère plus important lorsque la conservation est réalisée au sein d'une aire protégée, associée à un effort de gestion. La restauration des habitats est une méthode efficace pour la conservation des espèces en danger (Menges, 2008). La restauration écologique vise à assister la régénération des écosystèmes dégradés ou détruits, pour accélérer leur résilience et rétablir l'intégrité biotique préexistante. Elle doit être largement développée pour permettre une gestion durable des paysages (Razzaque, Visseren-Hamakers, 2019). Un projet de restauration écologique doit définir préalablement un écosystème de référence, dont les propriétés biotiques et abiotiques sont jugées satisfaisantes car garantissant la pérennité des services écosystémiques et permettant de fixer les objectifs de la restauration.

L'amendement organique et son avantage sur les écosystèmes incendiés

Sur le plateau du Grand Arbois à Aix-en-Provence, les écosystèmes fréquemment incendiés pourraient être restaurés par l'augmentation du niveau de ressources après incendie sur la base d'amendements de composts remplaçant la matière organique détruite. L'amendement organique permettrait de réamorcer plus rapidement la régénération de la végétation et le cycle de la matière organique. En France, même si 60 % des boues de stations d'épuration provenant du traitement d'eaux usées urbaines sont épandues en agriculture, 20 à 25 % sont toujours mises en décharge et 15 à 20 % sont incinérées (Courtois, 2000). Des expérimentations par épandage d'un compost constitué de ces boues ont été conduites dans deux écosystèmes: un écosystème de garrigue sept ans après le dernier incendie, et un écosystème après sept mois de régénération post-incendie. Dans les deux écosystèmes, ces amendements ont induit une augmentation plus ou moins importante de la teneur en macronutriments (phosphore, potassium, magnésium) dans le sol sans modification des fonctions microbiennes, mais avec une diminution de la biomasse fongique à la plus forte dose de compost. L'effet de l'amendement sur la fertilité du sol s'est avéré globalement plus rapide et durable lorsque l'amendement a été effectué dans l'écosystème jeune que dans l'écosystème plus âgé.

Parallèlement à ces effets sur le sol, la nutrition des espèces végétales dominantes est améliorée ainsi que la croissance, plus ou moins durablement selon les espèces et pour les deux écosystèmes. L'espèce herbacée dominante de ces écosystèmes, *Brachypodium retusum*, manifeste une réponse nutritionnelle

3 <http://www.iucnredlist.org>.

rapide et durable, couplée à une augmentation de la production de biomasse. L'amendement peut ainsi favoriser après incendie la reconstitution rapide d'une couverture végétale herbacée qui a un effet protecteur sur le sol et qui l'enrichit en matière organique. En revanche, la richesse en nutriments des végétaux n'a pas d'influence (directe) sur la production en métabolites de défense indispensable dans la lutte contre les stress environnementaux, à savoir des hydrocarbures très légers émis par les végétaux connus sous le terme de composés organiques volatils (COV). C'est donc uniquement via l'augmentation de la croissance du végétal que le compost favorise indirectement la libération de ces métabolites. De ce fait, après application de compost, l'émission de COV augmente entre 5 % – pour des garrigues de *Quercus coccifera* – et 14 % pour des garrigues de *Cistus albidus* et *Rosmarinus officinalis*. Cet impact n'est pas sans conséquences environnementales. En effet, l'ensemble des COV étant étroitement lié à la formation d'ozone troposphérique et de certains aérosols, l'application de compost aurait probablement des conséquences environnementales en termes de qualité de l'air.

De plus, la végétation ne serait probablement pas en mesure de compenser le stress oxydatif causé par cette pollution de l'air potentielle, étant donné que l'émission de COV par unité de biomasse ou de surface de végétal reste inchangée. Or, ces métabolites présentent des propriétés antioxydantes, permettant de neutraliser le stress oxydatif. En conclusion, il existe un effet positif global de l'amendement sur la fertilité du sol, la nutrition des végétaux dominants par rapport aux surfaces non amendées, mais les réponses des espèces arbustives sont variables en fonction de leurs traits écologiques (traits foliaires, reproducteurs). Cependant, pour assurer la pérennité de cette voie de valorisation des déchets organiques et garantir le succès des opérations de restauration d'écosystèmes incendiés, il est fondamental d'identifier les conditions optimales de mise en œuvre (dose) et de s'assurer de leur innocuité. Il apparaît d'après les résultats des études que la dose intermédiaire (50 t/ha) paraît suffisante pour améliorer l'état de l'écosystème sans risquer de contaminer le sol et les eaux souterraines par l'excès de phosphore ou de métaux lourds, toxiques pour les micro-organismes.

De ce point de vue, la nature chimique du substrat et la texture du sol sont des caractéristiques à prendre en compte ; les sols calcaires à texture fine ayant globalement des capacités d'adsorption élevées, ils sont moins sujets au lessivage d'éléments dissous que les sols acides à texture plus grossière. Pour la prédiction des effets de l'amendement à court terme, la composition en espèces arbustives de l'écosystème avant l'incendie est un critère à prendre en compte, de même que le stade de régénération (âge) de l'écosystème. Cependant, il est important de quantifier les incidences à long terme de cette méthode de restauration et de tester l'hypothèse selon laquelle les qualités chimiques et microbiologiques des composts doivent être adaptées à l'état de dégradation des sols et donc définies en fonction de la récurrence des incendies.

La steppe de la plaine de Crau et son sauvetage, entre zones industrielles et agricoles intensives

La plaine de Crau est constituée de terrasses alluviales correspondant au paléodelta de la Durance. Entre Alpilles, Camargue, étang de Berre et golfe de Fos, une végétation de type steppique, les coussouls (figure 15), y occupait entre 50 000 et 55 000 ha avant la mise en place des premières prairies irriguées (foin de Crau) après la construction du canal de Craponne entre Salon-de-Provence et Arles au xvi^e siècle.

Ce paysage unique est issu non seulement de l'interaction entre un climat méditerranéen et un sol pauvre et peu profond, mais également de la pratique du pastoralisme attestée depuis la fin du Néolithique. Les formations végétales de la plaine de Crau sont ainsi considérées comme la seule steppe d'Europe occidentale, localement appelées « coussouls ». Elles abritent une richesse spécifique de 150 espèces végétales, la plus forte de Basse-Provence, qui sert d'habitat pour deux espèces endémiques d'insectes (criquet rhodanien, bupreste de Crau) et qui abrite les plus grandes populations françaises d'oiseaux steppiques (ganga, outarde canepetière) et de lézards (lézard ocellé). Cet écosystème de référence culturelle pour le pastoralisme méditerranéen est actuellement menacé (80 % détruits, les 20 % restants très fragmentés) à la suite du développement de certaines formes d'agriculture intensive (arboriculture fruitière et cultures maraîchères) et à l'extension de zones industrielles (grand port maritime de Marseille [GPM], plates-formes logistiques), militaires (aéroport, zones de stockage de munitions) et urbaines (lotissements). Réduit à 10 000 ha structurés en quinze morceaux à la fin du xx^e siècle, les mesures de préservation de cet écosystème (zone d'importance communautaire pour les oiseaux, Natura 2000, réserve naturelle nationale) et de conservation (soutien à la filière ovine extensive) n'ont cependant pas permis d'enrayer définitivement la destruction et la fragmentation de cet habitat (Buisson, Dutoit, 2006).

En conséquence, des opérations de restauration écologique (semis d'espèces nurses, transfert de foin, étrépage de sol, transfert de sol), à petites et grandes échelles, ont été mises en place dès 2001 pour reconstituer les trajectoires de végétation vers l'écosystème de référence qui préexistait avant sa destruction (Coiffait-Gombault *et al.*, 2010, 2011, 2012; Dutoit *et al.*, 2011; Jaunatre *et al.*, 2014). Le transfert de foin (figure 16), qui a consisté à aspirer des graines et autres fragments de plantes sur des sites où la communauté végétale est intacte et à épandre ce matériel sur des zones à restaurer, n'a permis la réintroduction que de quelques espèces cibles, telles que *Convolvulus cantabrica*, *Plantago lagopus* ou *Sherardia arvensis*, dans des proportions très inférieures à leur présence précédente dans les coussouls.

Le transfert de sol (figure 16), qui a consisté à prélever le sol sur des sites où la communauté végétale est intacte et à l'épandre sur des zones à restaurer, a donné de bien meilleurs résultats avec près de la moitié de la composition et de la structure du coussouls restaurée. Cependant, cette technique engendre



Figure 15. Coussouls de Crau. (Crédits : Daniel Pavon.)



Figure 16. Techniques de restauration des coussouls de Crau, le transfert du foin en haut (à gauche, la récolte du foin de coussouls intact et à droite, son épandage sur un site à restaurer) et le transfert de sol en bas (à gauche, la récolte du sol de coussouls intact voué à être détruit et à droite, son épandage sur un site à restaurer). (Crédits : Renaud Jaunatre.)

la destruction du site donneur. L'étrépage de sol, c'est-à-dire le retrait de la couche superficielle du sol, a permis de réduire considérablement le recouvrement des espèces non cibles (par exemple, *Chenopodium album*), d'obtenir une structure de végétation un peu plus similaire à celle des coussouls (hauteur et recouvrement de la végétation) et l'installation de quelques espèces cibles telles que *Veronica arvensis*, *Crepis sancta* ou *Trifolium scabrum*. Bien que certaines combinaisons de techniques permettent d'améliorer les résultats, ceux-ci restent encore très modestes et les communautés végétales créées très différentes des coussouls. Les caractéristiques qui font que les espèces sont ou ne sont pas de bonnes espèces colonisatrices (rôle de la dispersion et de la propagation clonale) sont mal connues. En effet, lors des tentatives de restauration de la végétation, la réinstallation de *Brachypodium retusum*, espèce dominante dans les coussouls, a été extrêmement faible. Contrairement à la majorité des autres espèces végétales des coussouls, *B. retusum* est une espèce vivace qui montre une faible installation à partir des graines. Il est donc primordial d'étudier les conditions environnementales qui peuvent faciliter la germination et la survie des plantules (humidité, nutriments, pâturage, feu, etc.). Ainsi, ces opérations de restauration ne permettent pas de restaurer à moyen terme l'intégrité de la communauté végétale des coussouls.

Les recherches devront donc s'orienter vers de nouvelles directions intégrant :

- 1) le changement de paradigme en matière de restauration écologique par une évaluation des potentialités futures des écosystèmes aujourd'hui dégradés encore appelés « nouveaux écosystèmes » (Seastedt *et al.*, 2008) en lieu et place d'un écosystème cible de référence ;
- 2) le changement des échelles d'intervention en privilégiant la restauration des connexions au niveau du paysage ;
- 3) l'utilisation des capacités du vivant (ingénieurs des écosystèmes) en remplacement des interventions lourdes de génie civil ;
- 4) l'identification des bio-indicateurs précoces (espèces sentinelles) de la réussite des opérations de restauration afin de limiter les suivis sur le très long terme.

Ces recherches ne peuvent cependant s'envisager sans une approche intégrée et interdisciplinaire des différentes opérations de restauration étudiées dont certaines, devraient servir à terme, de « démonstrateur » via la constitution de sites ateliers ou d'observatoires. Si ces recherches ne peuvent s'affranchir d'une nécessaire modélisation à grande échelle des conséquences des scénarios de changements globaux (climatiques et d'usages) et des priorités d'intervention qui en découlent à l'échelle du bassin méditerranéen, elles nécessitent également d'intégrer les différents acteurs socio-économiques et les compétences en sciences de l'ingénieur afin de rendre leurs résultats opérationnels (Jaunatre *et al.*, 2011 ; Dutoit *et al.*, 2013a, 2013b et 2013c).

En résumé

- La métropole Aix-Marseille Provence n'est plus entourée par une ceinture agricole péri-urbaine, mais par des massifs calcaires qui placent les espaces naturels aux portes de la ville.
- Les sols hébergent une biodiversité invisible, mais spectaculaire par le nombre de taxons de chaque règne du vivant, par ses valeurs écologiques, économiques et aménitaires, et finalement par sa vulnérabilité. Les sols méditerranéens sont particulièrement vulnérables et naturellement enclins à la dégradation car souvent peu épais, à faible couvert végétal, soumis à des alternances de périodes de sécheresse et de fortes précipitations, avec des conditions topographiques favorisant leur érosion, et parmi les plus anthropisés de la planète et déjà très dégradés.
- Cependant, les sols calcaires à texture fine – comme dans la région de Marseille – ont globalement des capacités d'adsorption élevées et sont moins sujets au lessivage d'éléments dissous que les sols acides à texture plus grossière.
- Durant tout le siècle dernier, les activités minières et sidérurgiques, encore d'actualité pour l'extraction de l'alumine qui touche les zones de Gardanne et du parc national des Calanques, ont causé d'importantes modifications du paysage au travers notamment des dépôts de résidus (terrils miniers et dépôts de boues rouges).
- La caractérisation des pollutions et des flux de contaminants dans les compartiments sol-eau-biocénose a mis en évidence une dispersion large et éparse des polluants dans tout le massif des Calanques jusque sur la partie littorale du massif de Marseilleveyre.
- La végétation méditerranéenne est adaptée et globalement résiliente au feu, mais la récurrence de ces feux influe fortement sur la dynamique forestière et sa régénération. L'érosion et le brûlage appauvrissent progressivement le sol en matière organique dans les sites fréquemment incendiés du massif de l'Étoile et du plateau du Grand Arbois.
- Dans l'environnement périmarseillais, les espèces animales et végétales font l'originalité et la valeur des écosystèmes méditerranéens :
 - flore native très diversifiée dont certaines plantes patrimoniales protégées : sabline et ophrys de Provence, germandrée faux petit-pin, saladelle de Girard ou phryganes littorales à astragale de Marseille ;
 - faune native remarquable dont certains animaux emblématiques : lézard ocellé (le plus grand lézard d'Europe), magicienne dentelée (le plus grand insecte d'Europe), corail rouge de Méditerranée, ou carabe et chrysomèle des archipels insulaires du Frioul et de Riou ;

- écosystème de la plaine de Crau (frontalière de la métropole Aix-Marseille Provence), seule steppe d'Europe occidentale, localement appelée « coussouls » : cet écosystème de référence culturelle pour le pastoralisme méditerranéen est actuellement menacé (80 % détruits, 20 % fragmentés) par l'agriculture fruitière et maraîchère intensive et par l'extension de zones portuaires, militaires et urbaines.
- Quant à Marseille, la biodiversité intra-urbaine est composée d'espèces ordinaires (communes) et d'espèces exotiques (introduites) dont certaines deviennent invasives, résultant de perturbations hétérogènes sous l'influence d'une densification importante des espaces urbains. Parmi les espèces ordinaires, les papillons de jour rhopalocères, bons indicateurs des changements rapides des milieux, régressent avec l'augmentation de la densité du bâti. Parmi les espèces invasives :
 - les espèces végétales telles qu'agave, griffe de sorcière et figuier de Barbarie concurrencent fortement les plantes locales ;
 - la population de perruches à collier, introduite en 1996 à Marseille, compte en 2016 plus de 1 800 individus ;
 - le moustique tigre, vecteur de la dengue et du chikungunya, introduit au début des années 2000, est susceptible de constituer un problème de santé publique.

Chapitre 6

Le littoral marseillais

Samuel Robert

ESPACE

Isabelle Laffont-Schwob

LPED¹

Introduction

Appréhender le littoral marseillais dans une perspective de développement durable, c'est s'intéresser à l'interface entre la terre et la mer et non pas seulement à l'espace marin littoral d'un côté ou à la seule partie continentale de l'autre. Il est également nécessaire de raisonner à différentes échelles spatiales et temporelles et de s'inscrire dans différents champs d'analyse et de connaissance de l'environnement, des territoires et des interactions société-environnement. De nombreuses disciplines scientifiques doivent être convoquées comme l'écologie (les habitats littoraux, les bassins versants, etc.), le droit (zonages juridiques divers), la géographie (l'espace et le système territorial côtier), l'économie (les activités), la sociologie (les habitants, les acteurs), en vue de combiner leurs approches pour avoir la vision la plus intégrative du littoral considéré.

Dans cette perspective, il est pertinent d'adopter une approche systémique, de manière à considérer à la fois les composantes constitutives de l'espace littoral et leurs interactions (figure 1 *infra*). Selon Corlay (1995), le littoral doit être appréhendé comme un système aux composantes multiples, mais dont les deux principales sont, d'une part l'écosystème, c'est-à-dire un milieu (biotope) et une biocénose aux potentialités diverses soumis à de fortes contraintes physiques et, d'autre part, le sociosystème, combinaison de facteurs qui relèvent de la société. La dynamique du système résulte d'interactions complexes entre la dynamique naturelle et la dynamique sociale, et son étude peut alors se faire

1 Avec la participation de Juliette Rouchier (AMSE).

selon une approche naturaliste, une approche sociale, ou encore une approche intégrée. Coexistent donc différents angles pour l'étude des systèmes littoraux, qui correspondent aux disciplines scientifiques qui se mobilisent à cette fin.

Quelle que soit l'entrée choisie pour l'étude du système, il est nécessaire de développer une pensée transdisciplinaire, multiscalaire et diachronique. Cette démarche s'impose si l'objectif est d'aboutir à une compréhension du fonctionnement du système, afin d'identifier des solutions viables et durables pour l'améliorer.

Toutefois, parce que l'approche systémique peut s'avérer complexe et difficile à mettre en œuvre, il est pertinent de hiérarchiser les enjeux de connaissance visés par un tel exercice. Nous avons donc choisi de focaliser l'attention sur quelques-unes des spécificités du littoral marseillais, aux premiers rangs desquelles se trouvent : la question des pollutions et de la qualité des milieux ; la conservation de la biodiversité locale ; le développement économique et social. Simultanément, nous avons choisi de considérer le rôle remarquable joué par le littoral au sein d'un système territorial plus vaste. Le littoral est en effet le site d'implantation de plusieurs des fonctions centrales du système socio-écologique marseillais au sens large : fonctions productives, fonctions récréatives, fonctions logistiques, fonctions touristiques, fonctions écologiques. Et toutes sont potentiellement concernées par le changement climatique.

La part du littoral dans l'espace métropolitain marseillais

Dans le contexte du changement climatique, interroger les enjeux de recherche scientifique relatifs au littoral de la région de Marseille nécessite de procéder à un diagnostic, même succinct, de la place qu'occupe l'interface terre-mer sur ce territoire. Parce qu'elle est désormais le périmètre administratif et politique de référence pour l'espace métropolitain marseillais, nous considérons que la métropole Aix-Marseille Provence constitue l'espace géographique de notre réflexion. Ce territoire se trouve particulièrement influencé par la mer et les espaces terrestres proches qui, de longue date, ont fixé les populations et les activités (Langlade, 1999). Aujourd'hui, les espaces côtiers concentrent toujours une grande partie des fonctions fondamentales de la métropole.

Structuration historique et toujours actuelle du territoire autour du littoral

Cité maritime et principale ville de la métropole, Marseille est mondialement connue comme un port (figure 2). C'est par son accès à la mer et au commerce avec des pays lointains que cette ville s'est développée et est devenue une agglomération littorale de plus d'un million d'habitants aujourd'hui (Roncayolo, 2014). L'extension de l'agglomération est intimement liée à la dynamique industrialo-portuaire de la ville, qui s'est propagée de la calanque originelle – le Vieux-Port – à la partie nord de la rade à partir de la seconde moitié du XIX^e siècle

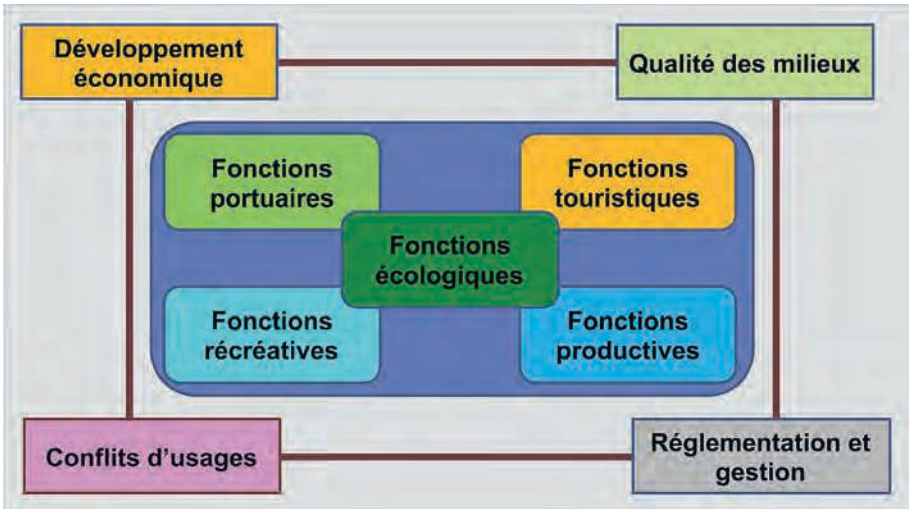


Figure 1. Une représentation schématique pour penser le système littoral marseillais : cinq fonctions principales à considérer au prisme de quatre dimensions contextuelles.



Figure 2. Terminal de conteneurs et gare maritime des croisières des bassins est du grand port maritime de Marseille. (Crédits : Samuel Robert.)

(Fontanel, Gasnault, 2006). Au début du xx^e siècle, elle a gagné les rives de l'étang de Berre et la partie orientale du golfe de Fos (Martigues, Port-de-Bouc, Lavéra) avec l'essor de la pétrochimie d'une part et le développement de l'aéronautique d'autre part (Daumalin *et al.*, 2003 ; Daumalin, 2014).

Après la Seconde Guerre mondiale, cette tendance s'est confirmée avec la création de la zone industrialo-portuaire (ZIP) de Fos-sur-Mer – sidérurgie, pétrochimie, etc. – (Beau *et al.*, 1978) et la structuration de l'urbanisation autour de l'étang de Berre (agglomérations nouvelles de Vitrolles, Ouest-Provence, etc.). Si les rivages sud et sud-est de l'espace métropolitain ont été relativement tenus à l'écart de ce développement urbain et industriel, ils n'en sont pas moins des sites importants du territoire. La Ciotat, qui est elle-même un port, a longtemps été un site majeur de la construction navale en France et le parc national des Calanques, créé en 2012, a une importance métropolitaine indéniable.

Si l'on considère le périmètre de la métropole Aix-Marseille Provence, le littoral apparaît en position centrale à plus d'un titre (figure 3). Tout d'abord, plusieurs entités géographiques côtières caractérisent ce territoire : golfe de Fos, étang de Berre, Côte bleue, rade de Marseille, archipels du Frioul et de Riou, massif des calanques, baie de La Ciotat. Elles constituent autant d'interfaces terre-mer à l'échelle de l'aire urbaine et, du fait du tracé original de la côte et de l'existence de la lagune de Berre, créent une forte interpénétration physique des espaces terrestres et des espaces marins à l'échelle de l'agglomération. Au total, les différents rivages de la métropole totalisent une longueur cumulée tout à fait considérable : près de 250 km de rivage marin de Port-Saint-Louis du Rhône à La Ciotat, et plus de 70 km de rivage lacustre (étang de Berre au sens strict, sans compter le canal de Caronte).

Ce littoral détermine juridiquement vingt communes littorales au sens de la loi du 3 janvier 1986, qui représentent 967 km² (30,4 % de la superficie totale du territoire métropolitain) et qui totalisent 1,2 million d'habitants (65 % de la population métropolitaine) en 2016. Au-delà de ce poids en termes de démographie et de superficie, les communes côtières abritent plusieurs des infrastructures et fonctions fondamentales de l'aire urbaine, souvent localisées à une distance relativement faible du rivage : aéroport international, grand port maritime, complexes pétrochimiques, aciérie ArcelorMittal, ZIP de Fos-sur-Mer, Airbus Helicopters, Euroméditerranée, sièges de la métropole et de l'université d'Aix-Marseille, etc.

Le territoire d'Aix-Marseille Provence est multipolaire. Divers autres lieux importants comme Aix-en-Provence ou Aubagne participent en effet à la structuration de l'espace métropolitain. Cependant, le littoral en est incontestablement un véritable point névralgique. Si son importance, aussi bien régionale que nationale, a pu décroître au cours des dernières décennies, elle demeure aujourd'hui très prégnante et semble même progresser à la faveur de profonds bouleversements intervenus depuis un peu plus de quinze ans. Après la décolonisation dans les années 1960, le trafic portuaire s'est

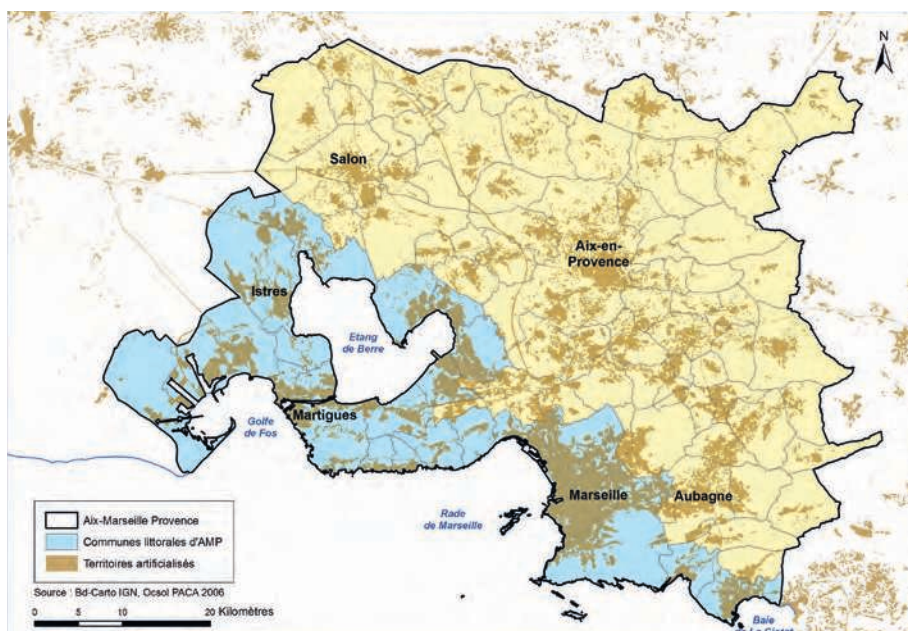


Figure 3. Le territoire de la métropole Aix-Marseille Provence et les communes littorales.

en effet considérablement ralenti et l'activité industrielle associée a décliné, voire disparu. La population de Marseille a commencé à baisser et des friches industrielles sont apparues, alors que des communes de l'intérieur ont connu un certain essor, en particulier dans le proche arrière-pays aixois. Mais à partir des années 1990, la ville-centre de l'agglomération a regagné des habitants et connu une relance avec la mise en service de la ligne ferroviaire à grande vitesse « Méditerranée » jusqu'à la gare Saint-Charles et l'Opération d'intérêt national Euroméditerranée (Bertoncello et Rodrigues-Malta, 2003). La ville s'est transformée et s'est dessiné un avenir tertiaire et touristique. Le littoral en est le théâtre principal : réaménagement du front de mer de la Joliette (J4, Mucem, Terrasses du Port, Tour CMA-CGM, rénovation des docks et des voûtes de la Major, du Silo, etc.), semi-piétonnisation du Vieux-Port, charte ville-port, Plan mer et littoral de la municipalité, essor de la croisière (port n° 1 en France, n° 5 en Méditerranée). Concomitamment, les autorités portuaires ont engagé un processus de modernisation : les bassins de Fos ont augmenté leurs capacités de traitement du trafic par conteneurs, qui progresse, et les bassins Est (Marseille) font l'objet d'un programme de relance de l'activité logistique (pôle multimodal de Mourepiane) et de la remise en fonction de la forme 10 pour la réparation de navires de plus de 300 m de long.

À côté de cette dynamique économique et urbanistique, le renforcement des mesures de protection de l'environnement littoral terrestre et marin contribue aussi à cette nouvelle donne, en mettant en évidence le patrimoine

naturel côtier. De nombreuses et importantes acquisitions du Conservatoire du littoral, la création du parc marin de la Côte bleue en 1983, l'opération Récifs artificiels du Prado commencée en 2007, les travaux du GIP-REB² sur l'étang de Berre et surtout la création du parc national des Calanques en 2012 attestent d'une attention accrue accordée à l'environnement naturel côtier. Cela s'inscrit dans un contexte métropolitain où la concentration des infrastructures et des activités sur la zone côtière exerce une forte pression sur les espaces naturels.

Fonctions socio-économiques assurées par le littoral

Par son lien étroit avec le développement économique et social de la ville de Marseille et de la région qui l'entoure, le littoral remplit un nombre élevé de fonctions constitutives du système côtier. La mer et la côte représentent tout à la fois une ressource, un patrimoine et une opportunité.

Historiquement, l'exploitation des ressources marines a été très importante (Faget, 2011): la pêche côtière a été un secteur économique notable de plusieurs petits ports (Carro, Martigues, L'Estaque, La Madrague-Ville, Cassis, etc.), alimentant des activités induites comme la construction navale. Aujourd'hui, ce domaine d'activité reste bien présent et très vivace culturellement, mais il ne constitue plus qu'un gisement d'emplois très secondaire. Des zones de non-pêche ont été instituées pour soutenir ces petits métiers tout en favorisant le maintien de la biodiversité (parc marin de la Côte bleue, récifs artificiels du Prado, parc national des Calanques) et des petits patrons-pêcheurs demeurent sur la Côte bleue (Carro, La Couronne, L'Estaque) et les Calanques (Pointe Rouge, Les Goudes, Cassis).

Cependant, la criée de Marseille (déménagée du Vieux-Port à Saumaty en 1976), qui voit son activité décliner depuis plusieurs années, ne se fournit que très partiellement auprès des patrons pêcheurs du littoral marseillais. Avec l'arrêt de la criée de Port-de-Bouc en 2009, la pêche est désormais une activité économique mineure, avec 112 navires de pêche actifs dans le quartier maritime de Marseille en 2016 (Ifremer, 2017), d'autant que l'on estime que les prélèvements pratiqués par la pêche récréative représentent une part prépondérante de l'ensemble des prélèvements. L'aquaculture est encore très peu pratiquée (existence d'une ferme aquacole au Frioul et d'une zone conchylicole à Port-Saint-Louis du Rhône), et si l'étang de Berre abrite encore une activité de pêche à l'anguille depuis Martigues et Saint-Chamas, elle ne concerne que quelques familles.

L'autre fonction historique du littoral est la fonction portuaire pour le transport de voyageurs et le fret. Par son activité, la place de Marseille-Fos, sous l'autorité du grand port maritime de Marseille (GPMM), ne se situe plus dans le haut de la hiérarchie mondiale des villes portuaires, comme ce fut le cas de Marseille seule au XIX^e et au début du XX^e siècle. Cependant, le trafic annuel

2 Syndicat mixte de l'étang de Berre : <http://www.etangdeberre.org>.

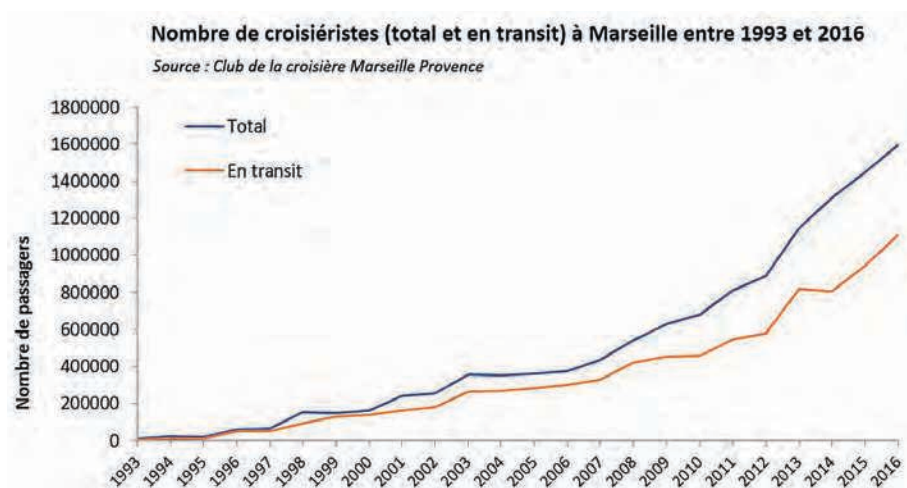


Figure 4. D'une dizaine de milliers à plus d'un million et demi de passagers : le boom de la croisière sur la place marseillaise en vingt ans.

positionne le port de Marseille au premier rang en France (tous trafics confondus sauf pour les conteneurs, n° 2 derrière Le Havre), au deuxième en Méditerranée et au quatrième en Europe (source GPMM). Sur des trafics spécifiques, le classement est toutefois meilleur : n° 3 mondial pour les produits pétroliers, n° 5 en Méditerranée pour les croisières (1,7 million de passagers en 2018). Alors que le trafic des vrac liquides et solides est en baisse, celui des conteneurs progresse et l'activité croisières est en croissance très rapide (figure 4).

L'ensemble de l'activité du port contribue très substantiellement à l'activité économique de tout le territoire : logistique, entretien et réparation navale, affrètement, etc. En 2011, l'emploi portuaire (près de 43 000 emplois) représentait 8 % des emplois salariés privés dans les Bouches-du-Rhône et près de 22 % des effectifs industriels du département étaient liés étroitement au port (Étude cabinet Sémaphore, 2011). Une estimation des richesses générées par le port, mesurée par la valeur ajoutée des entreprises qui y sont liées, était de l'ordre de 3,5 milliards d'euros en 2011. L'influence du port sur l'économie du territoire est par conséquent considérable ; elle s'étend sur l'ensemble de l'espace métropolitain et même au-delà.

Les fonctions portuaires et logistiques ont de longue date favorisé l'essor de l'industrie de transformation des matières premières importées (Daumalin, 2014). Pour une très large part, le tissu industriel de la région demeure marqué par cette relation au port et au littoral. Si beaucoup d'usines ont cessé leurs activités à la suite de la décolonisation (huileries, savonneries, tuileries, etc.), plusieurs établissements industriels majeurs de la région sont toujours étroitement liés au littoral. Aux premiers rangs de ces usines, on compte des industries lourdes : quatre raffineries de pétrole (Fos, Lavéra, La Mède et Berre), toutes situées

sur le rivage; l'usine sidérurgique ArcelorMittal de Fos; l'usine d'alumine de Gardanne. S'y ajoute une multitude d'entreprises plus petites disséminées dans le proche arrière-pays, dans les secteurs de l'agroalimentaire notamment.

À côté de ces fonctions traditionnelles, le littoral remplit depuis longtemps une fonction récréative pour les habitants de la région. Le rapport à la nature et à la mer y est en effet très ancien et très riche (Faget, 2011). Il est illustré par de multiples pratiques traditionnelles telles que la baignade, la pêche à la ligne, les joutes nautiques (L'Estaque, Port-de-Bouc, Martigues), la petite plaisance à voile, les fêtes et moments de convivialité autour des produits de la mer (oursinades, sardinades, etc.), l'habitat et l'art de vivre dans les calanques. S'y ajoutent des activités plus contemporaines, liées notamment aux sports de nature en mer ou sur la côte: kayak de mer, stand-up paddle, planche à voile, kitesurf, aviron, jet-ski, randonnée pédestre, escalade, pêche et plongée sous-marine (Robert, Plouvier, 2017).

Le littoral constitue un vaste espace récréatif où se retrouvent de multiples usagers citadins résidant dans les communes littorales elles-mêmes, mais aussi ailleurs dans l'arrière-pays, voire beaucoup plus loin. Car depuis quelques années, la fonction touristique s'affirme. Dès les années 1930, certaines localités comme Carry-le-Rouet et Sausset, sur la Côte bleue, ou Cassis, dans les calanques, ont commencé à se spécialiser dans l'économie d'accueil et se sont fait connaître comme stations balnéaires. Cependant, la côte marseillaise ne s'est pas complètement affirmée comme un littoral touristique. Ce n'est que depuis une quinzaine d'années que le contexte change.

Le lancement de l'opération de rénovation urbaine Euroméditerranée, à partir de 1995, et l'arrivée du TGV en 2000 favorisent l'arrivée d'un public nouveau (Bertoncello, Rodrigues-Malta, 2003). Ceci conforte les autorités locales marseillaises (Ville, Chambre de commerce, autorités portuaires), à la recherche d'un nouveau souffle pour le territoire (Bertoncello, Girard, 2001), tentées d'imaginer un destin touristique à la ville et plus largement à sa région. Cela se traduit par des aménagements portuaires pour le développement de la croisière, le développement du tourisme de réunion et de congrès, la candidature de Marseille-Provence au titre de capitale européenne de la culture en 2007, qui sera organisée en 2013, l'organisation du Forum mondial de l'eau en 2012, la candidature et à l'obtention des compétitions de voile des Jeux olympiques de Paris en 2024, etc.

Les spécificités écologiques et environnementales du littoral marseillais

L'importance du littoral dans le territoire métropolitain, tant socio-économique que stratégique, n'est pas sans rapport avec ses spécificités écologiques. Si le littoral marseillais a fixé les populations humaines depuis fort longtemps et s'il offre des opportunités aujourd'hui pour le développement économique et social,

c'est en partie pour le caractère exceptionnel du milieu naturel. La biodiversité, la qualité des habitats ou encore la beauté des paysages côtiers constituent un patrimoine rare. Mais il a pour partie été entamé, détruit ou perturbé par les activités anthropiques, ce qui suppose de traiter deux problématiques essentielles : la gestion et la prévention des pollutions, d'une part; et la fréquentation et la conservation des espaces naturels, d'autre part. La création du parc national des Calanques en 2012 a confirmé la reconnaissance par les autorités publiques des fonctions écologiques du littoral. Incluant dans son périmètre un domaine marin et un domaine terrestre, le Parc permet d'affirmer la nécessité de la protection de l'environnement marin et terrestre, de raisonner en termes de services écosystémiques et confirme donc l'enjeu revêtu par la zone littorale.

L'originalité des espaces naturels marins et terrestres et de leur interface

Le littoral marseillais se caractérise par une richesse et une diversité biologique à la fois terrestre et marine. Il s'inscrit dans le *hotspot* de biodiversité de Méditerranée. Le bassin méditerranéen recèle une richesse floristique exceptionnelle avec entre 25 000 et 30 000 espèces et sous-espèces végétales, caractérisées par un fort taux d'endémisme, soit 10 % de la biodiversité végétale mondiale pour seulement 1,6 % de la surface terrestre (Médail, Quézel, 1999). Or, selon Médail et Verlaque (1997), les espèces végétales terrestres du sud-est de la France les plus menacées se développent généralement dans des biotopes littoraux. D'autre part, même si la prise de conscience de la vulnérabilité des espèces marines est apparue plus tardivement que celle des espèces terrestres, un effort de recherche important a été apporté sur la connaissance de la biodiversité marine et a permis d'établir des arrêtés de protection sur la base de listes des espèces marines à protéger (Boudouresque, Bianchi, 2013).

Un diagnostic plus complet des spécificités et des enjeux sur les biodiversités marines et terrestres est développé dans d'autres chapitres auxquels nous renvoyons. On peut cependant souligner que le littoral est constitué d'une mosaïque paysagère imbriquant milieux naturels, zones urbanisées et zones industrielles. En outre, malgré le nombre élevé et l'étendue des emprises industrielles, les habitats naturels littoraux restent multiples et originaux. Ils font l'objet de nombreuses mesures de protection et de conservation notamment au travers d'acquisitions foncières, comme celles du Conservatoire du littoral et des espaces lacustres, du Conseil général des Bouches-du-Rhône (via les espaces naturels sensibles [ENS]), etc.

La problématique du traitement et de la prévention des pollutions passées et actuelles

Du fait de l'ancienneté et de l'importance du développement industrialoportuaire, le littoral est notoirement concerné par des pollutions diverses affectant les milieux et le cadre de vie. Ces pollutions, qui ont été générées sur le littoral proprement dit, sont connues depuis longtemps même si elles ne sont

pas toujours bien caractérisées (notamment la nature et l'étendue de la pollution diffuse). Dès le début du XIX^e siècle, une réflexion nationale est menée sur l'industrie et l'environnement notamment à propos de l'installation de certaines industries très polluantes. Comme le met en évidence Daumalin (2008), cette prise de conscience est bien antérieure à l'émergence de la pensée écologique des années 1960-1970; l'histoire industrielle de la soude en est une bonne illustration. La ville et sa région portent donc, aujourd'hui encore, les stigmates d'une industrie passée (Laffont-Schwob, 2015; Daumalin, Laffont-Schwob, 2016). À cela s'ajoutent les pollutions actuelles générées par la spécialisation industrielle et portuaire de ce littoral, tout particulièrement autour du golfe de Fos et sur l'étang de Berre.

L'état de l'environnement littoral est également dépendant de certaines activités industrielles localisées plus à l'intérieur des terres. Tel est le cas de l'usine d'alumine de Gardanne, dont les rejets de boues rouges ont été déversés au large de Cassis des années 1960 jusqu'en décembre 2015³. Tel est le cas également des eaux pompées dans les mines de charbon de Gardanne, après l'arrêt de leur exploitation en 2003, qui sont rejetées depuis 2012 dans la rade nord de Marseille. Les activités industrielles présentes et passées exercent donc des perturbations sur les milieux naturels, dont certaines peuvent entraîner de graves dégradations environnementales et causer des risques sensibles pour la santé humaine. À Marseille, comme sur d'autres rivages méditerranéens, plusieurs sites littoraux sont profondément affectés par ces pollutions industrielles héritées et d'autres restent toujours sous l'influence d'activités industrielles actuelles (figure 5). Il existe ainsi une pollution chronique des habitats naturels et un véritable risque de pollutions accidentelles dont il importe de tenir compte dans l'évaluation de mesures de gestion.

La problématique de la pollution sur le littoral revêt enfin une certaine spécificité liée au caractère d'interface de ce milieu. Des transferts de contaminants de la terre vers la mer (ruissellement d'eaux contaminées continentales vers la mer, lessivage de sols contaminés, etc.) coexistent, en effet, avec d'autres flux de la mer vers la terre (embruns pollués, marées noires, etc.). Ceci implique que les réflexions pour la gestion et la prévention de la contamination des écosystèmes soient menées à une échelle globale incluant à la fois la zone terrestre et la zone marine. Si la tendance observée est actuellement au retrait et à l'effacement relatif de l'industrie sur les rives nord de la Méditerranée occidentale (Daviet, Robert, 2012), la question de l'empreinte laissée par ces activités reste aiguë et nécessite des études scientifiques intégrées.

Outre les pressions exercées par les activités industrielles, le littoral subit des perturbations liées à l'existence même d'une urbanisation importante du rivage. Les superficies urbanisées sont relativement étendues et l'étalement urbain demeure une menace. Parallèlement, la reconversion et la densification

3 Depuis 2015, c'est un effluent traité, diminué de la phase particulière, qui est déversé par l'usine.

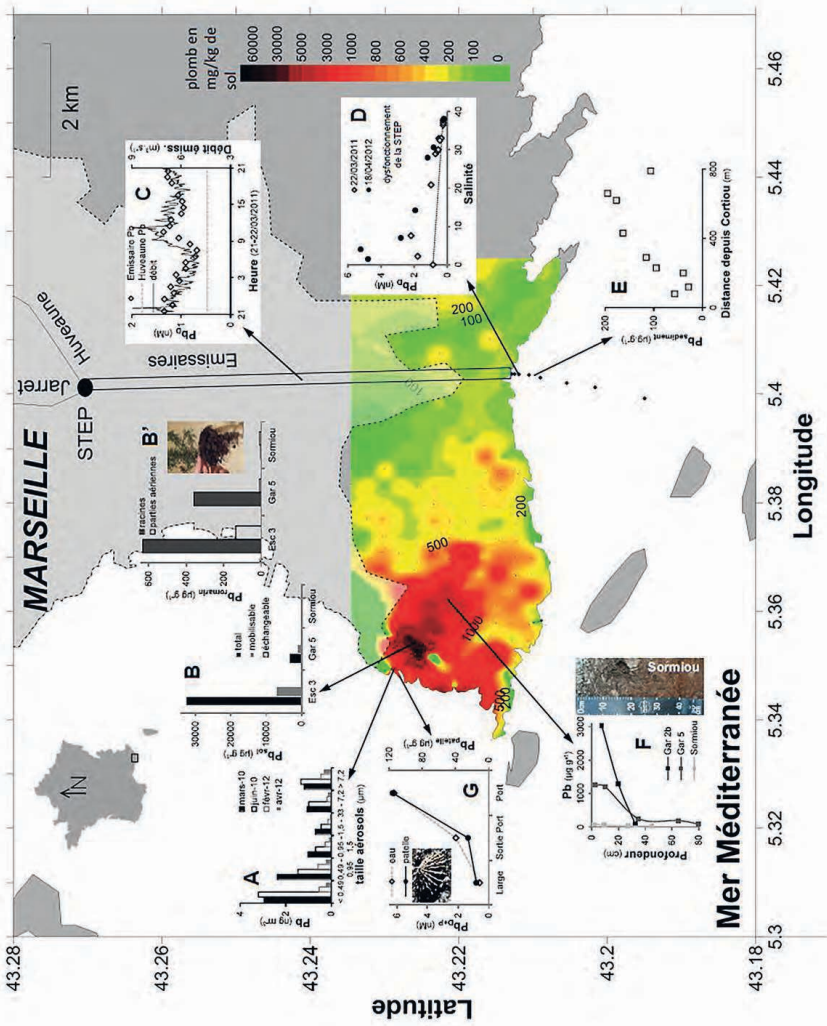


Figure 5. Exemple de contamination en plomb (en mg/kg) d'une zone littorale marseillaise affectée par des activités industrielles passées. STEP = station d'épuration. Projet ANR Marséco 2008-2013. (Source : avec la courtoisie de Cédric Garnier, publié dans Daumalin, Laffont-Schwob, 2016.)

urbaines sont à l'œuvre (Robert, 2016), ce qui est une tendance positive au regard de la durabilité des territoires, mais ceci peut soulever d'autres problèmes. Par exemple, l'artificialisation accrue des sols augmente le ruissellement lors des épisodes pluvieux, ce qui a des conséquences multiples lors des événements extrêmes: saturation des réseaux de collecte des eaux usées et pluviales qui conduit à un détournement des eaux d'égout dans la mer, arrivées de macrodéchets sur la côte du fait de leur drainage dans les bassins versants, etc.⁴. La pression démographique est quant à elle à l'origine de pollutions plus diffuses, mais tout aussi impactantes: déchets domestiques abandonnés dans l'espace public ou dans les espaces naturels; pollution atmosphérique générée par la circulation automobile, qui se mêle à celle des bateaux desservant les ports; pollution lumineuse la nuit et nuisances sonores générées par les activités humaines qui, en lisière d'espaces naturels et en mer, constituent une gêne pour certaines espèces animales et/ou végétales, etc.

La problématique de la fréquentation et de la conservation des espaces naturels

Du fait de l'importance de la population métropolitaine et de l'attractivité touristique accrue de la région, le littoral et la mer côtière sont soumis à une augmentation des fréquentations touristiques et récréatives. Les sites concernés se voient alors confrontés à des situations de surfréquentation chronique qui peuvent poser des contraintes diverses aux écosystèmes. Qu'il s'agisse du piétinement par des randonneurs d'espèces végétales protégées emblématiques comme l'astragale, des arrachages de posidonie par des plaisanciers, de la modification de la composition des sols par les déchets organiques azotés (restes alimentaires, déjections), des prélèvements de certaines espèces de poissons par des pêcheurs sous-marins amateurs, de feux de forêt accidentels dus à des pique-niqueurs, entre autres exemples, les activités de plein air peuvent être particulièrement perturbatrices voire destructrices.

L'instauration de réglementations sur les espaces naturels (comme l'interdiction d'accès aux massifs lors des périodes de risque de départ d'incendie, ou des zones de non-pêche dans les aires marines protégées) constitue des mesures pour permettre aux divers usages d'avoir lieu et pour tenir des objectifs de conservation. Mais les conflits d'usage restent potentiellement nombreux et importants, comme en atteste la difficile émergence du parc national des Calanques (Deldrève, Deboudt, 2012; Claeys, 2014). L'observation et l'étude scientifique des fréquentations récréatives, d'ores et déjà commencées par les gestionnaires, demeurent une priorité scientifique, autant pour comprendre l'incidence de ces fréquentations sur les habitats, que pour repérer des pratiques à risque vis-à-vis de lieux concernés par les pollutions héritées, et ainsi envisager des mesures de gestion et des aménagements adéquats facilitant la gestion du public.

4 Le chapitre 7 traite plus en détail la question des eaux usées et des macrodéchets.

La gestion du littoral

Que ce soit pour traiter de la conservation des espaces naturels, pour penser les aménagements supports du développement économique et du bien-être social ou pour lutter contre les pollutions, le littoral doit faire l'objet de l'attention de professionnels issus de divers champs de compétences. Le concept de gestion intégrée de la zone côtière (GIZC), consacré dans le chapitre 17 de l'agenda 21 du sommet de la Terre à Rio de Janeiro en 1992, constitue un référentiel fondamental en la matière. Dans le cas du littoral de l'espace métropolitain marseillais, la gestion est répartie entre plusieurs organismes de statut public. L'articulation et la mise en cohérence des actions des uns et des autres pour relever le défi d'une gestion durable de ce littoral à l'échelle métropolitaine, *a fortiori* dans le contexte du changement climatique, sont donc en question.

Diversité des intervenants et de leurs champs de compétences

La gestion du littoral marseillais est du ressort de plusieurs catégories de gestionnaires ou responsables publics et parapublics. S'il n'est pas nécessaire d'en faire une liste exhaustive ici, il convient toutefois d'en faire état pour rendre compte du défi que représente l'objectif d'une gestion intégrée du domaine côtier, tant ils sont nombreux. Selon les « objets » ou compartiments concernés du système littoral, les intervenants se situent à différents niveaux du maillage administratif et territorial, relèvent d'établissements ou d'organismes de statuts divers et/ou exercent leurs responsabilités sur tout ou partie du littoral qui nous intéresse. Quelques exemples peuvent être présentés.

En ce qui concerne les infrastructures portuaires, les gestionnaires sont :

- le grand port maritime de Marseille (établissement public) pour les bassins marseillais du J4 à L'Estaque et pour les bassins fosséens ;
- le conseil départemental des Bouches-du-Rhône, pour la gestion des huit ports départementaux (le Port-Vieux de La Ciotat et le site industriel, Cassis, les ports calanquais de Niolon et de La Redonne, Carro et trois ports de l'étang de Berre, Pertuis, Sagnas et Jai) ;
- la métropole Aix-Marseille Provence, pour la plupart des ports de l'ex-communauté urbaine MPM (24 ports, comme Sausset, Carry-le-Rouet, Madrague de Gignac, Vieux-Port de Marseille, Vallon des Auffes, Malmousque, Pointe Rouge, L'Escalette, etc.) ;
- des communes pour certaines infrastructures de plaisance et centres nautiques comme à Saint-Chamas, Istres, Martigues ou Berre-l'Étang sur l'étang de Berre, et Marseille (bases nautiques de Corbière, du Roucas Blanc et de l'Huveaune), Port-de-Bouc, Martigues ou Port-Saint-Louis-du-Rhône sur le littoral marin.

Concernant les plages, les gestionnaires sont principalement les communes pour l'entretien, le balisage des zones de baignades, etc., et la surveillance.

Dans le cas de concessions accordées pour le développement d'activités récréatives en saison, des acteurs privés sont également en responsabilité.

Concernant les espaces naturels et les dispositifs de protection de l'environnement, plusieurs autres organismes sont à considérer. On retrouve certaines collectivités territoriales (conseil départemental 13, intercommunalités, communes) pour ce qui relève d'espaces naturels terrestres dont elles peuvent être des propriétaires fonciers partiels ou de dispositifs en mer dont elles peuvent être responsables (récifs immergés du Prado gérés par la Ville de Marseille, par exemple). Le parc marin de la Côte bleue opère sur cette partie du littoral avec un suivi de deux zones de non-prélèvement. Le parc national des Calanques intervient également sur une zone marine comprenant des zones de non-prélèvement, mais aussi sur une aire terrestre étendue. Le Conservatoire du littoral et l'ONF sont quant à eux deux propriétaires fonciers importants en ce qui concerne la conservation des espaces de nature à proximité du rivage. Cependant, si l'ONF agit en gestionnaire sur ses territoires, la gestion des espaces du Conservatoire du littoral est souvent confiée à des associations du secteur de l'environnement, des collectivités locales ou des établissements publics comme le parc national des Calanques. À ces différents acteurs s'ajoutent les services de l'État (DDTM, DREAL) qui officient pour exercer un contrôle de légalité sur les actions menées et pour accompagner la mise en place des politiques publiques.

Outre les acteurs à caractère public, un nombre élevé d'associations plus ou moins investies ou responsabilisées sur des opérations d'éducation à l'environnement, de découverte du monde marin, de gestion d'anneaux de plaisance ou de pratiques sportives sur le littoral interviennent également dans la gestion du littoral. Ces structures, qui peuvent avoir une organisation de type professionnel ou au contraire être plus proches de l'esprit de la loi de 1901, ont une importance non négligeable sur le fonctionnement du système littoral. Elles en sont même une composante essentielle à bien des égards. Ne serait-ce que pour relever le défi de l'éducation à l'environnement et pour diffuser les bonnes pratiques en matière de fréquentation et d'usage des espaces naturels littoraux, le tissu associatif s'avère déterminant. Il s'est également révélé comme porte-parole d'une sensibilité environnementale très précoce pour lutter contre le phénomène de littoralisation de Marseille, notamment pour limiter l'emprise foncière sur le massif des Calanques (Goiffon, Consales, 2005 ; Plauchud Vaucher, Vaucher, 2012).

L'enjeu de la vision intégrée (spatiale, transsectorielle)

Du fait du grand nombre et de la diversité des acteurs impliqués dans sa gestion et son aménagement, l'avenir du littoral de la métropole ne peut être envisagé sans aborder la question de l'articulation des compétences et des responsabilités de chacun dans une vision intégrée. Pour au moins deux raisons, le défi est de taille. D'une part, en termes de gestion, il existe un compartimentage spatial de l'espace côtier. La partie terrestre et la partie marine restent

encore le plus souvent traitées séparément et, parallèlement, la côte n'est pas administrée par une entité unique. D'ouest en est, elle tombe sous l'autorité de plusieurs collectivités locales, plusieurs établissements publics de gestion des espaces naturels, plusieurs autorités portuaires. D'autre part, pour une même section de la zone côtière, il existe une superposition des responsabilités d'acteurs divers qui peuvent tout aussi bien se connaître et collaborer, ou au contraire poursuivre des objectifs différents. Même si les services de l'État ont pour mission d'assurer une cohérence des politiques publiques sur l'espace littoral, les actions menées ne sont pas nécessairement articulées avec une vue d'ensemble et dans l'intérêt général. La question se pose alors de l'application de concepts opératoires pour y parvenir. Celui de solidarité écologique, défini en droit de l'environnement, peut fournir des éléments intéressants.

Le principe de conduire des actions concertées entre acteurs publics, voire entre acteurs publics et citoyens (via des associations ou non), fait aussi son chemin depuis quelques années. Plusieurs exemples méritent d'être cités en la matière. Dès les années 1980, l'idée de créer un parc naturel marin se développe sur la Côte bleue à l'initiative de la commune de Carry-le-Rouet, rejointe par les municipalités voisines, les usagers de la mer, les pêcheurs, etc.⁵. Elle débouche sur la mise en place de zones de non-prélèvement, de récifs artificiels et plus particulièrement sur la création du parc marin de la Côte bleue en 1983, lequel deviendra un syndicat mixte en 2000. En 1999 est créé le GIP des Calanques qui conduit à la création du parc national des Calanques en 2012. Si la genèse de ce parc a été émaillée de beaucoup de débats et de projets successifs sur des périmètres différents (Deldrève, Deboudt, 2012; Claeys, 2014), le décret de création a pu aboutir et ce premier parc national péri-urbain composé d'une zone terrestre et d'une zone marine constitue une opportunité pour tenir conjointement des objectifs de préservation de la nature et d'accessibilité des usagers aux ressources naturelles sur cette partie du littoral.

Dans un autre registre, la ville de Marseille a été retenue pour une expérimentation de gestion intégrée de la zone côtière, dans le cadre de l'appel à projets de la DIACT, en 2005. Ceci a donné lieu à la conception d'un plan de gestion de la rade, une initiative qui ambitionnait de réunir institutions et entreprises, scientifiques et décideurs, intérêts publics et privés dans le but de mettre en œuvre des projets de valorisation raisonnée du littoral. Plus tard, en 2012, une charte Ville-Port a été signée entre le GPMM, l'État et les acteurs locaux pour encadrer les actions à venir sur le littoral portuaire de la ville et pour permettre de se concerter à leur sujet. Ensuite, un contrat de baie a été signé en 2014 sur le littoral de l'ancienne communauté urbaine MPM et ses prolongements est et ouest (AGAM, 2012). Outil de l'agence de l'Eau, il a pour objectif le bon état écologique des masses d'eau côtières (dans la perspective de la mise en application de la directive-cadre sur l'eau), la qualité des eaux de baignade,

5 <http://www.parcmarincotebleue.fr>.

la préservation des milieux littoraux et s'appuie sur une coopération multipartenaire qui relève de la GIZC. Dans la même veine, l'étang de Berre est l'objet d'un GIP depuis 2000 (GIP-REB), devenu syndicat mixte en 2011, dont le but est la réhabilitation environnementale de l'étang. Les initiatives ne manquent donc pas et témoignent d'une volonté de dépasser les clivages institutionnels.

Cependant, la vision intégrée n'est pas encore tout à fait atteinte, du fait de la persistance du mille-feuille territorial et de la multiplicité des structures et des intérêts de chacune. De même, des sujets pourtant éminemment communs demeurent gérés de façon indépendante sur des secteurs géographiques distincts. Tel est le cas de la question des fréquentations et des usages récréatifs du littoral qui ne fait toujours pas l'objet d'un suivi intégral sur la façade maritime. De même, la gestion des sols (et donc de l'urbanisation) sur les communes côtières reste décidée au niveau des communes, et seules les communes de l'ancienne MPM sont aujourd'hui couvertes par un PLUi (plan local d'urbanisme intercommunal). À une autre échelle, les projets de territoire élaborés au niveau des schémas de cohérence territoriale (SCOT) restent pensés sans véritable connexion les uns avec les autres et n'intègrent pas de volet littoral et maritime comme y invite le livre bleu issu du Grenelle de la mer en 2009 et le code de l'urbanisme (METL, 2013). Les efforts sont donc à poursuivre pour véritablement s'inscrire dans le champ de la durabilité, *a fortiori* si l'on veut faire face à l'enjeu du réchauffement climatique.

L'enjeu du changement climatique et de ses potentiels effets sur le système littoral

À partir de ce diagnostic nécessairement succinct et, de ce fait, imparfait du système littoral marseillais, comment envisager son devenir dans le contexte du changement climatique ? Quelles sont les caractéristiques de ce système qui peuvent le rendre vulnérable et, au contraire, celles qui peuvent offrir des opportunités pour un développement économique et social compatible avec la notion de durabilité ? Quels marqueurs du changement climatique peuvent d'ores et déjà être observés sur le littoral ? Et quels autres effets peuvent être suspectés ? En adoptant une tonalité prospective, cette dernière section propose d'aborder le système littoral au travers de différentes facettes du changement climatique. Rien n'est évoqué de façon définitive et entièrement validée car si les modèles climatiques sont de plus en plus perfectionnés et intègrent différentes hypothèses d'évolution socio-économiques et géopolitiques, il est toujours très complexe de pouvoir envisager les réelles conséquences d'un changement climatique dans sa gamme d'effets sur des réseaux écologiques complexes que forment les écosystèmes littoraux et dans des contextes socio-économiques et géopolitiques qui peuvent s'avérer très changeants.

La perspective du réchauffement de la mer

Le réchauffement des masses océaniques constitue une des conséquences du changement climatique. Dans le cas de la Méditerranée, mer quasi fermée, il est aujourd'hui établi que les températures de la mer sont amenées à évoluer à la hausse, en particulier dans les zones côtières. Aux environs de Marseille, les séries de mesures hydrologiques ont montré que la température des eaux profondes a très peu varié (de l'ordre de 0,03 °C par décennie) – cette augmentation étant néanmoins significative compte tenu des masses d'eau très importantes concernées – et que la température des eaux de surface à proximité des côtes a elle aussi augmenté environ dix fois plus qu'en profondeur (de l'ordre de 0,3 °C par décennie) (voir détails dans le chapitre 7). Les conséquences de ce phénomène sont multiples. Elles concernent tout aussi bien le fonctionnement des habitats sous-marins, que le comportement des espèces ou encore les pratiques et les usages socio-économiques de la mer. Par exemple, de nombreux cas de poissons considérés comme rares, voire exceptionnels en Méditerranée nord-occidentale, sont actuellement recensés en abondance près du littoral, notamment dans les eaux côtières marseillaises (Laubier *et al.*, 2003), ce qui est un marqueur de l'évolution de la répartition de ces espèces. Ainsi, les aires de répartition des espèces, et par conséquent le fonctionnement des réseaux trophiques, sont en passe d'être modifiés par le réchauffement. Des prévisions font d'ailleurs état de la disparition d'habitats favorables pouvant aller jusqu'à 90 % pour certains poissons (Ben Rais Lasram *et al.*, 2010).

Outre ses effets directs sur le vivant, le réchauffement peut s'accompagner d'une série d'évolutions des équilibres chimiques pouvant générer une acidification des eaux marines superficielles. À leur tour, ces transformations pourraient influencer sur les habitats et la qualité des milieux aquatiques. Toutes ces modifications de l'écosystème sous-marin sont potentiellement déterminantes pour les grands équilibres écosystémiques sur le littoral, ainsi que sur les interactions socio-écologiques dans ce contexte. À titre d'exemple, le réchauffement des eaux de baignade pourrait présenter un inconvénient en modifiant les cycles biochimiques qui s'opèrent ordinairement dans la masse d'eau et en facilitant la prolifération de certains organismes microbiens et certaines algues, ce qui aurait une incidence sur les activités balnéaires. De même, la dégradation des habitats sous-marins et de leur biodiversité, comme les tombants ou les herbiers de posidonies, pourrait avoir des conséquences sur une activité récréative comme la plongée sous-marine, fort pratiquée et support de l'économie touristique sur un littoral tel que celui de Marseille. La réduction des herbiers de posidonies entraînerait également la perte de nombreux services écosystémiques dont la fixation d'importants gisements de carbone organique dans les sédiments (Boudouresque *et al.*, 2012).

Principalement perçu comme un risque et une contrainte, le changement climatique, par certains de ses aspects, peut, *a contrario*, être envisagé comme une opportunité. En ce qui concerne l'élévation de la température de la mer,

une incidence sur les pratiques et les usages récréatifs peut par exemple être imaginée. Réputées pour être facilement rafraîchies par le mistral et les *upwellings*, les eaux de baignade pourraient être moins «rebutantes» par leur température en plein été et la saison balnéaire pourrait s'en trouver allongée (débuter plus tôt et se terminer plus tard). Ceci constituerait alors une opportunité pour le développement économique (le nombre des séjours courts de week-end pourrait, par exemple, augmenter en dehors de la saison estivale) et une aménité environnementale nouvelle pour les habitants. Le cas échéant, la fréquentation du littoral serait modifiée et supposerait que les mesures de gestion actuelles intègrent ces nouvelles pratiques. En particulier, il pourrait s'agir d'élargir le service de la surveillance de baignade des plages, qui, actuellement, commence relativement tardivement et s'achève assez tôt (juin-septembre dans le cas des plages de la commune de Marseille). Dans un tout autre registre, l'élévation de température de la masse d'eau pourrait être une opportunité en matière de production énergétique, notamment par le biais de la mise en œuvre de système de chauffage urbain reposant sur la captation d'eau de mer en hiver (technique des boucles d'eau de mer, voir plus loin «Innovations énergétiques»).

La question de l'élévation du niveau marin

À Marseille, des fouilles archéologiques ont permis de savoir que le niveau de la mer s'est élevé de 50 cm environ depuis la période romaine (Morhange, 2001). Cependant, les spécialistes s'entendent pour dire que l'élévation du niveau de la mer, notamment la Méditerranée, ne peut être actuellement estimée de manière robuste. Malgré les fortes incertitudes, et tout en prenant des précautions, il est tout de même pertinent d'en envisager les effets sur la côte marseillaise que certaines observations estiment à 1 cm tous les dix ans (voir chapitre 7).

Par sa géomorphologie, la côte marseillaise est inégalement soumise au risque de submersion marine. Principalement rocheux et présentant une élévation rapide de l'altitude à mesure que l'on s'éloigne du rivage, le littoral apparaît peu soumis à ce risque en dehors de quelques anses basses, telle l'embouchure de l'Huveaune et principalement le golfe de Fos. Pour une large part, ces zones sont «figées» par des aménagements «lourds», comme des infrastructures routières, des digues et des bassins portuaires. La perspective de l'élévation du niveau de la mer, conjuguée à celle de la modification des houles, laisse imaginer une action érosive accrue sur ces secteurs et soulève la question de l'entretien de ces structures (cas de la digue du large à Marseille, par exemple) ainsi que celle des petites plages (plage de l'Huveaune à Marseille, plage de Cap-Rousset à Carry-le-Rouet, par exemple).

Une autre conséquence de l'élévation du niveau marin pourrait être une extension de l'aire soumise à la salinisation de certains hydrosystèmes côtiers et une exposition aux embruns d'une végétation actuellement épargnée. Cet effet viendrait s'ajouter aux perturbations auxquelles est d'ores et déjà soumise la végétation littorale. Cette végétation est donc extrêmement vulnérable et les

conséquences même indirectes d'une élévation du niveau de la mer pourraient conduire à la disparition de formations végétales très originales comme les phryganes littorales. Aussi, un accompagnement du redéploiement de ces formations pourrait être une solution à envisager (Affre *et al.*, 2015).

L'avancée des connaissances en matière d'écologie de la restauration, science très récente, permet de mieux comprendre les mécanismes accompagnant la recolonisation d'un milieu ou la conquête de nouveaux milieux par les espèces végétales et de se donner des objectifs de restauration atteignables. Pour cela, il est indispensable d'identifier des systèmes écologiques de référence – présents ou passés (et donc d'avoir pu les étudier avant leur disparition) – et de viser une trajectoire écologique réalisable. Le succès d'une restauration écologique est cependant étroitement lié à la résilience des espèces et à l'état de dégradation des écosystèmes concernés. Un retour vers l'écosystème d'origine n'est pas toujours possible et il est nécessaire de se questionner, en plus des attentes écologiques, sur les attentes socio-économiques d'une telle restauration (Lambert-Habib *et al.*, 2011).

L'augmentation des tempêtes, des précipitations et des inondations subséquentes

Le changement de régime des précipitations (quantités, répartition temporelle, intensité) est un des aspects attendus du changement climatique en Méditerranée. Pour Météo-France, le phénomène devrait se traduire par une augmentation des événements extrêmes, en particulier les «épisodes méditerranéens». Il s'agit de pluies violentes et abondantes provoquant des inondations subites, du fait de l'incapacité des sols à absorber le ruissellement et de l'insuffisance des drainages naturels à évacuer les eaux de surface. En contexte littoral méditerranéen, ces orages et ces pluies violents posent d'autant plus de problèmes qu'ils déversent des quantités d'eau importantes sur des espaces urbanisés, souvent imperméabilisés, et des bassins versants dont le lit des cours d'eau a été réduit par endiguement.

Du fait de la grande proximité du rivage avec des reliefs accidentés, le transfert des eaux de surface vers la mer s'effectue très rapidement, provoquant plusieurs problèmes: le déversement en mer de produits et de déchets qui ne peuvent être captés par les réseaux d'assainissement, la paralysie de quartiers, voire de villes entières, et surtout des dégâts matériels et humains. Proche de Marseille, la côte varoise (rade d'Hyères, côte des Maures, embouchure de l'Argens) a récemment connu des événements qui témoignent de l'impact dramatique des fortes précipitations sur le littoral. Concernant la métropole marseillaise, de tels événements ont eu lieu par le passé comme en 1978, 2000 et 2003 (Chalvet et Claeys, 2011) et pourraient fort bien avoir lieu à nouveau. Le bassin versant de l'Huveaune et la partie sud de la rade de Marseille sont tout particulièrement concernés de même que, dans une moindre mesure, le bassin versant du ruisseau des Aygalades et celui du Jarret, dans la partie nord de la ville.

Tous trois constituent d'ailleurs un territoire à risque important d'inondation (TRI) identifié par un arrêté préfectoral de 2012 (DREAL PACA, 2014a; DREAL PACA, 2014b). Le même phénomène d'inondations torrentielles peut affecter les rives de l'étang de Berre, notamment du fait de crues de la Cadière et de ses affluents, au niveau de Vitrolles, Saint-Victoret et Marignane.

Compte tenu du regain d'intérêt pour le littoral, en particulier à Marseille, mais aussi à La Ciotat avec les différentes opérations de renouvellement urbain qui sont menées sur le front de mer, et de la forte fréquentation humaine du rivage, la question du risque d'inondation côtière résultant d'événements extrêmes constitue un sujet sur lequel il convient de travailler. La concentration d'équipements culturels et économiques de taille majeure, drainant des visiteurs en nombres élevés sur le littoral, a-t-elle été pensée en tenant compte de ce risque inondation (auquel on doit ajouter la submersion marine)? Les aménagements récents tels que la Villa Méditerranée, le Mucem (figure 6) ou le centre commercial des terrasses du Port, les quais d'Arenc, qui tous possèdent des parkings et des salles sous le niveau de la mer et à proximité immédiate de celle-ci, sont-ils durables de ce point de vue? Si le risque devait augmenter à l'avenir, comment conviendrait-il d'y faire face?

Le système de collecte des eaux pluviales du centre de Marseille étant unitaire, une des conséquences possibles serait le dépassement des capacités de traitement de la station d'épuration (STEP) et des rejets à la mer plus fréquents d'eaux non traitées avec un risque de contamination chimique et bactériologique. Des bassins de collecte des eaux pluviales de grande capacité ont été construits ces dernières années (bassin de rétention Ganay, Euroméditerranée, Porte d'Aix). Cependant, des systèmes innovants d'évacuation et de traitement des eaux pluviales avec l'optique de leur réutilisation (art. 35-3 de la loi du 3 janvier 1992) peuvent faire l'objet d'un effort de recherche.

L'élévation des températures de l'air, de l'évapotranspiration et du changement du régime des vents

Cette perspective a fait l'objet d'analyses de la part de scientifiques de nombreuses disciplines (santé, droit, écologie, météorologie, etc.) pour anticiper au mieux les effets de phénomènes comme des canicules pouvant affecter considérablement les personnes âgées, les malades et les nouveau-nés dans de grandes villes comme Marseille. Besancenot (2002, 2007), notamment, à la lumière des 300 décès surnuméraires survenus à Marseille lors de la canicule de 1983 ou ceux liés à celle de 2003, évoque des projections de nombre de décès accrus dans le futur par l'augmentation de la vulnérabilité des populations humaines. D'autres études menées à Marseille ont montré que les espaces urbains végétalisés sont moins chauds que les espaces sans végétation, confirmant l'effet régulateur sur la température de la végétation urbaine (Bidet, 2013).

Un des grands enjeux de l'aménagement futur dans Marseille sera donc le maintien et le renforcement de la trame verte grâce aux corridors écologiques



Figure 6. Le Mucem et une partie du front de mer de Marseille rénové : parés pour faire face aux changements induits par le changement climatique? (Crédits : Samuel Robert.)

pour bénéficier du service écosystémique de régulation microclimatique généré par la végétation. Cependant, la zone littorale, plus soumise à un effet modérateur de la mer sur les températures serait potentiellement moins affectée par les effets de l'élévation de la température que la zone continentale. Dans cette perspective, des réflexions sur la génération de nouvelles formes urbaines appropriées pourraient tirer avantage de l'alternance des brises de mer et de terre, dont le régime pourrait être modifié par l'élévation des températures de la mer et à terre.

Innovations énergétiques : boucle d'eau de mer, éoliennes et hydroliennes

Face au réchauffement climatique, le littoral peut être vu comme un espace vulnérable, mais il peut aussi être pensé comme le cadre d'innovations visant à réduire l'empreinte carbone de nos sociétés. La mer est en effet un gigantesque réservoir d'énergie potentielle dont l'exploitation est quasiment inexistante. Diverses technologies ouvrent depuis quelques années des perspectives fort intéressantes pour un littoral tel que celui de la métropole marseillaise. Parmi elles, trois méritent l'attention.

Tirer parti de la température de la masse d'eau constitue une première source d'innovation. À la manière de la géothermie, qui exploite la température élevée d'aquifères situés dans les profondeurs du sous-sol pour préchauffer ou chauffer entièrement des systèmes de chauffage central urbain, la technique des boucles d'eau de mer consiste à exploiter la température de l'eau de mer pour climatiser des bâtiments en été et préchauffer un système de chauffage central en hiver. Également appelé « thalassothermie », ce procédé consiste à transférer l'énergie

de l'eau de mer à un réseau d'eau douce desservant des bâtiments et alimentant les pompes à chaleur eau / eau réversibles qui y sont installées. Après la mise en place d'un tel système à La Seyne-sur-Mer, Marseille s'est dotée de deux usines de ce type dans le cadre de la rénovation urbaine menée sur le périmètre Euroméditerranée⁶. Il s'agit là d'une première qui mériterait d'être étendue. Cela implique toutefois une évaluation des effets possibles de cette circulation d'eau sur les écosystèmes marins et la préservation de la qualité de cette eau avant son retour à la mer.

Une seconde option envisageable sur le littoral consiste en la mise en place de champs d'éoliennes en mer. Le potentiel éolien de la région marseillaise est en effet très conséquent du fait du mistral et de l'alternance des brises. L'implantation d'éoliennes est souvent l'objet de débats à propos de son impact sur le paysage, les fonds marins, la pratique de la pêche, etc. Cependant, indépendamment de la question de l'acceptation de tels projets, il est utile de réfléchir à leur opportunité. Dans le cas du littoral marseillais, des études de faisabilité ont été engagées sur le golfe de Fos-sur-Mer depuis plusieurs années pour la mise en place d'éoliennes off-shore flottantes. Un projet, porté par Nénuphar et le grand port maritime de Marseille, doit consister à installer treize turbines à axe vertical d'ici quelques années. Ce parc pilote est inédit en France et révèle que le littoral peut là encore être un espace d'innovations face au changement climatique. Le rôle du GPMM à cet égard semble déterminant.

La troisième option est celle des hydroliennes, turbines flottantes ou immergées mises en mouvement par l'énergie des courants marins. Comme les éoliennes, elles peuvent provoquer un rejet de la part des riverains et des usagers de la mer. Cependant, l'installation de ce type d'engin se développe et une étude prospective a été demandée par l'État français (RTE, 2013). En Méditerranée, mer sans marée, le potentiel n'a pas été estimé comme suffisamment intéressant. Cependant, le gisement hydrolien marseillais n'est pas définitivement nul. Il pourrait évoluer avec des développements technologiques qui permettraient de tirer avantage des courants du site et de la configuration des côtes.

Conclusion : quel développement durable pour Marseille et son littoral ? Nécessité d'une approche holistique

Incontestablement, l'espace métropolitain marseillais est fortement marqué par son littoral. Les enjeux qui lui sont propres, en matière de fonctionnements et de dynamiques à venir, sont colossaux, car ils relèvent du compromis social et politique pour parvenir à une coexistence intelligente entre des objectifs de développement économique et social et des objectifs de conservation, gestion et restauration des espaces naturels. À cet enjeu majeur s'ajoutent les

6 Usine Thassalia du groupe ENGIE (<https://www.engie.fr/energies-renouvelables/geothermie-marine>) et usine Massileo du groupe EDF (<https://www.massileo.fr>).

diverses incertitudes liées au changement climatique, qui pèsent sur le littoral comme sur les autres composantes du système socio-environnemental de cette métropole (les espaces urbains, l'arrière-pays, l'espace marin, les espaces naturels et la biodiversité).

Au terme de cet exercice réflexif, il nous semble utile de réaffirmer la nécessité d'organiser une approche globale des enjeux et d'éviter le traitement trop sectoriel des différentes facettes de la problématique du changement climatique. Il nous semble également important d'avancer des idées nuancées, car les incertitudes dominent tant en ce qui concerne le fonctionnement des systèmes socio-écologiques que sur les effets induits par le changement climatique. Cependant, ce positionnement modéré ne doit pas amener à esquiver des éventualités qui pourraient se transformer en scénarios possibles. Enfin, il nous paraît indispensable d'articuler les initiatives de la recherche et de renforcer les liens sciences-société. Le programme à l'initiative de cet ouvrage offre cette opportunité d'établir des liens entre scientifiques et acteurs publics, voire plus généralement entre science et société.

Les échanges à instaurer avec les acteurs locaux doivent être propices à une recherche-action, de manière à placer les chercheurs face à la réalité de la complexité de la gestion environnementale et du développement territorial. Parallèlement, les chercheurs investis dans différents dispositifs de recherche doivent coordonner leurs actions. Dans le cas du littoral, l'approche de cet ouvrage peut s'appuyer sur l'OHM « Littoral méditerranéen » qui constitue déjà un cadre et une plate-forme d'échanges entre scientifiques et acteurs publics et privés. La gestion de l'environnement d'une grande ville côtière méditerranéenne telle que Marseille implique modestie et ouverture d'esprit. Il n'y a pas de modèle de ville universel ni de modélisation unique d'un tel système socio-écologique, mais des conceptions et des projets à co-construire et à éprouver au cas par cas.

En résumé

- C'est par son accès à la mer et au commerce avec des pays lointains que Marseille s'est développée et est devenue une agglomération littorale de plus d'un million d'habitants aujourd'hui, bordée d'une côte considérable : près de 250 km de rivage marin et plus de 70 km de rivage lacustre.
- De nombreuses activités économiquement et socialement importantes sont basées sur le littoral marseillais :
 - pêche côtière, bien que devenue secondaire ;
 - fonction portuaire pour le transport de voyageurs et le fret ;
 - industrie de transformation des matières premières importées (dont quatre raffineries de pétrole, usine sidérurgique de Fos, usine d'alumine de Gardanne) ;

- nombreuses entreprises disséminées dans le proche arrière-pays, dans les secteurs de l'agroalimentaire notamment;
- fonction récréative et touristique en développement;
- fonctions écologiques, à la fois terrestres et marines.
- Le littoral marseillais se caractérise à la fois par une richesse et une diversité biologique tant terrestre que marine et par des sites littoraux profondément affectés par les pollutions industrielles héritées ou en activité actuellement. Il existe ainsi une pollution chronique des habitats naturels et un véritable risque de pollutions accidentelles.
- Outre les pressions exercées par les activités industrielles, le littoral marseillais subit des perturbations liées à l'existence même d'une urbanisation importante du rivage, d'un étalement urbain toujours en cours, et d'une augmentation de la fréquentation touristique et récréative.
- Les initiatives de gestion intégrée du littoral marseillais existent mais font face à la persistance du mille-feuille des instances de gestion de la zone et de la multiplicité des structures et des intérêts de chacune : grand port maritime de Marseille, métropole Aix-Marseille Provence, ville de Marseille, conseil départemental 13, parc marin de la Côte bleue, parc national des Calanques, Conservatoire du littoral, ONF, associations et entités privées, etc.
- Principalement rocheux et escarpé, le littoral de la métropole Aix-Marseille paraît peu soumis au risque de submersion en dehors de quelques anses basses, tels l'embouchure de l'Huveaune et le golfe de Fos.
- En revanche, la végétation littorale est extrêmement vulnérable et les conséquences même indirectes d'une élévation du niveau de la mer pourraient conduire à la disparition de formations végétales très originales comme les phryganes littorales ou les encorbellements de lithophyllum.
- Météo-France anticipe une augmentation des « épisodes méditerranéens », pluies violentes et abondantes provoquant des inondations subites aggravées par l'artificialisation des sols urbains.
- La zone littorale serait potentiellement moins affectée par les effets de l'élévation de la température que la zone continentale du fait de l'effet modérateur de la mer sur les températures.
- Deux usines utilisant des boucles d'eau de mer ont été mises en exploitation à Marseille depuis 2016 pour exploiter la température de l'eau de mer pour la climatisation de bâtiments (refroidissement et chauffage). L'installation d'éoliennes off-shore flottantes en est au stade d'études de faisabilité sur le golfe de Fos-sur-Mer. Quant au potentiel hydrolien (énergie des courants et vagues), il n'a pas été estimé comme suffisamment intéressant en Méditerranée, mer sans marée. De manière générale, les énergies renouvelables sont sous-développées dans la région.

Chapitre 7

Le milieu marin autour de Marseille

Patrick Raimbault, Charles-François Boudouresque,
Daniela Bănaru, Stéphanie Jacquet, Delphine Thibault

MIO

Nardo Vincente

IMBE

Frédéric Gazeau, Rodolphe Lemée

IMEV

Bruno Andral, François Galgani

Ifremer

Pierre Boissery

Agence de l'Eau Rhône Méditerranée et Corse

Jean-Charles Lardic

Ville de Marseille¹

Introduction : le milieu marin face au changement global

L'océan mondial occupe environ 71 % de la surface de la planète, dont à peine 1 % pour la mer Méditerranée. Encore largement incomplètement explorés, les océans sont considérés comme de véritables réservoirs de biodiversité dont 70 à 80 % resteraient à découvrir (Costello *et al.*, 2010). Mais la biodiversité marine est déjà fortement dégradée par la surexploitation des ressources, la perte d'habitat, l'introduction d'espèces, le réchauffement climatique, l'hypoxie, l'acidification, et c'est en Méditerranée qu'elle est la plus menacée (Costello *et al.*, 2010; Lejeune *et al.*, 2010). Les caractéristiques de la Méditerranée – faible volume, peu d'échanges avec les océans, grande influence continentale, population dense tout autour du bassin, 25 % du trafic maritime mondial, etc. – font que les forçages anthropiques y sont exacerbés. Située entre le climat aride de l'Afrique du Nord et le climat tempéré et pluvieux de l'Europe centrale,

¹ Avec la participation, pour MIO, d'Aurélie Blanfuné, Chia-Ting Chen et Sandrine Ruitton; pour Créocéan, d'Olivier Herlory et Déborah Mille; ainsi que de Christophe Monnin (GET).

elle connaît des processus climatiques tropicaux (sécheresses, crues, etc.) comme des événements extrêmes de latitudes moyennes (vents puissants, gel, etc.). Près de 400 millions d'habitants vivent sur ses bords dans une vingtaine de pays, dont 100 millions en zone côtière et environ 120 millions de visiteurs par an. Pour subvenir à leurs besoins, les activités terrestres (agricoles, domestiques, commerciales et industrielles) génèrent de grands volumes d'eaux usées et des flux de nutriments, de matières organiques, de substances toxiques et d'agents pathogènes perturbants pour les environnements marins qui en sont le réceptacle ultime. Le lien entre environnement marin, activités économiques et cadre de vie est donc évident et constitue un véritable enjeu de développement durable.

Le changement global concerne les phénomènes naturels ou d'origine anthropique ayant des conséquences à une échelle planétaire et à très long terme. Ces changements incluent bien entendu le changement climatique, mais aussi de nombreux changements environnementaux. À l'échelle de la mer Méditerranée, le changement global peut avoir des conséquences amplifiées par rapport au reste des océans, en particulier à cause du caractère isolé du bassin. À ce titre, la Méditerranée est un très bon modèle pour la compréhension des conséquences du réchauffement climatique et de l'impact anthropique sur le littoral. L'objet de ce chapitre est d'identifier les effets du changement global sur le milieu marin, avec un focus dans la région marseillaise, et de faire un état des lieux des connaissances sur leurs conséquences.

La biodiversité en Méditerranée

Trois types de biodiversité : spécifique, fonctionnelle, organisationnelle

La Méditerranée est un « point chaud » (*hotspot*) de la biodiversité mondiale, aussi bien en milieu terrestre (traitée en détail dans le chapitre 5) qu'en milieu marin (traitée en détail ici).

En ce qui concerne la diversité spécifique marine, c'est-à-dire la richesse en espèces, 10 000 à 12 000 espèces benthiques et pélagiques ont été recensées, sachant que l'inventaire des espèces présentes est encore très incomplet (Boudouresque, 2004; Bianchi *et al.*, 2012). Ainsi, avec à peine 1 % de la surface et moins de 0,3 % du volume de l'océan mondial, la Méditerranée héberge presque 10 % de la diversité spécifique marine planétaire.

La faune et la flore méditerranéennes (diversité spécifique) sont constituées par six ensembles d'inégale importance. On distingue :

- 1) les espèces atlantiques, dominantes. Exemples probables : la laminaire *Laminaria ochroleuca* (phéophycées, straménopiles), le poisson *Sarpa salpa* (téléostéen) et l'oursin *Paracentrotus lividus* (échinodermes);
- 2) les espèces néo-endémiques (< 5,3 Ma) dont l'ancêtre est une espèce atlantique. La Méditerranée fonctionne comme une machine à fabriquer des espèces (Bianchi, Morri, 2000; Lejeusne *et al.*, 2010) et le nombre d'espèces endémiques y est particulièrement élevé, par rapport à d'autres

- mers et océans ; cette catégorie pourrait constituer le principal ensemble de la flore et de la faune méditerranéennes ;
- 3) les espèces paléo-endémiques (> 5,3 Ma) qui existaient dans la mer Téthys, avant l'isolement de la Méditerranée, et qui n'existent plus en dehors de la Méditerranée. L'exemple le plus emblématique est celui de la posidonie *Posidonia oceanica*. La façon dont elle a survécu aux crises messiniennes (il y a 5,3 Ma) reste un mystère ;
 - 4) les espèces pantropicales et indopacifiques. Peu nombreuses en Méditerranée, il s'agit surtout d'espèces introduites du fait de l'aquaculture et originaires du Pacifique nord-ouest (Japon, Corée), ou d'espèces entrées en Méditerranée par le canal de Suez ;
 - 5) les espèces cosmopolites, ensemble en partie artificiel car sauf quelques espèces de mammifères marins, il est exceptionnel qu'une espèce soit présente naturellement dans toutes les mers de la planète, ou même dans la plupart d'entre elles. Généralement, il s'agit soit d'un complexe d'espèces « cryptiques », que des recherches génétiques ultérieures feront éclater en plusieurs espèces, soit d'une espèce originaire d'une région déterminée, qui a été introduite par l'homme dans une grande partie du monde ;
 - 6) les espèces introduites par l'aquaculture, le transport sur les coques de navires, les eaux de ballast, le canal de Suez, etc. (Boudouresque, Verlaque, 2002a et 2012 ; Galil, 2008). Elles ne constituent pas un ensemble homogène du point de vue des affinités biogéographiques.

En ce qui concerne la diversité fonctionnelle, la Méditerranée est caractérisée par son oligotrophie. Il en résulte que la plupart des producteurs primaires pélagiques et benthiques, en particulier la posidonie *Posidonia oceanica* et la plupart des espèces des genres *Cystoseira* et *Sargassum* (phéophycées) nécessitent peu d'éléments nutritifs, et sont négativement impactées par des eaux eutrophes. La plupart des écosystèmes méditerranéens sont donc caractérisés par la faible représentation du compartiment « herbivores ». Dans l'étage infralittoral, il s'agit surtout de la saupe *Sarpa salpa* (aussi dénommée daurade rayée, daurade jaune ou poisson catalan) et de l'oursin violet *Paracentrodus lividus* ; il en résulte que les macrophytes méditerranéens ont généralement développé peu de défenses chimiques ou mécaniques. Face à l'arrivée d'herbivores introduits, venus de mer Rouge par le canal de Suez, tels que les poissons-lapins *Siganus luridus* et *S. rivulatus* et l'oursin diadème commun *Diadema setosum*, le surpâturage des macrophytes est massif (Sala *et al.*, 2011 ; Bianchi *et al.*, 2014).

En ce qui concerne la diversité organisationnelle, la Méditerranée est caractérisée par une grande diversité d'écosystèmes, depuis l'étage supralittoral jusqu'à l'étage bathyal (Boudouresque *et al.*, 2014). Certains sont caractéristiques de la Méditerranée, tels l'encorbellement à *Lithophyllum byssoïdes* dans le médiolittoral, le trottoir à vermetes à cheval sur le médiolittoral et l'infralittoral, l'herbier à *Posidonia oceanica* et les forêts à *Cystoseira* spp. dans l'infralittoral,

Encadré 1 - Services écosystémiques : l'exemple des herbiers de posidonie

On nomme services écosystémiques les services que la nature (les écosystèmes) fournit à l'homme, directement (bois, poissons, etc.) ou indirectement. Ces services sont fonction de l'époque historique et de la société humaine. Par exemple, le service « protection des plages contre l'érosion » a une très grande valeur aujourd'hui, mais en avait peu il y a deux siècles, quand les plages n'étaient pas utilisées pour la baignade. De même, le service « séquestration du carbone » est une valeur en hausse constante, dans un contexte d'effet de serre et de réchauffement climatique.

À titre d'exemple d'un écosystème présent dans la région d'Aix-Marseille, les herbiers de posidonie (*Posidonia oceanica*) fournissent potentiellement les services suivants :

- 1) une formidable production de matière végétale et de poissons ;
- 2) une nurserie pour de nombreuses espèces d'intérêt économique ;
- 3) l'exportation de matière organique, sous forme de carbone organique dissous (COD) vers l'écosystème pélagique et sous forme de feuilles mortes vers tous les écosystèmes benthiques, de l'infralittoral au bathyal ;
- 4) la séquestration de carbone au sein de la « matte » (rhizomes imputrescibles et sédiment qui colmate les interstices) ; il s'agit d'une vraie séquestration de carbone, contrairement à la séquestration très provisoire au sein de la biomasse, dans la mesure où elle se situe à l'échelle des temps géologiques. En retirant du carbone de l'environnement, l'herbier de posidonie contribue à atténuer les effets des rejets humains de CO₂. Aux Baléares, l'équivalent de 10 % des émissions de CO₂ est ainsi séquestré chaque année dans la matte ;
- 5) la production vraie d'oxygène, conséquence de la séquestration vraie de carbone ; un végétal ne produit en effet en général pas d'oxygène, dans la mesure où la reminéralisation de la matière organique consommera autant d'oxygène que ce que la photosynthèse a produit. S'il y a de l'oxygène dans l'atmosphère, c'est parce que, au cours des temps géologiques, du carbone a été séquestré sous forme de charbon, tourbe et pétrole ;
- 6) la production d'un composé chimique organosulfuré (le DMSP) qui, transformé en sulfure de diméthyl (DMS), contribue à la formation des nuages et au contrôle du climat ;
- 7) la fabrication du sable d'origine biologique (restes des organismes calcifiés qui y ont vécu) ; ce sable alimente les plages ; il est d'autant plus précieux que les fleuves apportent en mer beaucoup moins de sédiments qu'autrefois, quand ils n'étaient pas interrompus par des barrages ;

- 8) la fixation des fonds meubles, qui réduit la re-suspension des sédiments et donc la turbidité;
- 9) la protection des plages contre l'érosion par l'amortissement de la force de la houle;
- 10) la protection des plages contre l'érosion par l'accumulation des feuilles mortes de posidonies sur les plages («banquettes»), l'érosion des plages étant en partie due au fait que ces banquettes sont ramassées;
- 11) l'édification des dunes (essentielle au maintien des plages) et l'apport d'azote à la végétation dunaire (Pergent *et al.*, 2012; Boudouresque *et al.*, 2016a et 2017a) par les feuilles mortes de posidonie.

et le coralligène à cheval sur l'infralittoral et le circalittoral (Boudouresque, 2003). D'autres écosystèmes, sans être spécifiques à la Méditerranée, y présentent des particularités uniques: le complexe dune-plage-banquettes de posidonies, les grottes sous-marines, le détritique côtier, les canyons sous-marins, etc. (Rastorgueff *et al.*, 2015; Boudouresque *et al.*, 2017a).

Posidonie et coralligène : deux écosystèmes clés de la Méditerranée

L'un des écosystèmes clés de la Méditerranée est l'herbier à *Posidonia oceanica* (posidonie). Il caractérise le benthos de l'étage infralittoral. Grâce à une gestion très efficace de l'azote (recyclage), et à son association avec des bactéries fixatrices d'azote moléculaire (le gaz «inerte» qui compose en grande partie notre atmosphère), la posidonie produit plus de matière végétale par hectare que tous les autres écosystèmes marins et terrestres. En outre, en exportant ses feuilles mortes, l'herbier de posidonie contribue à nourrir tous les autres écosystèmes marins de Méditerranée, de l'infralittoral au bathyal (plus de 2000 m de profondeur). Enfin, il contrôle l'écosystème pélagique côtier (Boudouresque *et al.*, 2012, 2016a et 2017a). Les services écosystémiques que fournit l'herbier de posidonie sont détaillés dans l'encadré 1.

Un autre écosystème benthique emblématique de la Méditerranée est le coralligène. Il se développe entre les étages infralittoral et circalittoral, dans des biotopes peu éclairés. C'est un bioconcrétionnement édifié par des algues calcaires rouges et des animaux calcifiés (bryozoaires), sur lequel se développent des forêts animales (les gorgones *Paramuricea clavata* et *Eunicella* spp., les éponges *Axinella polypoides*) et végétales (*Cystoseira zosteroides*, *Peyssonnelia* spp.). Le mérout *Epinephelus marginatus* est l'un des poissons symboles du coralligène; il avait presque disparu des côtes françaises, avant que des Aires marines protégées (AMP) telles que le parc national de Port-Cros soient créées et qu'un moratoire (depuis 1993) interdise sa chasse sous-marine et sa pêche aux hameçons (Harmelin, Ruitton, 2010; Ruitton *et al.*, 2014; Boudouresque *et al.*, 2017c).

Érosion de la biodiversité en Méditerranée

Malheureusement, de nos jours cette biodiversité s'érode, à cause de l'impact des activités humaines. Il n'y a pas d'espèces éteintes en Méditerranée, mais de nombreuses espèces sont éteintes localement. C'est le cas du phoque moine *Monachus monachus*, présent jusqu'au milieu du xx^e siècle dans le massif des Calanques, et aujourd'hui éteint en Méditerranée occidentale. De même, la patelle ferrugineuse ou arapède géant *Patella ferruginea*, qui peut atteindre 11 cm de diamètre et qui vit dans l'étage médiolittoral, un peu au-dessus du niveau de la mer, a été présente dans le massif des Calanques, comme en témoignent des coquilles exposées au muséum d'Histoire naturelle de Marseille. Elle a aujourd'hui disparu des côtes de Provence.

De nombreuses espèces d'algues brunes des genres *Cystoseira* et *Sargassum* sont éteintes sur la Côte d'Azur ou en Catalogne française. *Sargassum acinarium* et *S. hornshichii* ont disparu dans les Bouches-du-Rhône.

D'autres espèces, tout en restant présentes, sont éteintes fonctionnellement, ce qui veut dire qu'elles ne peuvent plus jouer leur rôle dans le fonctionnement des écosystèmes. C'est le cas de nombreuses espèces de requins et de *Cystoseira* (Ferretti *et al.*, 2008; Thibaut *et al.*, 2015). La diversité fonctionnelle est bouleversée par la surpêche des prédateurs situés au sommet des chaînes alimentaires et par l'arrivée d'espèces introduites, herbivores ou puissamment défendues d'un point de vue chimique (Boudouresque *et al.*, 2005a et 2017b). Enfin, la diversité organisationnelle est menacée par la disparition en cours de certains écosystèmes ou communautés caractéristiques de la Méditerranée, comme l'encorbellement à *Lithophyllum byssoides* (montée du niveau de la mer), la forêt à *Cystoseira* (surpâturage) et la forêt de gorgones (épisodes de canicule) (Perez *et al.*, 2000; Thibaut *et al.*, 2015; Blanfuné *et al.*, 2016a et 2016b) (voir plus loin « Espèces invasives »).

C'est à Marseille que l'herbier à *Posidonia oceanica* a le plus régressé, par rapport à l'ensemble des côtes françaises: il a sans doute été présent dans le Lacydon (l'actuel Vieux-Port), à l'arrivée des Grecs, il y a 2600 ans, d'où il a totalement disparu; entre L'Estaque et La Joliette, il a été enseveli sous les terrains gagnés sur la mer et noyé par les digues et les bassins des ports construits à la fin du xix^e siècle; dans la baie du Prado, il est encore présent, mais a beaucoup régressé, en raison de la pollution et de la mise en place des « nouvelles plages », gagnées sur la mer grâce aux déblais issus de la construction du métro; enfin, dans le massif des Calanques, plus d'un siècle de rejet des eaux usées de Marseille, avant la mise en place de la station d'épuration (entre 1987 et 2008), a contribué à dégrader les herbiers. L'amélioration des conditions du milieu, de L'Estaque aux Calanques, permet aux posidonies de regagner en partie le terrain perdu; cependant cette reconquête naturelle est très lente, car la posidonie est une espèce à croissance très lente (Boudouresque *et al.*, 2012).

Impacts climatiques et anthropiques observés

Réchauffement des eaux : historique et valeurs

La mer Méditerranée est une mer quasiment fermée, avec une température et une salinité élevées comparées aux grandes zones océaniques. La température des eaux de surface, caractérisée par une forte amplitude saisonnière, varie dans le bassin occidental de 12 à 13 °C en hiver à 26 °C en été, tandis que dans l'est du bassin, la température de surface est d'environ 16-17 °C en hiver et 27 °C en été. En été, les eaux sont caractérisées par une couche de surface chaude séparée de la couche profonde plus froide par un gradient thermique appelé thermocline. Sur les côtes du nord de la Méditerranée occidentale, les vents dominants de secteur nord-nord-ouest génèrent des *upwellings* côtiers, qui, en période estivale, provoquent la remontée jusqu'à une dizaine de mètres, voire la disparition temporaire, de la thermocline. Les refroidissements qui en résultent sont forts et brutaux, pouvant atteindre plusieurs degrés Celsius en quelques heures.

Contrairement aux océans, les caractéristiques hydrologiques des eaux profondes de la Méditerranée demeurent constantes, à partir de 250 m environ : dans le bassin occidental, ces eaux profondes ont une température de 12,8 °C et une salinité de près de 38,4, alors que les fonds des grands océans sont caractérisés par une température de l'ordre de 4 °C. Il est à noter que les premières mesures de température en profondeur ont été recueillies au sud du golfe de Marseille, au large de l'archipel de Riou, en 1725 par le comte L. F. Marsigli, à des profondeurs inférieures à 120 brasses (soit 219 m) et à l'aide d'un simple thermomètre de verre à index mobile (Laubier *et al.*, 2003).

L'augmentation de la température des océans observée au cours des dernières décennies l'est également en Méditerranée malgré une disparité des estimations selon les séries de données. La première mise en évidence d'augmentation de la température des eaux de surface et qualifiée comme un reflet du changement global a été réalisée par des mesures régulières sur les côtes de Catalogne espagnole (Pascual *et al.*, 1995 ; Salat, Pascual, 2002), avec une élévation de 1,24 °C en vingt-huit ans à 20 m et de 0,40 °C à 80 m. Le marégraphe installé sur la corniche de Marseille depuis 1895 confirme l'existence d'un réchauffement de surface depuis la fin du XIX^e siècle (Romano *et al.*, 2010), que ce soit pour les mois froids ou chauds. De 1984 à 1993, le programme CAPCOM en baie de Marseille (Romano, 2000) a mesuré une tendance générale et un ordre de succession des années « chaudes » et « froides » similaires. Depuis 1994, le programme national d'observation SOMLIT a standardisé ces mesures et montre une élévation moyenne actuelle des températures des eaux de surface dans la baie de Marseille de l'ordre de 0,3 °C par décennie (voir encadré 2 *infra*).

L'augmentation de la température de surface de la mer Méditerranée a également été modélisée par Lelieveld *et al.* (2012) et Rixen *et al.* (2005) en utilisant des mesures *in situ* obtenues entre 1930 et 1998. Ces modèles avancent un réchauffement d'environ 0,5 °C entre 1980 et 2000. Ils suggèrent

Encadré 2 - SOLEMIO, le site d'observation en baie de Marseille du réseau national SOMLIT

Depuis 1997, l'Institut national des sciences de l'univers (INSU-CNRS) a adopté une stratégie d'observation à long terme du milieu côtier grâce au Service d'observation en milieu littoral (SOMLIT, <http://somlit.epoc.u-bordeaux1.fr/fr>). Ce service a pour but, via l'observation systématique et coordonnée au niveau national, d'homogénéiser l'acquisition avec un pas de temps adapté d'un corps de paramètres simples à mesurer, fiables et communs à tous les sites (Villefranche, Marseille, Banyuls, Arcachon / Bordeaux, La Rochelle, Brest Roscoff et Wimereux). L'objectif de ce réseau est de fournir des données pour une étude comparée de l'évolution des eaux littorales sur les trois façades du littoral français.

Le point SOLEMIO du golfe de Marseille est situé près de l'archipel du Frioul sur des fonds de 60 m (43° 14' 30" N – 05° 17' 30"), à proximité d'une bouée de surface équipée de capteurs hydrologiques qui fournissent des données en temps réel visibles sur le site de l'Institut méditerranéen d'océanologie (<http://smatch.mio.osupytheas.fr>) (figure 1).

Les données relevées depuis plus de vingt ans à Marseille et disponibles librement sur la base nationale indiquent clairement une évolution des caractéristiques des eaux de la baie de Marseille :

- un réchauffement de la température moyenne de surface de l'ordre de 0,6 °C entre 1994 et 2015 suivi par une légère baisse depuis, soit environ 0,3 °C par décennie;
- la salinité, de l'ordre de 37,7 en 1994, atteint maintenant en moyenne une valeur de 38,1;
- les teneurs en matières en suspension comme celles des éléments nutritifs (nitrate, phosphate) à la base de la production primaire ont largement diminué à partir de 2005-2007, période à partir de laquelle le nouveau procédé d'épuration des eaux usées de la ville de Marseille a été mis en place.

également une hausse moyenne de la température de l'air de 3,2 °C au cours du XXI^e siècle pour la région méditerranéenne. Les modèles océaniques permettent en outre d'estimer la sensibilité de l'évolution de la mer Méditerranée au choix du scénario socio-économique (Somot *et al.*, 2006) ainsi qu'au choix des forçages environnementaux (Adloff *et al.*, 2015). Les simulations concluent à une élévation de la température de surface de la mer entre 2 et 4 °C pour la fin du XXI^e siècle (figure 2). Ce réchauffement significatif serait accompagné par une augmentation de la salinité (Herrmann *et al.*, 2008), et ces évolutions

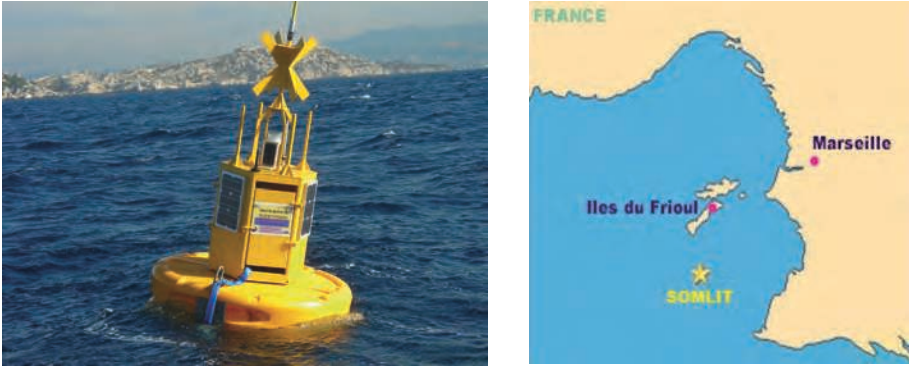


Figure 1. À gauche la balise de mesure, et à droite la position de la balise en jaune.

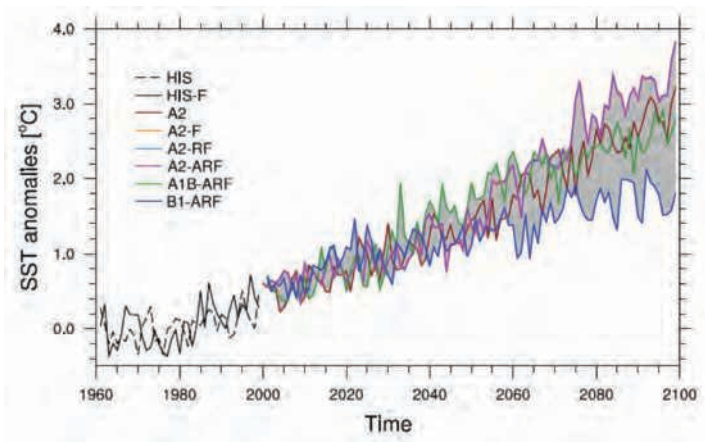


Figure 2. Estimation de l'évolution des températures de surface moyennes en Méditerranée pour la période 2000-2100. Les mesures historiques obtenues entre 1960 et 2000 sont dessinées en gris. (Source : d'après la modélisation proposée par Adloff *et al.*, 2015.) (Crédits : Fabrice Garcia.)

combinées auraient alors pour conséquence un affaiblissement de la formation et de l'oxygénation d'eaux profondes.

Les eaux profondes méditerranéennes apparaissent également comme de bons traceurs de l'impact climatique. L'hypothèse d'un réchauffement global des eaux de la Méditerranée a été avancée pour la première fois il y a une trentaine d'années, à partir des données hydrologiques acquises entre 1959 et 1989 (Béthoux *et al.*, 1990, 1998 et 1999). Ces auteurs ont ainsi montré l'existence d'un accroissement de la température des eaux profondes (de l'ordre de 500 à 1000 m de profondeur) d'environ 0,03 °C par décennie. À Marseille, de telles profondeurs se trouvent assez près des côtes, à quelques dizaines de kilomètres, et un tel accroissement, même s'il est dix fois moindre que l'accroissement de la température en surface, n'en demeure pas moins significatif, car il s'applique à des masses d'eau très importantes et reflète une accumulation calorifique énorme.

À noter que, parallèlement à cette augmentation de la température, les eaux profondes seraient de plus en plus salées. Il a été avancé que cet accroissement de la salinité des eaux profondes méditerranéennes pourrait entraîner une augmentation du flux d'eau profonde sortant à Gibraltar vers l'océan Atlantique et pouvant modifier la circulation du Gulf Stream avec comme conséquence un refroidissement du climat en Europe du Nord (Johnson, 1997).

C'est donc l'ensemble de la mer Méditerranée qui se réchauffe, en moyenne de 0,3 °C par décennie en surface et de 0,03 °C par décennie en profondeur.

Conséquences du réchauffement sur le milieu marin

La température est un des facteurs essentiels dans la répartition géographique des organismes. On distingue ainsi des espèces capables de supporter des gammes de température importantes (ce sont les espèces eurythermes); à l'inverse, d'autres ont des tolérances strictes (elles sont sténothermes). Selon Maxwell *et al.* (2016) et Boudouresque *et al.* (2017b), le réchauffement climatique n'est pas, pour le moment, la principale cause de changement de la biodiversité en Méditerranée, car la surexploitation, la dégradation des habitats et les invasions biologiques sont bien supérieures. Il est cependant attendu que l'importance relative de l'impact climatique croisse d'ici à la fin du XXI^e siècle.

Selon leur affinité chaude ou froide, les espèces mobiles peuvent migrer (Lejeusne *et al.*, 2010). Par exemple, le barracuda *Sphiraena viridensis*, la girelle paon *Thalassoma pavo*, le baliste *Balistes capiscus* et la blennie pilicorne *Parablennius pilicornis*, espèces thermophiles, étendent leur aire de répartition vers le nord de la Méditerranée qui devient plus chaud. En revanche, les espèces d'eaux froides qui se trouvent à leur limite nord de tolérance écologique pourraient être impactées négativement: diminution plus ou moins marquée des populations, comme pour le krill *Meganyctiphanes norvegica*, avec des conséquences possibles sur le rorqual commun, cétacé dont c'est la principale ressource alimentaire (Gambaiani *et al.*, 2009). Pour des espèces endémiques de Méditerranée, la diminution de l'aire de répartition peut être synonyme d'extinction. Le crustacé *Hemimysis speluncola*, abondant dans les années 1990 dans les grottes sous-marines obscures et notamment celles des Calanques de Marseille, a quasiment disparu de Méditerranée (il est peut-être encore présent dans le nord de l'Adriatique) et a été remplacé par *Hemimysis margalefi* (Chevaldonné, Lejeusne, 2003).

Certaines espèces sont favorisées par une augmentation de température pour certains aspects de leur biologie. Par exemple, dans l'Adriatique, la croissance du sclérectiniaire (corail) *Cladocora caespitosa* s'accroît quand la température augmente (Kružić *et al.*, 2012). Il convient toutefois d'être prudent quant à des corrélations apparentes: le mérrou brun *Epinephelus marginatus* est une espèce qui se reproduit mieux et plus fréquemment au sud de la Méditerranée qu'au nord. En France (Harmelin-Vivien *et al.*, 2010), il avait pratiquement disparu du fait de la chasse au fusil harpon. Or, la reconstitution de ses populations et

la fréquence des épisodes de reproduction ne sont pas dues au réchauffement, comme le prétendent certains chasseurs sous-marins, mais à l'effet combiné de l'interdiction de sa pêche à l'hameçon et au harpon (depuis 1993) et de la création d'aires marines protégées (Boudouresque, 2003).

Les espèces fixées, dans l'impossibilité de se déplacer, sont particulièrement vulnérables en cas de réchauffement trop important ou d'anomalies thermiques qui peuvent entraîner des perturbations physiologiques et le développement de *Vibrio* pathogènes (Bally, Garrabou, 2007). Les épisodes de canicule estivale observés en 1999, 2003 et 2006 ont été à l'origine d'une mortalité importante de colonies de corail *Corallium rubrum* (Garrabou *et al.*, 2009; Crisci *et al.*, 2011) avec par exemple un pourcentage moyen de colonies de gorgones *Paramuricea clavata* affectées de l'ordre de 30 % (allant de 2 % à environ 80 % selon les sites) pour l'événement de 2003 (Garrabou *et al.*, 2009).

Conséquences de la montée du niveau de la mer

Les changements globaux induisent une élévation du niveau de la mer qui est aujourd'hui estimée autour de 1 cm par décennie en Méditerranée et qui s'accélère.

L'impact de cette élévation peut influencer la répartition des espèces photosynthétiques marines. Dans le cas de l'herbier à *P. oceanica*, la montée du niveau de la mer ne constitue pas un vrai problème, contrairement à d'autres écosystèmes : ce qu'il perd en profondeur, il le récupère en surface, en progressant vers la côte. Pour d'autres comme les encorbellements calcaires à *Lithophyllum byssoides* (encore appelés « trottoirs »), les conséquences sont plus négatives.

En effet, les trottoirs poussent dans l'étage médiolittoral, à un niveau très précis (de l'ordre de la dizaine de centimètres) au-dessus du niveau moyen de la mer. Leur édification par des algues rouges calcaires est un processus pluriséculaire, qui correspond à des périodes de relative stabilité du niveau de la mer. La dernière de ces périodes est le petit âge glaciaire du XIII^e au XVIII^e siècle, qui représente une pause dans la montée continue du niveau de la mer à une vitesse moyenne de 0,5 m par siècle (avec de très larges variations) commencée au dernier maximum glaciaire il y a environ 20 000 ans (Faivre *et al.*, 2013; Lambeck *et al.*, 2014). La vitesse actuelle de montée du niveau de la mer semble être supérieure à la résilience des encorbellements. Dans la région de Marseille, on trouve des trottoirs spectaculaires sur l'île Riou par exemple, dans le massif des Calanques, qui sont déjà en partie submergés et dégradés par les organismes bio-érodeurs.

Le stockage du carbone et l'acidification

Ce réchauffement global est susceptible d'avoir des répercussions sur le cycle du carbone par des modifications de ses capacités de dissolution du CO₂ et du fonctionnement des réseaux trophiques.



Groupe d'organismes	Effet moyen	
Algues calcaires		 Effet négatif  Effet positif  Pas d'effet détectable
Coraux		
Mollusques		
Echinodermes		
Algues molles/plantes marines		

Tableau 1. Effet moyen observé de l'acidification sur différents groupes d'organismes marins et les processus biologiques associés en mer Méditerranée. (Source : informations issues de la méta-analyse menée par Zunino *et al.*, 2017 sur plus de soixante études publiées.)

En effet, le réchauffement des eaux n'est pas la seule conséquence des émissions humaines de dioxyde de carbone (CO₂). Les mers et les océans absorbent environ le quart du CO₂ rejeté dans l'atmosphère par les activités humaines (24 % sur la période 1870-2016; Le Quéré *et al.*, 2018). Cela limite la quantité de CO₂ s'accumulant dans l'atmosphère et modère ainsi le réchauffement climatique. Toutefois, cette intrusion de CO₂ dans l'eau de mer bouleverse sa chimie, notamment en augmentant son acidité (diminution de son pH). Ce phénomène, couramment appelé « acidification des océans », englobe en réalité divers changements supplémentaires : une augmentation de la concentration en CO₂ et en ions bicarbonates, ainsi qu'une diminution de la concentration en ions carbonates. Le rapport du GIEC de 2013 indique une diminution globale du pH de surface des océans de l'ordre de 0,1 unité depuis le début de l'ère industrielle, ceci correspondant à une augmentation d'acidité de 26 % (rappelons que le pH se décrit sur une échelle logarithmique). Les modèles projettent une diminution supplémentaire du pH à la fin du XXI^e siècle comprise entre 0,06 et 0,32 unité, en fonction du scénario socio-économique à l'œuvre et des actions menées d'ici là pour réduire nos émissions de CO₂ dans l'atmosphère. Cette diminution maximale prévue du pH de surface de l'océan correspondrait à un doublement de l'acidité de l'eau de mer.

La mer Méditerranée, en raison du taux de renouvellement rapide de ses eaux profondes (de l'ordre de quelques décennies), a une forte capacité pour transporter et stocker du CO₂ atmosphérique en profondeur. En conséquence, l'augmentation du carbone inorganique d'origine anthropique dissous en Méditerranée est parmi les plus élevées de celles estimées jusqu'à présent dans l'océan mondial (Merlivat *et al.*, 2018).

Néanmoins, en raison de son fort caractère alcalin (Palmiéri *et al.*, 2015), les diminutions de pH de surface en Méditerranée ne diffèrent pas vraiment de celles estimées pour l'océan global (Marcellin Yao *et al.*, 2016; Merlivat *et al.*, 2018). Parmi les rares séries de mesure du pH sur la zone littorale méditerranéenne, les mesures hebdomadaires réalisées dans la rade de Villefranche-sur-Mer depuis 2007 dans le cadre du réseau SOMLIT² estiment cette diminution du

² <http://somalit.epoc.u-bordeaux1.fr/fr>.

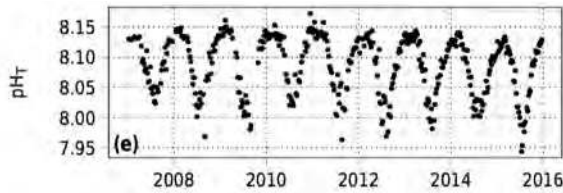


Figure 3. Évolution du pH en surface, exprimé sur l'échelle totale (pH_T), à l'entrée de la rade de Villefranche-sur-Mer. (Source: Kapsenberg *et al.*, 2017.)

pH à environ 0,03 unité par décennie (voir encadré 2 *supra* et figure 3). Plus importante que celles mesurées en mer ouverte, cette diminution est liée aussi au réchauffement plus rapide de l'eau mis en évidence par cette série de données (0,07 °C par an; Kapsenberg *et al.*, 2017). La série de la rade de Marseille débute en 2008 et ne permet donc pas d'estimer de tendance pour le moment.

Sans actions de grande ampleur pour limiter les émissions de CO_2 , les plus récentes projections de diminution du pH pour la fin du xxi^{e} siècle dans le bassin ouest-méditerranéen indiquent des valeurs légèrement plus élevées que pour l'océan global (-0,33; Goyet *et al.*, 2016).

Alors que les conséquences chimiques de l'accumulation de CO_2 d'origine humaine dans les océans sont connues avec une grande précision, ses effets sur la biologie et la santé des écosystèmes marins le sont beaucoup moins. Tous les changements à venir de la chimie des carbonates, que ce soit l'augmentation d'acidité (augmentation de la concentration en protons dans l'eau), du CO_2 , mais également la diminution de la concentration en ions carbonates auront potentiellement des impacts positifs ou négatifs sur les organismes et communautés marines. Par exemple, les ions carbonates étant indispensables à certains organismes marins pour fabriquer leur coquille ou leur squelette calcaire (coraux et coralligènes, mollusques, certaines espèces de phytoplancton, etc.), il existe de fortes craintes d'un impact négatif de l'acidification sur ces organismes (tableau 1) (Kroeker *et al.*, 2013; Martin, Gattuso, 2009).

L'hypothèse d'une régression, voire d'une disparition de ces organismes calcaires avec la diminution du pH dans les décennies à venir en Méditerranée est confortée par les études menées ces dix dernières années sur des sites naturellement acidifiés par des sources de CO_2 d'origine volcanique dont le plus étudié est celui d'Ischia dans le sud de l'Italie. Parmi ces études, Hall-Spencer *et al.* (2008) ont été les premiers à montrer que, lorsque le pH diminue – de 0,3 en moyenne et de 0,7 au maximum –, les végétaux non calcifiants (par exemple les posidonies) prolifèrent alors que les algues corallines (et autres animaux calcaires) disparaissent. D'après cette étude, la prolifération de certains végétaux à faible pH serait potentiellement causée par une augmentation de la photosynthèse en réponse à l'augmentation de la pression partielle en CO_2 , mais plusieurs résultats d'études récentes ne permettent pas de vérifier

cette hypothèse avec certitude (Cox *et al.*, 2015 et 2016). Il semblerait plutôt que cette prolifération d'algues molles ou de plantes avec la diminution du pH soit une conséquence de la disparition des organismes calcifiants et une libération de leurs niches écologiques. Sur ce point, les études menées ces vingt dernières années peinent à fournir des indications claires et scientifiquement solides du fait de protocoles expérimentaux ne permettant souvent d'étudier que des espèces isolées de leur milieu naturel et en excluant les interactions biologiques qui peuvent y avoir lieu (Riebesell, Gattuso, 2015). Une autre lacune à combler afin d'évaluer le devenir des communautés littorales est de mener des expériences combinant les différents changements globaux entre eux (réchauffement, acidification, désoxygénation) et avec des changements plus locaux comme l'eutrophisation ou la sédimentation.

Maladies et parasites

Les bactéries pathogènes et les parasites sont des composants essentiels du fonctionnement des écosystèmes. Contrairement au ressenti populaire, les écosystèmes « en bonne santé » sont plus riches en parasites que les écosystèmes perturbés; c'est le cas de la réserve naturelle de Scandola, en Corse, région de Méditerranée la plus riche en digènes (vers plats) parasites de téléostéens (Bartoli *et al.*, 2005; Boudouresque, Thibaut, 2018). La stratégie d'un parasite n'est pas de tuer son hôte, car il meurt avec lui. Au cours de l'évolution, dans une région et chez un hôte donné, une virulence moyenne a donc été sélectionnée qui permet de :

- 1) ne pas tuer prématurément l'hôte;
- 2) rendre disproportionnée et inutile une réaction coûteuse de défense, chez l'hôte (Combes, 2001).

Lorsqu'un parasite provoque des mortalités massives chez un hôte, il y a donc une présomption sérieuse qu'il s'agisse d'un parasite introduit, ou d'un « transfert biologique » (changement d'hôte favorisé par une perturbation); dans les deux cas, sa virulence n'est pas adaptée aux nouveaux hôtes.

Des mortalités massives d'organismes marins, liées à un pathogène ou à un parasite, ont été observées en Méditerranée et dans le reste du monde. Par exemple, dans les années 1980, l'oursin comestible *Paracentrotus lividus* a été décimé par la « maladie des oursins chauves »; l'huître européenne *Ostrea edulis* a été sévèrement frappée par un parasite de l'huître japonaise *Magallana gigas*, sans effet sur cette dernière avec laquelle il a co-évolué, mais létal pour l'huître européenne vers laquelle il a été transféré (via l'aquaculture). Les mortalités massives constituent certainement un processus naturel; toutefois, il semble que leur fréquence soit en forte augmentation, et qu'il ne s'agisse pas d'un artefact lié à une plus grande pression d'observation: le réchauffement et surtout les activités humaines (transport maritime, aquaculture, introduction d'espèces et transferts biologiques vers de nouveaux hôtes) en seraient responsables (Harvell *et al.*, 1999).



Figure 4. Le mollusque emblématique de Méditerranée *Pinna nobilis*, ou grande nacre, dans un herbier à *Posidonia oceanica*. (Crédits : Nardo Vicente.)

Un exemple récent est celui de la grande nacre de Méditerranée (*Pinna nobilis*), l'un des plus grands bivalves au monde (jusqu'à 120 cm) (figure 4). On le rencontre de 0,5 m à 60 m de profondeur. Cette espèce longévive (plus de quarante ans), endémique de la Méditerranée, bien présente dans le golfe de Marseille, a longtemps été menacée par le ramassage par les plongeurs en guise de trophée ou de souvenir, par les ancrages des bateaux, par le chalutage, et par l'aménagement du littoral qui a fait disparaître des zones de reproduction. Elle est aujourd'hui une espèce protégée (Vicente, de Gaulejac, 1993; Rouanet *et al.*, 2015). Mais depuis l'automne 2016, un parasite décime les populations de nacres du littoral méditerranéen espagnol. Il s'agit de *Haplosporidium pinnae* (Catanese *et al.*, 2018), qui présente toutes les caractéristiques d'une espèce introduite bien que, comme c'est souvent le cas, elle ait été décrite dans la région d'introduction (la Méditerranée) avant sa région d'origine, et avant que l'hôte avec lequel elle a co-évolué (et chez lequel elle est donc peu virulente) ne soit connu. De l'Espagne, les mortalités se sont étendues en direction de la Corse (automne 2017), puis vers l'ensemble des côtes françaises et italiennes avec des taux de mortalité de 80 à 100 % (Vicente, 2020). Actuellement, ces mortalités s'observent sur l'ensemble des côtes de la Méditerranée orientale (Cabanellas-Reboredo *et al.*, 2019; Katsanevakis *et al.*, 2019).

Espèces invasives

Une espèce invasive est une espèce non indigène, introduite et posant des problèmes écologiques, économiques et/ou de santé humaine (figure 5 *infra*).

Une espèce dont l'aire progresse, par exemple à la faveur d'un épisode climatique chaud, n'est pas une espèce non indigène (ni introduite ni invasive), car elle ne remplit pas le critère 2 de la figure 5, à savoir la présence d'une discontinuité géographique entre l'aire d'origine et la nouvelle. C'est le cas par exemple du poisson thermophile *Thalassoma pavo*, indigène en Méditerranée, et dont l'aire a progressé vers le nord de la Méditerranée occidentale.

En Méditerranée, les principaux vecteurs d'introduction sont, par ordre décroissant :

- le canal de Suez (par exemple, les poissons *Siganus luridus*, *S. rivulatus* et *Fistularia commersonii*);
- l'aquaculture (par exemple, la sargasse géante *Sargassum muticum* dans la lagune de Thau);
- le *fouling* sur les coques de navires (par exemple, l'algue rouge *Womersleyella setacea*).

D'autres vecteurs sont à considérer, tels que les eaux de ballast (destinées à stabiliser les bateaux à vide) et le commerce aquariologique (qui a causé par exemple l'introduction de l'algue verte *Caulerpa taxifolia*) (Boudouresque, Verlaque, 2002b; Galil, 2008). En Méditerranée orientale, la plupart des espèces introduites sont des espèces d'affinités chaudes, venues de mer Rouge et entrées en Méditerranée par le canal de Suez, et le réchauffement actuel favorise leur progression vers l'ouest et le nord. En Méditerranée occidentale, la plupart des espèces introduites sont des espèces d'affinités froides, provenant du Pacifique Nord (Japon, Corée) via l'aquaculture des mollusques (Boudouresque *et al.*, 2016b).

Concrètement, l'algue *Caulerpa taxifolia* n'a jamais atteint la baie de Marseille, la plus proche observation étant dans le Var. La raison en est sans doute que l'espèce est très sténotherme et craint les eaux trop froides de Marseille. En revanche, *Caulerpa cylindracea*, une autre espèce introduite, plus eurytherme, est devenue abondante à Marseille, comme dans toute la Méditerranée.

La Méditerranée, avec près d'un millier d'espèces non indigènes, dont plus de 600 sont naturalisées, est la mer du monde la plus fortement impactée par les invasions biologiques (Zenetos *et al.*, 2010 et 2017). Les introductions d'espèces sont liées à l'existence d'un vecteur (bateau et aquaculture par exemple), d'un corridor (ligne de navigation) et d'une « tête de pont » (port, bassin aquacole). Avec l'un des ports les plus anciens et les plus importants de Méditerranée, Marseille a constitué une tête de pont pour les espèces introduites.

Modification des ressources exploitables par la pêche dans la Méditerranée française

Les ressources exploitables en Méditerranée française ont subi durant les dernières décennies des modifications de leur composition en espèces, de leurs

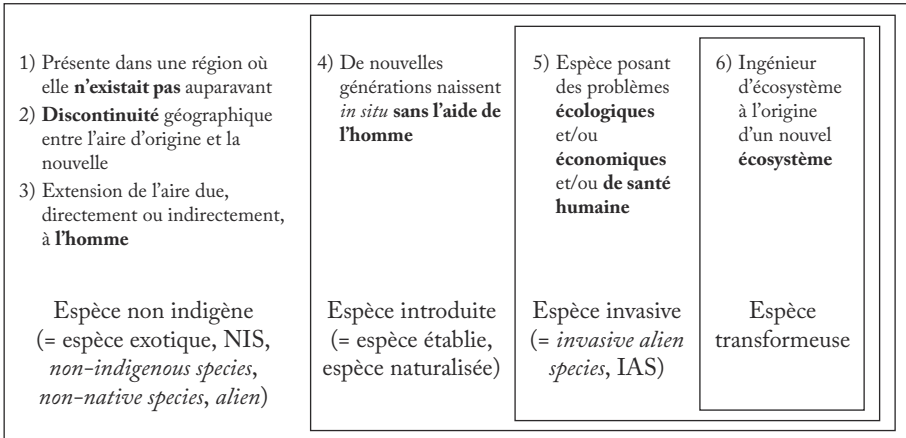


Figure 5. Les termes d'*espèce non indigène*, d'*espèce introduite*, d'*espèce invasive* et d'*espèce transformeuse* sont des concepts « emboîtés », en ce sens que chacun d'eux inclut tous ceux qui le suivent. (Source : modifié d'après Boudouresque, Verlaque, 2012.)

tailles et de leurs biomasses respectives (Van Beveren *et al.*, 2014; Pauly, 2016; Brind'Amour *et al.*, 2016). Des espèces invasives, de plus en plus présentes dans les captures des pêcheries locales, peuvent être des compétiteurs ou des prédateurs potentiels pour les espèces autochtones (sprat, poisson-trompette, barracuda, etc.) (Le Bourg *et al.*, 2015; Bănaru, Harmelin-Vivien, 2018). Pour de nombreuses espèces exploitées, les tailles moyennes diminuent, car la pêche sélectionne les plus grands individus et des adaptations génétiques apparaissent avec des reproductions plus précoces (Ricker, 1981). De plus, les biomasses de nombreuses espèces prédatrices, de grande taille et de haut niveau trophique (requins, raies, etc.), ont beaucoup diminué en lien avec les activités de pêche (Aldebert, 1997; Fernandes *et al.*, 2017). Ceci engendre une diminution du niveau trophique moyen des écosystèmes (Pauly, Zeller, 2016; Piroddi *et al.*, 2017) et peut induire des modifications du fonctionnement des réseaux trophiques (Bănaru *et al.*, 2010; www.indiseas.org pour les données jusqu'à 2009).

Le premier « coupable » envisageable quand les biomasses et/ou les tailles de poissons sont en baisse serait la pêche.

L'amélioration des méthodes de pêche et de navigation a mené historiquement à des situations de surexploitation caractérisées par des diminutions des biomasses ou de raréfaction des espèces exploitées (Faget, 2011). Ceci s'est accentué depuis la fin de la Seconde Guerre mondiale et les statistiques de pêche de la FAO pour la Méditerranée française montrent une augmentation des captures à partir du début des années 1960 (Van Beveren *et al.*, 2016), un maintien des captures élevées malgré des variations interannuelles et une très forte baisse sans retour en arrière depuis 2006 (Bultel *et al.*, 2016). Cette diminution récente est surtout liée à la diminution des captures des espèces planctonophages telles que la sardine et l'anchois. La sardine est pourtant historiquement l'espèce la plus

pêchée dans la région marseillaise et a assuré une pêche de subsistance du XVII^e au XIX^e (Faget, 2011). Traditionnellement, la sardine et l'anchois représentaient en Méditerranée française 50 % des captures (Demanèche *et al.*, 2009). Étant la proie de nombreux prédateurs (poissons, mammifères marins et oiseaux), leur diminution est susceptible de modifier l'ensemble du réseau trophique, au-delà des rendements de pêche (Bănaru *et al.*, 2013; Diaz *et al.*, 2019).

Mais la pêche est-elle le seul « coupable » de la diminution actuelle des ressources exploitables? Les apports anthropiques et/ou le contexte environnemental ne seraient-ils pas aussi en cause ?

Entre le XVII^e et le XIX^e siècle, la pêche était structurée en zone côtière autour de la « mer de Marseille », grande agglomération urbaine impactée par des apports en eaux usées non épurées et par des industries côtières (Faget, 2011). Ces rejets étaient déjà à l'époque pointés du doigt comme sources de contamination par des chercheurs qui avaient commencé à étudier dès 1869 les espèces exploitées par la pêche au sein du premier laboratoire de zoologie et biologie marine à Marseille. La consommation des produits de la mer (coquillages) a d'ailleurs fait des milliers de morts de variole, choléra, fièvre typhoïde entre 1834 et 1933, Marseille étant appelée « ville insalubre » et la mer « empoisonneuse » (Faget, 2011). Ceci a mené à la mise en place en 1953 d'une séparation des eaux usées et des eaux de pluie et à un rejet à Cortiou sans traitement, puis à la création d'une station d'épuration (STEP) avec un traitement physico-chimique à partir de 1987, qui a abouti en 2008 à la mise en place d'un traitement microbiologique censé réduire de 90 à 95 % le rejet de matière organique particulaire (MOP) et la contamination associée (notamment bactéries pathogènes et métaux lourds), même si certains micropolluants échappent à ce traitement (résidus de pesticides, de détergents, de médicaments, et d'hormones) (Augier, 2013).

Des études récentes ont mis en évidence une consommation de la MOP issue de Cortiou par le zooplancton de la baie de Marseille, en particulier lors des épisodes pluvieux ou de vent du sud-est (Bănaru *et al.*, 2014; Millet *et al.*, 2018). Conjointement des données du réseau SOMLIT (1994-2018; voir encadré 2 *supra*) ont montré une réduction importante du phosphate, de la MOP et de la biomasse phytoplanctonique après la mise en place du nouveau traitement des eaux usées (Girault, 2008, données SOMLIT disponibles sur <http://somalit-db.epoc.u-bordeaux1.fr>). Ainsi, la réduction par la métropole de Marseille de ces apports qui alimentent le plancton est probablement une des causes majeures de la diminution du zooplancton (Chen, 2019; Carlotti, comm. pers.) et des poissons planctonophages (sardines, anchois, etc.) à l'échelle locale.

À plus grande échelle, dans le golfe du Lion, la diminution durant la dernière décennie de la taille moyenne et l'amaigrissement des poissons planctonophages tels que les sardines et les anchois ont mis en difficulté les pêcheries (Van Beveren *et al.*, 2014). Ces poissons mangent des proies différentes et plus petites qu'auparavant (Le Bourg *et al.*, 2015), même si Chen *et al.* (2018) montrent qu'ils choisissent les espèces et les tailles de zooplancton les plus intéressantes en valeur

Apport	Par temps sec		Par temps de pluie	
	Volume moyen (m ³ /an)	Flux MES (t/an)	Volume moyen (m ³ /an)	Flux MES (t/an)
Huveaune	54 640 500	258	6 312 384	4 686
Jarret	25 769 000	252	3 384 663	1 654
Aygalades	3 650 000	131	2 011 300	2 770
Émissaires 1 et 2 (assainissement et pluvial)	122 100 636	2 453	25 988 396	4 335

Tableau 2. Flux de matières en suspension (MES) et de contaminants (métaux et composés organiques hydrophobes) par temps sec et par temps de pluie.

énergétique. On peut donc faire l'hypothèse qu'il y a eu un changement dans la communauté planctonique, dont la cause pourrait être la diminution des apports nutritifs par le Rhône (voir plus loin « L'influence du Rhône »), notamment des phosphates, essentiels pour la production primaire marine (Diaz *et al.*, 2001).

La qualité des eaux

Marseille et la gestion des eaux usées urbaines

Si dans l'esprit du grand public la pollution de Marseille est réduite aux apports de la station d'épuration dans les Calanques sur le site de Cortiou (voir détails dans l'encadré 3 *infra*), il convient de rappeler que les vecteurs de pollution sont multiples. Effectivement, le rejet de la station d'épuration à Cortiou (émissaire 1) est un rejet important. Sur cette zone marine, l'exutoire artificiel de l'Huveaune (émissaire 2) est aussi présent. Ainsi, à ce jour, les Calanques ne reçoivent pas que les eaux usées épurées de Marseille, mais aussi les eaux de ruissellement et le pluvial du bassin versant de l'Huveaune. Ces eaux se déversent en mer sans aucun traitement pour la pollution chimique ou pour les macrodéchets (voir plus loin « Les nouveaux risques »). Globalement, si l'on ne prend en compte pour la rade de Marseille ni les apports d'ordre atmosphérique – qui toutefois doivent avoir leur importance en fonction des contaminants recherchés – ni les apports liés aux ports, les principaux vecteurs de contaminants à la mer sont le ruissellement diffus, les cours d'eau Aygalades, Huveaune et Jarret, et le rejet de l'usine de traitement des eaux usées.

Le tableau 2, issu d'un important travail d'évaluation des flux (étude Ifremer « METROC – 2010 »), caractérise les flux de matières en suspension (MES) et de contaminants (métaux et composés organiques hydrophobes) par temps sec et par temps de pluie.

L'assainissement des eaux usées en région Provence-Alpes-Côte d'Azur s'est fortement amélioré au cours de ces vingt dernières années, notamment

Encadré 3 - Eaux usées de Marseille : chronologie des efforts de réhabilitation

En 1887, Marseille est confrontée à des épidémies de choléra, de variole et de fièvre typhoïde. Les eaux usées se déversent dans les rues. Marseille vacille. Pour répondre à cet enjeu sanitaire, le maire de l'époque, Félix Baret, lance des grands travaux à la fin du XIX^e siècle avec la construction du réseau d'assainissement unitaire du centre-ville : 192 km de galeries et de canalisations, mais surtout la création et mise en service du premier émissaire d'une longueur de 12 km. Ces premiers équipements d'assainissement ont la fonction unique de garantir la salubrité des rues et de protéger la population des maladies. Les eaux usées sont envoyées loin des lieux de vie, dans les Calanques, qui reçoivent pendant près de cent ans des eaux usées, sales, polluées, non traitées. La vie marine des Calanques au droit du rejet disparaît.

En 1979, la construction d'un second émissaire d'une longueur de 6 km est engagée pour dévier les eaux de l'Huveaune et du Jarret loin des zones de baignade. Les eaux déviées rejoignent le lieu de rejet des eaux usées dans les Calanques, sur le lieu-dit de Cortiou (figures 6a, 6b et 6c).

En 1987, sous l'impulsion du Plan d'assainissement du littoral de la région Provence-Alpes-Côte d'Azur, le PAL PACA, la station d'épuration de Marseille est mise en service. Elle vise sur deux sites à traiter les eaux usées et les boues résiduelles issues du procédé épuratoire de type physico-chimique. Cette immense « cathédrale » souterraine construite sous le stade Delort reçoit la visite de techniciens de l'Europe entière tellement elle est révolutionnaire pour l'époque. Pourtant les pêcheurs locaux, les plaisanciers et les défenseurs de l'environnement se mobilisent. Ils dénoncent une nappe grisâtre au débouché du collecteur de Cortiou. Et puis, il y a cette odeur désagréable due à l'utilisation de chlorure ferrique pour réduire les matières en suspension.

À la fin des années 1990, le raccordement progressif de seize communes riveraines à Marseille localisées sur son bassin versant de proximité améliore ce dispositif. La quantité d'eaux usées traitées par la station d'épuration augmente, tout comme la quantité de flux de pollution qui est déversée dans les Calanques, où le panache de ces eaux usées de couleur marron clair à marron foncé tranche de façon significative avec le bleu limpide de la Méditerranée. L'image d'un site fortement pollué s'ancre dans l'esprit du grand public, tout comme l'idée d'une station d'épuration défailante et la nécessité de poser un émissaire pour envoyer ces eaux usées le plus loin possible des Calanques.

Géolide est inaugurée en 2008. Cette nouvelle station d'épuration de type biologique beaucoup plus efficace sur les paramètres classiques de

pollution comme les matières en suspension, la demande chimique ou biologique en oxygène. Cette étape fait disparaître la nappe marron à la surface de l'eau. L'odeur est tout au plus celle d'une eau de vaisselle (Boissery, 2014). Sur le fond, le sable est propre, bien oxygéné sur une épaisseur de deux centimètres environ. Des poissons occupent même l'espace à proximité du débouché du collecteur: des bogues, saupes et mulets, bien adaptés à ce type de milieu, mais aussi des sars et quelques loups en train de chasser. Autant de signes qui démontrent une nette amélioration de la qualité des eaux. Pourtant, certaines pollutions ne sont toujours pas réduites sinon éliminées. La solution serait un rejet en profondeur, au-delà de la thermocline, vers 100 à 120 mètres. C'est là qu'à l'interface de l'eau et du sédiment se développe une vie bactérienne susceptible de dégrader de nombreux polluants chimiques. C'est là aussi que seraient éliminées rapidement les bactéries pathogènes humaines et animales comme les staphylocoques, streptocoques et salmonelles.

Enfin, en 2017, un nouveau bassin de rétention des eaux usées et pluviales est venu renforcer le système d'assainissement. Cet ouvrage, avec une capacité de stockage de 50 000 m³, doit permettre de protéger les plages de Marseille, mais aussi de mieux réguler l'arrivée des eaux à la station d'épuration.



Figures 6a, 6b et 6c. Panache du rejet des eaux usées de l'agglomération de Marseille avant la mise en service de la station d'épuration de Marseille. (Source: Agence de l'eau, 2008.)

grâce au Plan d'action pour l'assainissement des années 1980 et la mise en œuvre de la directive européenne Eaux résiduaires urbaines (ERU) de 1991. La qualité des eaux marines comme la qualité des eaux de baignade ont, de fait, gagné en qualité et en sécurisation (voir encadré 4 *infra* pour le suivi de réhabilitation). Pour autant, un système d'assainissement reste un dispositif technique et hydraulique qu'il faut entretenir et gérer. Cela passe aussi maintenant par une gestion au mieux des apports par temps de pluie (le pluvial). Le ruissellement pluvial perturbe le fonctionnement hydraulique des réseaux d'assainissement et peut mettre en péril le processus d'épuration des stations modernes. Il est aussi la cause d'apports importants de contaminants et de bactéries à la mer.

La contamination chimique de la rade de Marseille

En milieu littoral, la grande majorité des apports en contaminants chimiques trouve son origine dans les rejets d'assainissement domestique et industriel, et ceux du réseau hydrographique, directs ou diffus. Le risque lié à ces apports pour les écosystèmes côtiers est fortement conditionné par le lieu et le type de rejet : un rejet de faible flux peut avoir autant d'impact s'il est déversé dans une zone confinée qu'un rejet plus important dans une zone ouverte avec un fort hydrodynamisme.

Le système côtier méditerranéen se comporte comme un système impulsionnel directement lié aux épisodes météorologiques, ce qui complique la compréhension de son fonctionnement et des apports en contaminants chimiques. Ainsi, l'action du vent, souvent brutal, agit au niveau des courants superficiels, du mélange vertical de la masse d'eau, de la remontée des eaux profondes (*upwellings*) et de la remise en suspension des sédiments. Les pluies d'orage agissent au niveau des apports atmosphériques, des apports liés aux crues des grands et petits fleuves côtiers et du lessivage des zones urbaines imperméabilisées.

La ville de Marseille et son littoral n'échappent pas à cette règle. D'anciennes activités industrielles sont sources d'apports avec le ruissellement des bassins versants ou d'apports directs au milieu marin réalisés dans le passé et stockés dans les sédiments. Les activités portuaires ont également conduit dans le passé à des rejets en mer de boues de dragage plus ou moins contaminées. Le golfe de Marseille a fait l'objet de multiples évaluations ces dernières décennies, que ce soit dans le cadre de réseaux de surveillance, d'études à caractère réglementaire ou de mesures réalisées à des fins de recherche scientifique, tel le projet METROC (Jany, Zebracki, 2012). Ces travaux ont permis de mieux comprendre la dynamique des apports en contaminants chimiques dans la rade.

Les cours d'eau côtiers tels les Aygalades se caractérisent par des concentrations les plus fortes en métaux lourds comparativement au Jarret, à l'Huveaune et à l'émissaire de Cortiou. Par temps sec, la variabilité des concentrations est généralement forte, en raison probablement de prélèvements d'eau pour certaines activités humaines. Par temps de pluie, lorsque les débits sont

relativement élevés, les concentrations ont tendance à rester constantes avec des valeurs plus faibles que celles rencontrées par temps sec, traduisant l'importance des processus de dilution par les eaux de ruissellement moins chargées. Pour les contaminants organiques, les concentrations les plus élevées se retrouvent dans les Aygalades et l'émissaire de Cortiou, mais également dans les déversoirs d'orage et les torrents (Pelouque, Farenc).

Par temps sec comme par temps de pluie, l'émissaire de Cortiou constitue cependant la principale source de contamination sous forme dissoute et sous forme particulaire en termes de flux, donc d'apport au milieu marin. L'Huveaune semble être le second contributeur, avec des valeurs bien inférieures. Les Aygalades et les déversoirs d'orage qui se distinguaient par des concentrations élevées deviennent secondaires, en raison du volume d'eau nettement inférieur qu'ils rejettent. Ces flux sont toutefois en moyenne 100 à 1 000 fois moins élevés pour les métaux lourds que ceux du Rhône par exemple et jusqu'à 10 000 fois moins élevés pour les contaminants organiques.

En parallèle, l'étude des niveaux de contamination dans le milieu a clairement montré que les pics de contamination se localisent principalement dans le compartiment sédimentaire et trouvent leur origine dans des contaminations anciennes liées à des activités industrielles et portuaires ou aux rejets de Cortiou antérieurs à la mise en service de la station d'épuration.

Ainsi, la zone sédimentaire à proximité du rejet de l'émissaire de Cortiou est encore largement contaminée en métaux (plomb, cadmium), hydrocarbures, pesticides organochlorés et PCB. Les niveaux de contamination restent également importants en différentes zones du golfe de Marseille, notamment en rade nord (port de commerce) et au droit des Goudes en rade sud en lien avec d'anciennes fonderies de plomb.

La toxicité des sédiments évaluée par un bio-essai (développement embryolaire d'huître) a également montré que les maximums de toxicité étaient observés dans les mêmes secteurs, sans conséquences observées sur le plan écologique (Galgani, 2009).

Les dioxines et furanes ont été mesurés pour la première fois en 2006, grâce à l'utilisation de moules placées en stations artificielles. Les mollusques bivalves sont en effet couramment utilisés pour quantifier les niveaux de contamination chimique, car ils possèdent la capacité de bioaccumuler les contaminants biodisponibles dans la colonne d'eau (Andral *et al.*, 2011). Les résultats obtenus, largement inférieurs aux *hotspots* identifiés en Méditerranée, ont toutefois montré que la zone située en face de l'embouchure de l'Huveaune était soumise à des apports significatifs et relativement récents.

Il en est de même pour des contaminants émergents, tels les détergents alkylphénols-polyéthoxyles (APnEO) et plusieurs familles de substances pharmaceutiques d'usage courant – anti-inflammatoires, antidépresseurs, hypolipémiant, caféine –, qui ont été étudiées plus particulièrement dans le panache du rejet de Cortiou.

Encadré 4 - REXCOR

Le projet

Le traitement des eaux usées a permis d'arrêter la dégradation des fonds marins de la cuvette de Cortiou. Si l'on peut considérer que la qualité de l'eau n'est plus un élément limitant à la vie marine, il convient maintenant d'apprécier la capacité du site à retrouver une situation écologique meilleure, plus dense et diversifiée que dans son état impacté. C'est l'objectif visé par l'expérimentation REXCOR (Restauration expérimentale des petits fonds côtiers de la calanque de Cortiou), qui repose sur l'hypothèse que la qualité des eaux aujourd'hui rejetées à Cortiou est compatible avec le retour de la vie sous-marine. L'élément limitant au retour de la vie serait maintenant la mauvaise qualité du substrat à coloniser, soumis à des années de pollution. Concrètement, REXCOR consiste à immerger des structures (par exemple des assemblages de tuiles, voir figures 7a, 7b et 7c) et à suivre sur quelques années la capacité de la faune et de la flore à coloniser ces structures considérées comme des récifs artificiels. Ceux-ci devraient agir comme des substrats neufs sur lesquels la vie pourra de nouveau se développer. L'objectif est de comprendre comment les récifs artificiels peuvent aider à rétablir les fonctionnalités écologiques d'un milieu historiquement pollué et encore aujourd'hui soumis à une pression, même si elle est davantage maîtrisée.

L'opération a démarré en 2018. Elle porte sur l'immersion de trente-six récifs de trois types différents: «rague, connectivité et fractal». Ces récifs vont faire l'objet d'un suivi scientifique très précis par photogrammétrie pour la colonisation des modules, par acoustique et par comptages spécifiques pour la détermination des espèces marines. Les premiers résultats sont très encourageants avec la présence d'espèces rares ou remarquables comme le mérou gris ou les langoustes, et la présence de pontes et de juvéniles de poissons aux environs des structures.

Textes de référence

- Arrêté du 22 juin 2007 relatif à la collecte, au transport et au traitement des eaux usées des agglomérations d'assainissement ainsi qu'à la surveillance de leur fonctionnement et de leur efficacité, et aux dispositifs d'assainissement non collectif recevant une charge brute de pollution organique supérieure à 1,2 kg/j de DBO₅, *Journal officiel de la République française*, 14 juillet 2007.
- Directive 91/271/CEE du Conseil du 21 mai 1991 relative au traitement des eaux urbaines résiduaires, et directive 2000/60/CE du Parlement européen et du Conseil du 23 octobre 2000 établissant un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau.
- SALAMA, Y. (2014) *Aide-mémoire de traitement biologique des eaux usées de l'ingénieur*, 1^{re} éd., Les Éditions du Net.



Figures 7a, 7b et 7c. Exemples de structures visant à optimiser la recolonisation des communautés benthiques dans des zones en réhabilitation de la calanque de Cortiou. (Crédits : Florian Holon.)

Les APnEO ont été retrouvés à des concentrations élevées dans la zone proximale de l'émissaire, avec une diminution forte des concentrations avec la distance au rejet. Certaines substances pharmaceutiques ont été retrouvées à des niveaux élevés et inattendus par rapport à des mesures semblables réalisées sur des rejets urbains, notamment pour le paracétamol. Comme pour les détergents, ces concentrations sont confinées à la zone très proche de l'émissaire et se diluent très rapidement sur quelques centaines de mètres. Cette dilution rapide montre la capacité dispersive de la zone, propice au rejet d'un effluent urbain.

Les rejets industriels en mer : le cas de l'usine de production d'alumine de Gardanne

L'augmentation des activités urbaines et industrielles et des rejets et déchets associés constitue souvent une menace pour la zone côtière marine dans les pays développés ou émergents, et en particulier en mer Méditerranée (Halpern *et al.*, 2008). L'introduction de contaminants métalliques liés à ces divers rejets peut avoir des effets délétères sur les organismes vivants et sur la biodiversité (Harmelin-Vivien *et al.*, 2012). Cette situation nuit au fonctionnement des écosystèmes marins et aux biens et services qu'ils fournissent, ainsi qu'aux populations vivant près de la côte (pêche, aquaculture, tourisme, etc.). Le canyon de Cassidaigne situé au large de Cassis (France) en Méditerranée nord-occidentale (figure 8a) est ainsi le site de rejets de déchets industriels miniers issus de l'usine de production d'alumine de Gardanne (Dauvin, 2010; Rouchier, Meinard, 2018).

L'usine de Gardanne a été créée il y a plus de cent vingt ans. Elle a appartenu à Péchiney, Alcan, Rio Tinto et enfin Alteo, qui est aujourd'hui encore un des premiers producteurs mondiaux d'alumines de spécialité. L'alumine est extraite de la bauxite par le procédé Bayer. Ce procédé génère des résidus constitués d'une phase liquide (eaux de traitement) et d'une phase solide (résidus de bauxite) ayant l'aspect de boues de couleur rouge orangé. Ces résidus dits « boues rouges » sont enrichis en métaux, ce qui caractérise le problème de l'impact environnemental de leur rejet. De la mise en service de l'usine en 1893 à 1966, les résidus ont été stockés à terre dans des bassins de rétention. De 1967 à 2015, les résidus ont ensuite été déversés dans le canyon de Cassidaigne par le biais de deux canalisations, partant respectivement des centres de production de La Barasse à Marseille (en service de 1967 à 1988, aujourd'hui en sommeil) et de Gardanne (en service depuis 1967), et débouchant à une profondeur de 320 m au large de Cassis.

Depuis la mise en service de l'usine et jusqu'en 2012, de nombreuses études et suivis des impacts sur le milieu marin ont été réalisés et expertisés par un comité scientifique, conformément à l'arrêté préfectoral du 24 mai 1994. À la suite de la convention de Barcelone de 1976 visant à réduire la pollution et à protéger le milieu marin en mer Méditerranée, de la directive-cadre sur l'Eau et de divers arrêtés préfectoraux, les propriétaires du site s'étaient engagés à réduire progressivement le rejet de résidus. Une diminution de ces rejets a

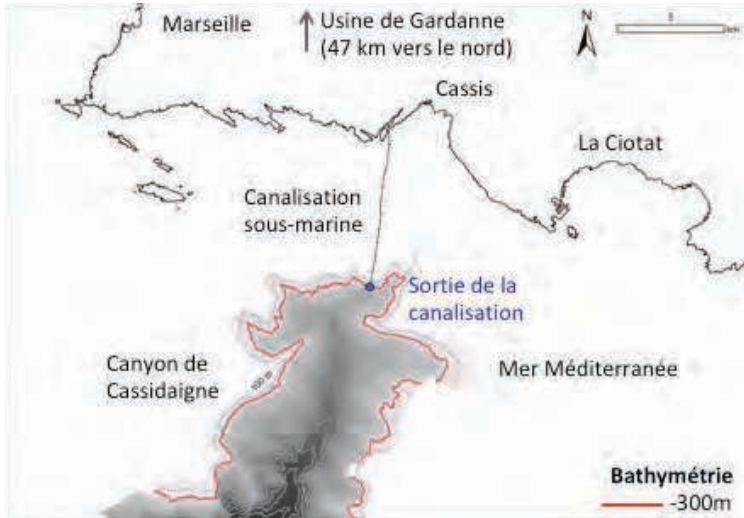


Figure 8a. Localisation du rejet de l'usine de Gardanne en mer Méditerranée.



Figure 8b. Vue sous-marine au niveau de l'exutoire (images ROV). La rencontre eau de mer / effluent clarifié conduit à la formation de concrétions et d'un panache de particules contenant de l'hydrotalcite, riche en métaux.

ainsi été entamée dès 1988 aboutissant à l'arrêt total des émissions en mer des boues en décembre 2015 (arrêté préfectoral du 1^{er} juillet 1996), tout en maintenant un rejet d'effluent clarifié. Les résidus solides provenant de la filtration des boues sont maintenant stockés à terre sur le site de Mange-Garri ou partiellement revalorisés sous la forme commerciale de Bauxaline.

La continuation d'un rejet d'effluent clarifié (figure 8b) a nécessité une demande de renouvellement de l'autorisation d'exploiter l'usine par Alteo comprenant une étude d'impact, réalisée par SAFEGE en 2014. En réponse, l'arrêté préfectoral du 28 décembre 2015 a autorisé le rejet de l'effluent clarifié

pour une période de six ans et a demandé à l'industriel d'étudier les possibilités de réduire notamment le pH et la teneur en métaux de l'effluent. L'arrêté prescrit également la mise en œuvre d'un programme d'autosurveillance de l'effluent en sortie d'usine et d'un suivi de l'impact des rejets sur le milieu marin. Les principaux objectifs sont :

- 1) apprécier l'évolution spatiale et temporelle de l'emprise du dépôt historique de boues rouges et de ses impacts ;
- 2) étudier le devenir et l'impact de l'effluent clarifié en mer ;
- 3) suivre l'évolution de la contamination métallique des poissons pêchés dans la zone d'influence du rejet et de réaliser une évaluation du risque sanitaire lié à leur consommation. Les résultats de ce suivi seront mis à disposition par le Comité d'information et de surveillance des rejets en mer (CSIRM) à partir de 2020.

Les nouveaux risques

Macrodéchets

Les déchets en milieux aquatiques continentaux et maritimes peuvent se définir comme tout matériau ou objet fabriqué directement ou indirectement, volontairement ou involontairement jeté ou abandonné dans les milieux aquatiques. Il est considéré que les déchets flottants, échoués ou immergés sont des déchets solides et visibles à l'œil nu. Les Nations unies pour l'environnement (UN Env., Cheshire et Adler, 2009) et les experts du groupe « déchets marins » de la directive européenne Stratégie marine (Galgani *et al.*, 2010) précisent que sont exclus les éléments d'origine naturelle (végétation, algues, débris organiques divers, etc.) non transformés. Par ailleurs, cette définition n'inclut pas les semi-solides comme les huiles minérales et végétales, les paraffines et des produits chimiques parfois échoués ou flottants.

Les déchets retrouvés en mer sont principalement composés de plastique, de verre, de métal, de papier, de carton, de tissus et de bois. Sur la façade méditerranéenne, les plastiques représentent environ 70 à 80 % environ des déchets observés sur le littoral, sur les fonds et à la surface de la mer (Galgani *et al.*, 2000). Une quantité significative de matériel de pêche est également présente. Environ 70 % à 80 % des déchets retrouvés dans les mers et sur le littoral sont d'origine tellurique (fleuves, lessivage, zones urbanisées) avec des apports évalués à 500 tonnes de plastique par jour pour l'ensemble du bassin méditerranéen (Jambeck *et al.*, 2015). Ces déchets se dégradent en microplastiques (< 5 mm) qui peuvent être ingérés puis excrétés par les organismes, limitant les risques de transfert trophique dans la chaîne alimentaire. Dans la région marseillaise, les densités sont de l'ordre de 100 000 particules par km² (Collignon *et al.* 2012), au-delà des concentrations trouvées dans les océans, mais en deçà des densités mesurées dans d'autres parties du bassin Méditerranée, comme le sud de l'Adriatique ou le bassin levantin (plusieurs millions de particules par km²).



Figures 9a et 9b. Accumulation de déchets dans le canyon de Planier (20 km au large de Marseille, 995 m de profondeur, campagne Submersible Ifremer). (Crédits : Ifremer.)

Le plastique peut également relâcher certains de ses composants, notamment les additifs et les liants (phtalates, diphényles et PPDE) ou transporter des molécules chimiques hydrophobes (insecticides, hydrocarbures, etc.) adsorbées sur sa surface. Ces voies de contamination restent cependant mineures au regard des apports industriels dans les zones côtières.

En Méditerranée, il n'existe pas de zones permanentes de concentration des déchets en surface. La distribution, mesurée dès 1995 dans le golfe du Lion, a montré une répartition homogène à l'exception de zones frontales ou près de grandes villes comme Marseille (Galgani *et al.*, 2000).

La situation de la métropole marseillaise est commune à l'ensemble des grandes agglomérations méditerranéennes. La population est dense, le tourisme est développé, le trafic maritime est très important et les infrastructures de traitement sont récentes. La conséquence est une possibilité de zones d'accumulation littorale de déchets, issus en grande partie de rejets antérieurs à la création des stations d'épuration. Dans le cas de la ville de Marseille, les apports ont été considérablement réduits ces dernières années et les comportements individuels (particuliers, pêcheurs, touristes, etc.) ont changé de manière significative.

Une des particularités du littoral méditerranéen est la présence de canyons côtiers qui a pour conséquence un transport et une canalisation du flux des déchets vers les plus grandes profondeurs, au-delà des 500 mètres où ils peuvent s'accumuler (Pham *et al.*, 2014). Il s'agit là d'une situation très classique, quelque peu irréversible en raison des difficultés d'accès et des coûts de nettoyage. Cette situation concerne le littoral provençal avec la présence confirmée de zones d'accumulation dans les canyons adjacents à la ville de Marseille (figures 9a et 9b).

L'impact des déchets marins peut être divisé en trois catégories : l'impact social (réduction de la valeur esthétique, santé publique), l'impact économique (coûts pour le tourisme, dommages aux navires, aux engins de pêche, pertes d'opérations de pêche, coûts de nettoyage) et l'impact écologique (mortalité ou des effets sublétaux sur les plantes et les animaux par étranglements ou

Encadré 5 - Comment reconnaître *Ostreopsis*?

Pour reconnaître *Ostreopsis*, il est indispensable d'avoir un microscope. Cette microalgue est alors très facilement reconnaissable, avec des cellules en forme de goutte d'eau d'environ 40 à 50 µm de longueur. En bord de mer et sans microscope, certains indices peuvent laisser penser qu'*Ostreopsis* est présente: la présence d'agrégats marron facilement détachables sur les rochers et les macro-algues, à faible profondeur; ces agrégats se retrouvent également dans l'eau et peuvent s'accumuler en surface (figures 10a et 10b). Toutes les accumulations de matière à la surface de l'eau de mer ne sont pas des agrégats d'*Ostreopsis* (il s'agit souvent d'autres microalgues, mais également parfois de déchets).

L'élaboration des profils de qualité des sites de baignades doit permettre une gestion préventive des risques ainsi que l'amélioration de la qualité du milieu. Ils ont pour but d'évaluer le risque de contamination de la plage et de proposer des mesures de gestion préventives ou curatives. La nouveauté est la prise en compte du potentiel de prolifération des macro-algues, du phytoplancton et des cyanobactéries¹.

¹ Pour aller plus loin: Berdalet *et al.*, 2017.

étouffements, captures dans les filets abandonnés, dommages physiques dont l'ingestion, libération de produits chimiques associés, supports aux espèces invasives et altération de certaines communautés benthiques). Ces impacts affectent tous les compartiments du milieu naturel (fonds marins, surface, colonne d'eau, littoral) et les organismes marins. Enfin, le tourisme est fortement affecté par la présence de détrit.

La directive-cadre Stratégie pour le milieu marin a intégré pour la première fois en 2008 les déchets comme descripteur du bon état écologique dans le cadre de la surveillance des côtes européennes. Il s'agit d'une décision importante dans la mesure où les travaux réalisés jusqu'à ce jour restaient le plus souvent du domaine expérimental ou liés à des politiques locales. Après la révision de cette décision en 2017, quatre critères relatifs aux déchets marins sont actuellement pris en considération, incluant :

- 1) les quantités, source et composition des déchets sur les plages, en surface et sur les fonds;
- 2) les microparticules en mer et dans les sédiments (critère 10DC2);
- 3) les déchets ingérés par la faune marine, principalement les oiseaux et les tortues marines (critère 10DC3);
- 4) les déchets susceptibles de blesser ou emmêler les organismes marins (critère 10DC4).

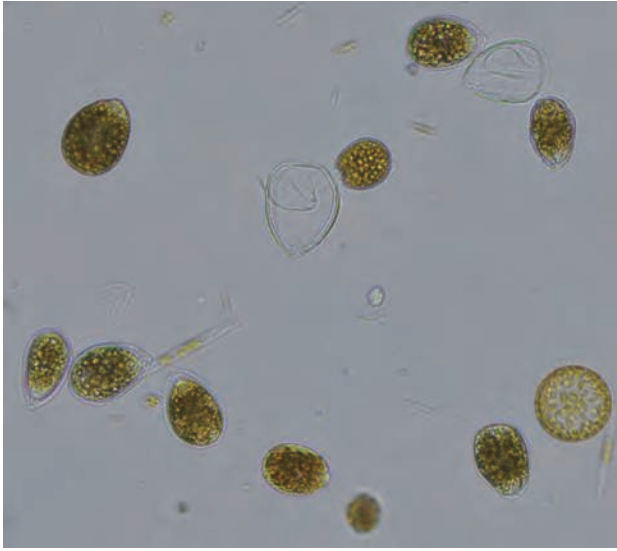


Figure 10a. Cellules d'*Ostreopsis* cf. *ovata* au microscope. Taille: environ 50 μ m. (Crédits: Cécile Jauzein.)



Figure 10b. Prolifération d'*Ostreopsis* cf. *ovata* en Méditerranée, avec agrégats de cellules sur les rochers et à la surface de l'eau de mer. (Crédits: Anaïs Lebrun.)

Ostreopsis, efflorescences toxiques

Les variations liées au changement climatique peuvent influencer les aires de répartition de nombreuses espèces animales et végétales et contribuer, par exemple, à la prolifération sous des latitudes tempérées d'organismes parasites ou toxiques qui étaient en limite de leurs aires de répartition. C'est le cas de certaines espèces de dinoflagellés benthiques du genre *Ostreopsis*, souvent associées aux espèces toxiques du genre *Gambierdiscus*. Ces microalgues vivent généralement dans les zones tropicales, à l'exception de certaines

espèces du genre *Ostreopsis* qui ont été inventoriées relativement récemment en Méditerranée, en Nouvelle-Zélande, en Tasmanie et en Australie, dans plusieurs îles japonaises et dans l'est de la Russie (voir encadré 5 *supra*).

Des espèces du genre *Ostreopsis* se développent en Méditerranée depuis plusieurs dizaines d'années, mais leur prolifération, impliquant des effets néfastes aux niveaux écologiques, sanitaires et socio-économiques, est beaucoup plus récente et limitée pour l'instant au bassin occidental et à l'Adriatique. Le genre *Ostreopsis* est connu sous les tropiques pour être à l'origine d'intoxications alimentaires à la suite de l'accumulation de la palytoxine et de ses dérivés dans des crabes, des oursins ou des poissons. La forte toxicité de la palytoxine chez les mammifères en fait une des substances d'origine marine les plus toxiques connues. En Méditerranée, des intoxications alimentaires impliquant la palytoxine n'ont pas été démontrées, même si la présence de cette toxine et de ses dérivés a été établie dans plusieurs animaux marins comestibles (mollusques, échinodermes, poissons). En revanche, des intoxications par contact direct avec l'algue et/ou les toxines sont possibles.

À Marseille, c'est dans une des Calanques de l'archipel du Frioul que les cas les plus sévères ont été observés. Mais il ne s'agit que de quelques irritations cutanées apparues chez des plongeurs.

Les espèces du genre *Ostreopsis* se développent préférentiellement à très faible profondeur, sur d'autres végétaux (macro-algues ou phanérogames) ou directement sur le substrat abiotique. Lorsque les conditions sont favorables (période estivale), ces micro-algues peuvent proliférer et se retrouver en suspension dans l'eau, formant parfois des agrégats relativement importants.

Ces micro-algues (et/ou les toxines) peuvent également se retrouver dans les embruns et les aérosols. Les conséquences peuvent alors être néfastes, aussi bien pour la santé humaine que pour l'écosystème. Les conditions deviennent hypoxiques, voire anoxiques, avec des mortalités massives d'invertébrés observées en Nouvelle-Zélande, au Brésil et en Méditerranée. Au niveau de la santé humaine, les réactions sont diverses: irritations cutanées, affections respiratoires, conjonctivites, fièvre et plus rarement détresse respiratoire. À Gênes, durant l'été 2005, plusieurs centaines de personnes ont ressenti ces différents symptômes et plusieurs dizaines d'entre elles ont été hospitalisées durant plusieurs jours.

Ostreopsis n'est pas la seule micro-algue benthique toxique à se développer en Méditerranée. Depuis plusieurs années, des espèces du genre *Gambierdiscus* sont trouvées aux portes de cette mer (aux Açores, par exemple), mais également en Méditerranée orientale. Dans les zones tropicales, ces espèces sont à l'origine de la ciguatera, l'intoxication alimentaire non bactérienne la plus répandue au monde, à la suite de l'accumulation des toxines de ces microalgues principalement dans des poissons comestibles. Les espèces du genre *Gambierdiscus* n'ont pas encore été trouvées sur le littoral français, mais elles sont activement recherchées.

La prolifération des méduses

Méduses, cténophores et autres gélatineux, comme les salpes et les appendiculaires, représentent des acteurs importants dans la structure et le fonctionnement des écosystèmes marins (Mills, 1995 ; Brodeur *et al.*, 2002). Caractérisés par des taux de croissance, d'ingestion et de reproduction parmi les plus élevés du monde animal, ces organismes exercent à différents niveaux un contrôle sur le fonctionnement des réseaux trophiques pélagiques ou benthiques (Purcell, Arai, 2001 ; Lynam *et al.*, 2005). Les proliférations d'organismes gélatineux sont observées de façon irrégulière et parfois imprévisible le long des côtes, et tout particulièrement dans les zones partagées avec les activités humaines, entraînant des pertes socio-économiques importantes pour le tourisme (fermeture des plages, santé humaine), la pêche (destructions des engins de pêche, impact sur les stocks de poissons) et les industries (colmatage des systèmes de refroidissement) (Purcell *et al.*, 2007 ; Richardson *et al.*, 2009 ; Purcell, 2012 ; Jaspers *et al.*, 2015).

Ces organismes sont planctoniques et sont transportés par les courants ; l'hydrodynamisme joue donc un rôle majeur dans leur distribution (Bakun, 2006). *Pelagia noctiluca* (figures 11a et 11b *infra*) est une espèce très commune en Méditerranée occidentale comme en Atlantique et est l'espèce la plus souvent rencontrée dans la baie de Marseille.

Les intrusions du courant nord sur le plateau du golfe du Lion et tout particulièrement dans la baie de Marseille sont largement responsables des échouages de *Pelagia noctiluca*. Même si le nombre de méduses échouées sur les plages de Marseille ne reflète en rien la quantité de méduses présentes au large, l'échouage entraîne souvent l'intervention des services publics (police, marins-pompiers) à la suite d'envenimations plus ou moins douloureuses. Les échouages massifs de méduses certains étés peuvent entraîner le déplacement des activités de tourisme au loin des plages, et un manque à gagner des activités de tourisme balnéaire. Cependant, la pose de filets à méduses n'est pas à envisager car ces filets entraîneraient le découpage des tentacules de méduses qui continueraient à dériver vers les plages, la libération de cellules urticantes directement dans l'eau, et ils limiteraient aussi le déplacement des petits poissons vers des zones de frai ou de recrutement.

Les méduses possèdent généralement deux modes de reproduction (sexuée pour les adultes pélagiques et asexuée pour les polypes fixes), ce qui leur confère une capacité de développement très importante. La multiplication des polypes et la production de jeunes méduses (éphyrules) à partir des polypes pourraient être augmentées avec la hausse de la température de l'eau, ce qui pourrait donc être une cause directe de prolifération. Cependant, *Pelagia* ne possède pas de phase polype, mais montre une capacité à réaliser de fortes agrégations. Des agrégations massives sur les plages de la Côte d'Azur ont été associées à des conditions météorologiques sèches et chaudes au printemps (Goy *et al.*, 1989) qui pourraient améliorer la survie et la croissance des jeunes

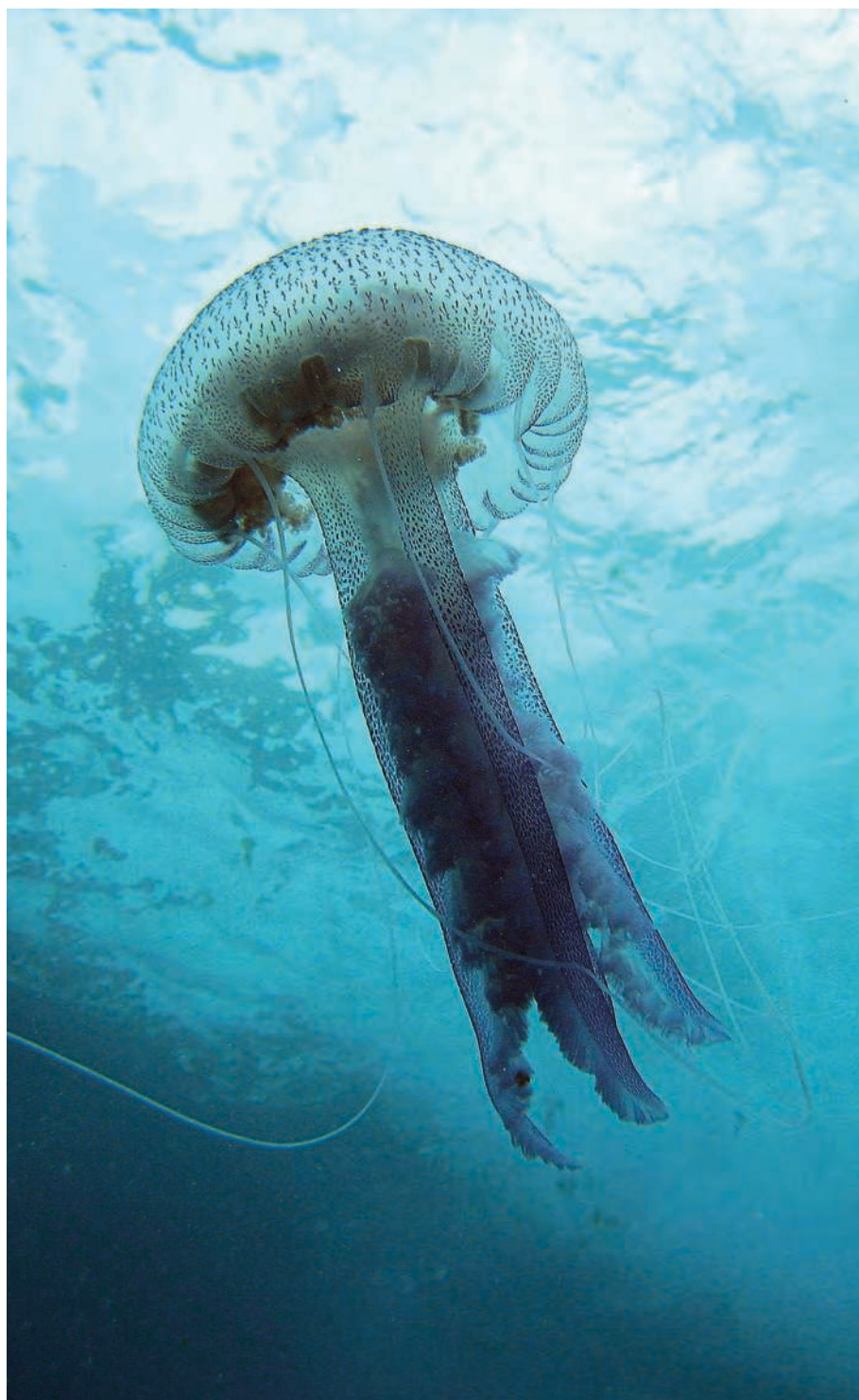


Figure 11a. *Pelagia noctiluca* (individu). (Crédits: Sandrine Ruitton.)



Figure 11b. *Pelagia noctiluca* (agrégation). (Crédits: Sandrine Ruitton.)



Figure 11c. *Chrysaora hysoscella*. (Crédits: Delphine Thibault.)



Figure 11d. *Cotylorhiza tuberculata*. (Crédits: Sandrine Ruitton.)

méduses (Morand *et al.*, 1992). Des conditions de production primaire et secondaire plus élevée, telles que rencontrées dans le courant nord, peuvent également favoriser la production et la survie de *Pelagia* (Ibanez, Boucher, 1987). La surpêche des petits poissons pélagiques (anchois et sardines) est étroitement liée à l'explosion de certaines populations de méduses puisqu'ils partagent la même ressource alimentaire. Les méduses ont aussi montré une capacité de résistance plus élevée que les poissons ou les crustacés, dans des conditions environnementales difficiles et notamment d'hypoxie ou d'anoxie. Enfin, les constructions le long du littoral sont autant de sites où les polypes de méduses peuvent s'installer et se développer.

D'autres méduses que *Pelagia* sont également présentes à Marseille : la méduse rayonnée, *Chrysaora hysoscella* (figure 11c *supra*) et la méduse œuf au plat endémique de Méditerranée, *Cotylorhiza tubercultata* (figure 11d *supra*). Contrairement à *Pelagia noctiluca* qui plonge à plus de 400 m de profondeur dans la journée, et remonte à la surface au coucher du soleil pour se nourrir, ces deux méduses restent proches de la surface le jour, afin de permettre aux dinoflagellés symbiotiques trouvés dans leurs tissus de profiter de la lumière du soleil et de réaliser la photosynthèse. Il est de fait compliqué de généraliser la dynamique de population observée sur une espèce.

Les actions

Les aires marines protégées

En Méditerranée, et d'une façon générale en Europe et dans les pays qui ont hérité des traditions européennes, le milieu marin a longtemps constitué, *de jure* ou *de facto*, une zone de liberté ou de non-droit, selon l'angle d'approche adopté. C'est le problème bien connu de « la tragédie des communs » : *res communis*, *res nullius* (chose commune, chose de personne). En Méditerranée française, les prud'homies de pêcheurs, avec leurs règles établies démocratiquement, ont constitué une heureuse exception (Tempier, 2018). Au xx^e siècle, les conventions internationales (telles que la Convention sur le droit de la mer de Montego Bay), les directives de l'Union européenne et les législations nationales (par exemple, les tailles minimales de capture) ont progressivement changé la donne. Pourtant, même dans un pays « développé » comme la France, le milieu marin est resté une zone de non-droit : pêcheurs ne respectant ni les tailles minimales, ni les interdictions de chalutage, ni même les zones interdites à la pêche, à la sortie de l'égout de Cortiou (Marseille) ; braconnage au grand jour toléré par les « autorités » et par les pêcheurs. Le résultat fut un effondrement des CPUE (captures par unité d'effort), la régression, voire l'extinction locale, de certaines espèces, la prolifération des oursins et la transformation des forêts de *Cystoseira* en *barren grounds* (roche nue) en raison du surpâturage (Sala *et al.*, 1998).

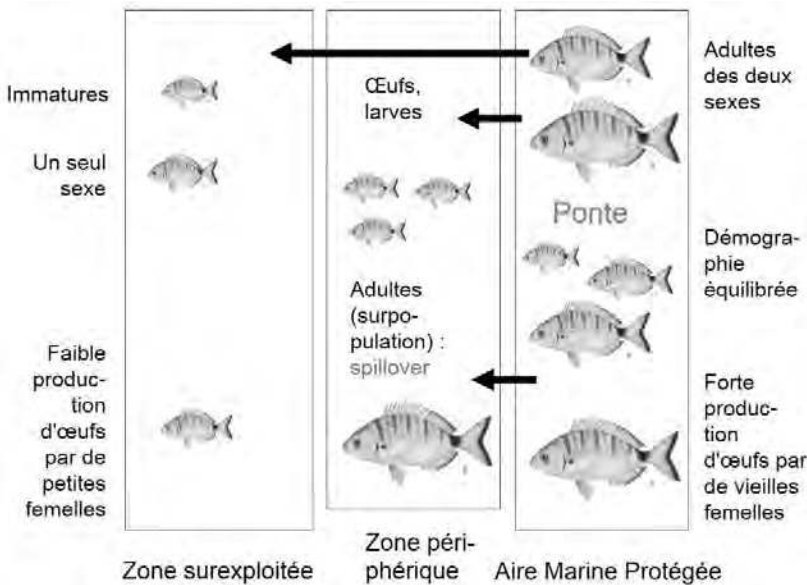


Figure 12. L'effet réserve: dans une AMP, la présence d'adultes des deux sexes, de vieilles femelles (productrices de centaines de fois plus d'œufs que les jeunes) et d'une structure démographique équilibrée est à l'origine de l'exportation d'œufs et de larves. La surpopulation pousse des adultes à aller dans la zone périphérique (*spillover*). (Source: modifié d'après Boudouresque *et al.*, 2005b.)

Les aires marines protégées (AMP) sont des zones où les activités humaines sont gérées (éventuellement interdites) dans le but de :

- 1) permettre la reconstitution de peuplements proches de l'état naturel supposé;
- 2) disposer de zones non perturbées pour l'éducation et la recherche scientifique;
- 3) gérer les usages, en les rendant compatibles entre eux et avec les objectifs de conservation;
- 4) organiser des zones privilégiant le spectacle pour le tourisme sous-marin;
- 5) reconstituer les populations d'espèces surexploitées, en vue d'une exploitation ultérieure rationnelle, dans les limites de l'espace protégé ou de l'exploitation des zones adjacentes (Boudouresque *et al.*, 2005b).

En effet, les AMP fonctionnent comme des « machines à fabriquer du poisson »: reconstitution de populations capables de se reproduire (structure démographique équilibrée, présence de mâles et de femelles chez les espèces qui changent de sexe, présence de vieilles femelles produisant des centaines de fois plus d'œufs que les jeunes), exportation d'œufs et de larves, et exportation d'adultes (*spillover*) vers des zones pêchées. Ce processus est nommé « effet réserve » (figure 12).

Il existe deux types de gestion des AMP, avec tous les intermédiaires : les NTZ (*No-Take Zones*), où toute forme de pêche est interdite, et les MUM (*Multi-Use Management*), où la pêche artisanale est maintenue, sous réserve de contraintes sévères (longueur maximum des filets, maille des filets, etc.) et évolutives (en fonction de l'analyse du stock et des CPUE, ces contraintes peuvent être allégées ou accentuées) (Astruch *et al.*, 2018). L'AMP de l'archipel de Port-Cros (parc national de Port-Cros) constitue le modèle de la gestion MUM. Ce type de gestion peut s'avérer plus proche de l'état naturel supposé que la gestion NTZ, dans la mesure où une pêche artisanale contrôlée remplace les top-prédateurs disparus (phoque moine *Monachus monachus*, requins, etc.) (Boudouresque *et al.*, 2004; Personnic *et al.*, 2014; Thibaut *et al.*, 2017).

Pour assurer la conservation et la gestion du milieu marin et de ses services écosystémiques, dont la pêche, il faudrait que les AMP représentent 20 % de la surface des zones côtières (Sala *et al.*, 2002). Des centaines d'AMP ont été créées en Méditerranée pour répondre à ces objectifs. En Espagne et en France, parfois en Italie, ce sont de vraies AMP, avec des gestionnaires et des gardes qui veillent au respect de la législation. Dans le reste de la Méditerranée, ces AMP sont malheureusement le plus souvent des *paper parks* (des parcs sur le papier), des AMP qui n'existent que dans les tiroirs d'un ministère, pour satisfaire les statistiques et les engagements internationaux d'un pays, mais qui n'ont aucune réalité sur le terrain (Sala *et al.*, 2012).

Deux vraies AMP existent dans la région de Marseille. La plus ancienne est le parc marin de la Côte bleue, créé en 1983, dont le succès est emblématique d'une gouvernance réussie entre habitants, élus et usagers. La plus récente est le parc national des Calanques, créé en 2012 dont les effets bénéfiques commencent à apparaître pour les pêcheurs, plongeurs ou promeneurs, ainsi que pour le tourisme et le développement économique durable de la métropole.

Les efforts de réhabilitation

Depuis une trentaine d'années, des actions sont entreprises pour réhabiliter, valoriser et protéger la rade de Marseille. Pas à pas, elles ont permis des avancées dans la voie d'une gestion durable de cet espace exceptionnel en conjuguant les activités humaines avec la protection de la nature. Aujourd'hui, de nouveaux outils favorisent et facilitent cette prise en compte simultanée de l'économie et de l'environnement. Avec l'engagement de tous, de belles perspectives pour la rade de Marseille!

Marseille est en pleine mutation, et elle se doit de retrouver la place qui doit être la sienne en Méditerranée dont elle fut pendant longtemps la porte de l'Orient. Si cette appellation n'est plus de mise aujourd'hui, Marseille peut et doit redevenir la grande métropole de la *mare nostrum* faisant la liaison entre les deux bassins méditerranéens du nord au sud et de l'est à l'ouest. Pour cela, encore faut-il que la Méditerranée, objet de toutes les convoitises, redeviennent un espace de paix et de liberté. La rade de Marseille est l'une des plus belles au

monde. Et pourtant, cet espace remarquable, entre La Couronne et La Ciotat, a subi l'impact des activités humaines pendant de nombreuses décennies.

Rejet d'eaux usées (voir encadré 3 *supra*), accumulation de déchets (voir «Les nouveaux risques» *supra*), constructions aberrantes, pillage des ressources vivantes, etc., autant d'agressions dénoncées dès les années 1960 par des scientifiques et les usagers de la mer. Puis, avec la prise de conscience environnementale, une volonté politique s'est affirmée pour restaurer, valoriser et protéger un milieu exceptionnel. Aujourd'hui, le plan de gestion de la rade de Marseille engage la grande métropole provençale dans la voie du développement durable (Lardic, 2013) et conforte la réhabilitation de la rade de Marseille alors que, dans les années 1970, cet espace est agressé par les rejets de l'eau du fleuve Huveaune, qui se jette alors à la mer sur l'actuelle plage du Prado. Au fond de l'eau, plus le moindre rhizome de Posidonie, uniquement de la vase réduite et dépourvue de vie.

Il est temps d'agir! L'Huveaune est détourné dans les Calanques de Marseille. Le traitement à la source les rejets des usines qui bordent le fleuve améliore la qualité de ses eaux. Des installations ferment, devenues obsolètes ou touchées par des problèmes économiques. La réhabilitation de la rade du Prado est en marche: la vie réapparaît avec le redémarrage de l'herbier de Posidonie dans certains secteurs comme la Pointe Rouge et l'anse du Prophète. Cette reconquête à peine perceptible sera longue, mais elle illustre la faculté du milieu naturel à se régénérer pour peu qu'on l'y aide. Et l'assainissement de la rade permet l'aménagement des plages Gaston Defferre. Ces nouveaux espaces de liberté changent la vie des Marseillais et attirent les touristes.

Depuis 2006, la réhabilitation de la rade de Marseille s'inscrit dans un Plan global de gestion. L'objectif est de maintenir ou d'améliorer la qualité des eaux marines et des sédiments. C'est aussi de garantir un développement durable des activités liées à la mer telles que la pêche, l'aquaculture (quasiment absente à Marseille), le nautisme et la plongée sous-marine (Janny, 2014). Avec ses 234 professionnels et ses 2 000 tonnes annuelles de poissons, la pêche «aux petits métiers» reste un secteur important du patrimoine maritime de Marseille. Pourtant, cette activité est en plein déclin à cause de l'épuisement des stocks naturels de poissons comme le thon, et de lourdes contraintes financières et réglementaires (Farrugio, 2013).

Pour soutenir la pêche locale, la ville de Marseille a lancé en 2008 un programme de valorisation du milieu marin. C'est la plus grande réalisation dans le domaine en Europe: 30 000 m³ de récifs artificiels ont été immergés dans la rade Sud. Leur colonisation par divers organismes fixés qui constituent la base de la chaîne alimentaire pour les poissons qui trouvent là le gîte et le couvert fait l'objet d'un suivi par les chercheurs du MIO. Concernant les récifs artificiels de la baie du Prado, leur impact sur le réseau trophique a été établi au travers de la production de ces récifs (Cresson *et al.*, 2016); leur effet sur la pêche reste en revanche à évaluer.

L'aquaculture, un autre axe potentiel de valorisation de la mer, existe, mais reste limitée à Marseille à une ferme marine de qualité à l'île du Frioul. Créée en 1989, «Provence Aquaculture» produit les deux espèces phares de l'aquaculture moderne : le loup et la daurade. L'élevage respecte des conditions exemplaires de salubrité, dans le respect des animaux et des consommateurs. Ce qui lui a valu une certification «Agriculture biologique».

La création de réserves de pêche et d'aires marines protégées contribue à la valorisation du milieu marin. Le parc marin de la Côte bleue, créé en 1982 à proximité de Carry-le-Rouet en est un exemple : espace de 85 ha très contesté à l'origine, «l'effet réserve» a fait son œuvre quinze ans après sa création. Les poissons bien à l'abri dans cette aire marine protégée sont plus gros, les femelles produisent plus d'œufs, et les alevins plus nombreux essaient le milieu environnant, pour le plus grand profit des pêcheurs qui ont demandé et obtenu en 1996 une extension de la réserve, soit 210 hectares dans la zone de Carro. Dès 1983, l'installation de récifs artificiels dans la réserve a participé à la recolonisation des fonds appauvris, et des récifs de protection disposés à la périphérie empêchent le chalutage illégal.

La création du parc national des Calanques en 2012 qui englobe les îles de l'archipel de Riou, associée à l'amélioration du traitement des rejets de la ville et à la réhabilitation en cours de la cuvette de Cortiou, laisse augurer d'une meilleure gestion de ce lieu classé du littoral marseillais et cassidain. Il permet notamment le développement d'un écotourisme respectueux de l'environnement. Les îles de Riou et du Frioul sont inscrites dans le réseau européen Natura 2000 qui vise une bonne gestion du milieu tout en maintenant les activités traditionnelles. Ces îles abritent de nombreux oiseaux marins comme les goélands et les puffins. Depuis 2003, l'île de Riou est le seul espace à avoir le statut de réserve naturelle nationale sur le territoire d'une ville d'un million d'habitants. Elle appartient au Conservatoire du littoral et des rivages lacustres depuis 1992. C'est l'unique archipel sauvage inhabité du littoral français. Ce paysage aride et désertique abrite 350 espèces végétales dont 18 sont très rares et protégées, comme la saladelle et l'astragale de Marseille, encore appelée «coussin de belle-mère» (voir chapitre 5, «Quelles sont les conditions de persistance des espèces protégées?»).

Les fonds sous-marins présentent une richesse incomparable en Méditerranée. Bancs d'Anthias, grandes gorgones ou mérours bien présents autour des îles de Marseille (Harmelin, Bassemayousse, 2008) en témoignent. Depuis 2015, le Contrat de baie de la rade de Marseille regroupe dans un projet fédérateur les études et plans d'action développés sur l'aire maritime (Plan de gestion de la rade de Marseille, la Gestion intégrée des zones côtières, le schéma des vocations littorales, la démarche engagée Ports propres, le plan d'action Baignade, le contrat d'agglomération, la charte du parc national des Calanques et le plan de gestion du parc marin de la Côte bleue). Le Contrat de baie est un outil mis en place par les différents acteurs du territoire pour améliorer la qualité écologique et sanitaire des masses d'eau côtières.



Figure 13. Vue aérienne sur le littoral marseillais et son domaine insulaire.

Comme les autres contrats de milieux institués par la circulaire du 5 février 1981, le territoire du Contrat de baie est défini à l'échelle d'un bassin versant. Il permet d'atteindre les objectifs du Schéma directeur d'aménagement et de gestion des eaux (SDAGE) grâce à la mise en œuvre d'un programme d'actions de réhabilitation et de gestion du milieu. L'information et la sensibilisation sur l'importance de la préservation du patrimoine naturel complètent ce programme de réhabilitation et de valorisation de la rade de Marseille.

Mise en place d'une gouvernance maritime et littorale qui fédère tous les acteurs de la mer à Marseille

Il y a une vingtaine d'années, Marseille commençait seulement à réaliser les enjeux majeurs que représentent, pour la deuxième ville de France, son littoral, ses espaces insulaires et maritimes, et sa zone d'évolution nautique exceptionnelle, qui conditionnent l'attractivité, le développement économique et touristique et l'équilibre social de la ville (figure 13).

À l'époque, Marseille renforçait ses digues, rechargeait ses plages et nettoyait le sable durant l'été, disposait de bases nautiques pour les pratiques sportives, épurait déjà ses eaux et dépolluait ses rivières avec une politique d'assainissement très dynamique. Marseille amorçait alors la protection des espaces littoraux et insulaires les plus sensibles, en profitant d'un suivi scientifique exemplaire du milieu marin alors que le Centre pédagogique de la mer commençait à sensibiliser les enfants à l'environnement marin.

Ces éléments d'un puzzle ne constituaient toutefois pas une politique globale de la mer : pas de vision d'avenir de la gestion du littoral, des espaces

maritimes et des îles, pas de dynamique collaborative entre les différents acteurs de la mer pour défendre l'intérêt général et faire avancer des projets d'intérêt collectif. C'est pourtant sur sa frange littorale riche et fragile que se concentrent de nombreux enjeux et défis liés à la pression et à la densification urbaine, à l'évolution des pratiques et usages de loisirs de la population et des touristes, et de nombreuses activités commerciales et industrialo-portuaires.

C'est dans ce contexte, en 1998, qu'a été lancé le projet de récifs artificiels du Prado pour repeupler des fonds marins dégradés (figure 14). Dès le départ, l'objectif était de fédérer tous les acteurs de la mer autour d'une opération à conduire collectivement qui ne pouvait qu'être bénéfique à tous si les intérêts de chacun étaient écoutés et respectés. La présence de toutes les parties prenantes dans le groupe projet (baptisé Comité scientifique et technique) garantissait la vision systémique. Au sein de ce Comité, les scientifiques étaient invités à dialoguer avec les usagers de la mer, les ingénieurs et les administrations et se retrouvaient dans une démarche de recherche-action, interdisciplinaire par nature. Le résultat fut à la hauteur des espérances: un projet de récifs artificiels de taille exceptionnelle au niveau européen (200 ha!), totalement consensuel, approprié par tous les partenaires, et dont le tour de table financier fut facilement bouclé!

En parallèle avait émergé, dans le même climat participatif, un projet de développement de l'archipel du Frioul, conçu avec les habitants et les associations autour d'un écotourisme culturel et patrimonial, inscrit dans le cadre de Natura 2000, assorti de la création d'une structure *ad hoc* baptisée Parc maritime des îles du Frioul. La préfiguration de la création du parc national des Calanques a également bénéficié de cette dynamique participative qui a encouragé les évolutions législatives permettant de renforcer la représentation des acteurs locaux à la gouvernance de ce parc national.

En 2005, avant même que soient immergés les premiers récifs en 2007, la complète réussite de ce processus participatif de gouvernance locale a déclenché l'envie d'aller plus loin et de s'engager dans l'écriture collective d'une politique de la mer. On allait passer de la co-construction d'un projet opérationnel à la co-élaboration de documents d'orientation et de planification stratégique!

Le Plan de gestion de la rade de Marseille (PGRM), destiné à fédérer et à mettre en cohérence les actions et les programmes de tous les acteurs de la mer à Marseille, prenait alors naissance (figures 15a, 15b, 15c et 15d *infra*). Il fut élaboré en étroite association avec les scientifiques, les différents niveaux de collectivités territoriales, les administrations de l'État et d'autres institutions comme l'agence de l'Eau, le Grand port de Marseille, la Chambre de commerce et d'industrie, l'établissement public Euroméditerranée, le GIP de préfiguration du parc national des Calanques, le Conservatoire du littoral, l'office de la Mer... et tous les usagers de la mer, ainsi que le grand public largement invité à la conférence de lancement et tenu informé par la suite, notamment au travers des Comités d'intérêt de quartier. Il a bénéficié d'une

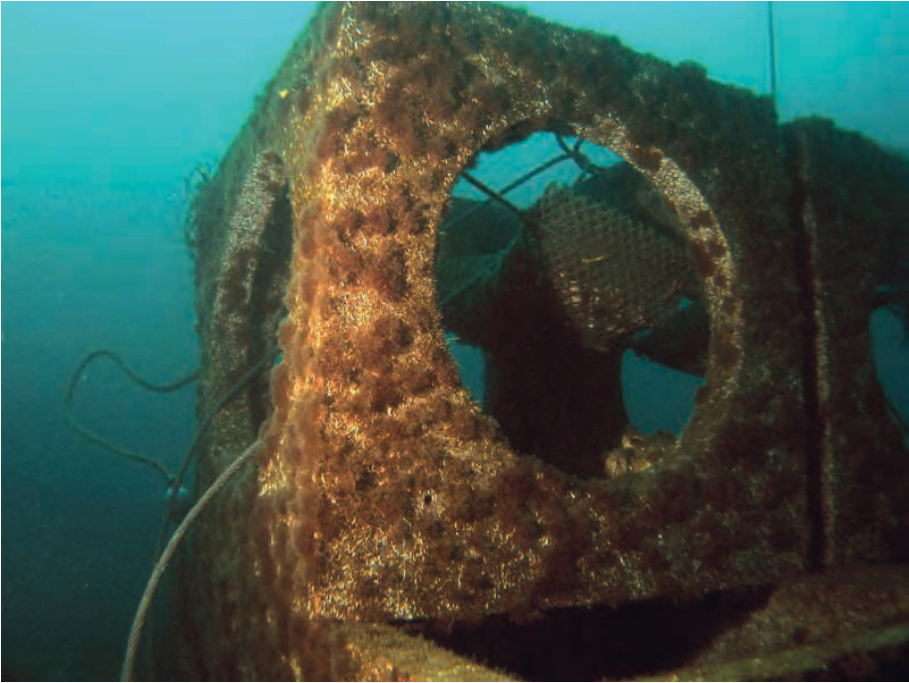


Figure 14. Un élément du récif artificiel du Prado à Marseille.

double démarche, thématique et géographique, qui a fait l'objet d'ateliers de travail et de réunions permettant de croiser les deux approches.

Cette concertation a permis de préfigurer les dispositifs de gouvernance nécessaires pour harmoniser ces actions et susciter l'engagement progressif des différents acteurs.

Début 2010, les acteurs politiques, porteurs de projets ou financeurs, ont été invités officiellement à confirmer leur adhésion à la vision et à la démarche collective du PGRM en déclarant leurs propres engagements et en prenant position sur les différents sujets et projets qui relevaient de leurs prérogatives. Le PGRM a alors constitué le cadre de référence de la politique littorale, insulaire et maritime de la Ville de Marseille.

À la suite du PGRM, une démarche de Contrat de baie a été lancée, sur un territoire élargi, mais avec des finalités restreintes par rapport au Plan de gestion de la rade de Marseille qui visait tous les aspects de la fréquentation et de la protection des espaces maritimes et littoraux dans une vision très large de développement durable. Le Contrat de rivière de l'Huveaune est venu consolider aussi le volet « qualité des eaux » du Contrat de baie et du PGRM en impliquant des territoires limitrophes de Marseille dans le bassin versant de ce cours d'eau. Le périmètre de réflexion et d'action de ce Contrat de baie inclut ainsi les communes littorales d'Aix-Marseille-Provence Métropole, qui





Figures 15a, 15b, 15c et 15d. Activités économiques et récréatives sur le littoral marseillais.

partagent avec Marseille les mêmes eaux de la « rade de Marseille », ainsi que les communes du Syndicat mixte de l'Huveaune. Cette démarche de Contrat de baie a été lancée en copilotage entre la Ville de Marseille et la Communauté urbaine qui allait devenir un Conseil de territoire de la métropole. Les réalisations qui en découlent, cofinancées par plusieurs partenaires publics, au premier chef desquels l'Agence de l'eau, amélioreront durablement la qualité de vie des Marseillais, et devraient entraîner des retombées en termes d'image, d'attractivité, d'économie et de tourisme.

On peut ainsi considérer que la mer a constitué, pour Marseille, un véritable « laboratoire » d'une gouvernance territoriale systémique et participative qui mériterait de s'étendre aux espaces urbains qui souffrent encore bien davantage du manque de transversalité et restent régis par de nombreuses politiques sectorielles, pilotées à des échelles géographiques souvent différentes, qui ont du mal à « discuter » entre elles.

À la lumière de cette expérience de la gouvernance maritime et littorale, de nombreuses pistes s'ouvrent pour l'avenir (dont certaines nécessitent des validations politiques, des partenariats entre les organismes de recherche et les collectivités publiques, des échanges sur les bonnes pratiques, des approfondissements méthodologiques et des réflexions en termes de gestion des organisations).

On citera :

- Le renforcement des relations science-société, à travers la multiplication des recherches-actions interdisciplinaires mettant les équipes de recherche dans des postures de dialogue direct avec la société civile et de contribution à la décision et à l'action publique.
- La création d'une plate-forme collaborative ouverte au public, associée à une véritable banque de données sur la mer, affichant en particulier les engagements des acteurs publics vis-à-vis de la mer et permettant le suivi de leurs réalisations (comme cela a été fait pour la qualité de l'air). Elle réactivera et élargira la dynamique participative de co-élaboration des politiques publiques. En donnant de la visibilité aux acteurs de la mer et à leurs actions, elle encouragera leur mise en relation, favorisera l'émergence de nouveaux projets, et pourra même rassembler les financements éventuellement nécessaires à leur réalisation. Elle mobilisera ainsi le potentiel de créativité territoriale dans l'esprit d'une « économie bleue » à fort ancrage local : la Plate-forme de gestion des ressources marines (proposée par la Ville de Marseille lors du Forum mondial de l'eau en 2012) en décrit le cahier des charges.
- Des réflexions sur des formes innovantes d'engagement des acteurs publics et privés permettant de synchroniser la mise en œuvre d'actions interdépendantes, ou d'éviter des « renvois de balle » où chacun attend la participation de l'autre ou la réalisation de telle action publique pour engager la sienne (cette réflexion, comme d'autres innovations évoquées dans cet ouvrage, peut renvoyer à la démarche de « transition juridique » engagée par la Ville et le Barreau de Marseille en 2016).

- Un renforcement des échanges internationaux, notamment autour de la Méditerranée, sur ces méthodes de gouvernance territoriales multi-acteurs et multi-niveaux à travers la création d'un réseau méditerranéen d'échanges qui permettrait une capitalisation des bonnes pratiques (cf. le projet R.E.G.U.L.A.T.E.U.R. également proposé par Marseille lors du Forum mondial de l'eau).
- Enfin, à l'heure où la tentation est grande, au niveau mondial, et au niveau des États, d'axer la lutte contre le changement climatique et ses effets sur des approches sectorielles, appuyées sur la généralisation de technologies plus ou moins standard et souvent mal adaptées aux villes du Sud, les expériences réussies de gouvernance locale intégrant la lutte contre le changement climatique dans une perspective globale de développement durable, fondée sur une valorisation prioritaire du potentiel local assistée par le numérique, doivent être considérées comme des alternatives méritant d'être davantage explorées. Cette approche humaniste et globale du développement durable peut aider à construire une vision méditerranéenne de la ville durable qui doit être consolidée à travers les échanges de bonnes pratiques évoqués ci-dessus.

Il reste à convaincre les États de la capacité des acteurs locaux à se mobiliser collectivement pour prendre en charge leur avenir en respectant la planète tout en développant la qualité de vie des habitants. Les COP sur le climat, comme le congrès mondial de l'UICN (Marseille 2021), sont des occasions de défendre cette vision. Cela suppose de plaider en faveur d'une décentralisation plus marquée, assortie d'une « transition juridique » qui laisse effectivement la liberté aux acteurs locaux de conduire, avec les scientifiques, des approches interdisciplinaires et participatives porteuses d'innovations locales privilégiant chaque fois que possible la dimension humaine par rapport à la dimension technologique.

En résumé

- Les principaux impacts climatiques et anthropiques sur l'environnement marin marseillais sont les suivants:
 - La température moyenne des eaux de surface a augmenté de l'ordre de 0,3 °C par décennie depuis 1994. Selon les scénarios, les modèles prévoient une augmentation de 2 à 4 °C pour la fin du XXI^e siècle. Cette augmentation de température est accompagnée d'une augmentation de la salinité (+ 0,4 en une trentaine d'années) ainsi que d'une augmentation du niveau de la mer de l'ordre de 1 cm par décennie en moyenne actuellement. L'évolution des caractéristiques thermiques de la mer présente des épisodes « caniculaires », comme en 1999 et

en 2003, qui entraînent des perturbations physiologiques chez les organismes avec des répercussions immédiates sur certaines espèces, comme le corail rouge, espèce emblématique de Méditerranée et le développement de *Vibrio* pathogènes qui pourraient décimer certaines espèces (cas de *Pina nobilis*).

– On constate une modification de la biodiversité avec une diminution du zooplancton et des poissons planctonophages (sardines, anchois, etc.) à l'échelle locale de Marseille au cours de la dernière décennie (2010-2020 environ). Les biomasses de nombreuses espèces prédatrices de grande taille et de haut niveau trophique (requins, raies, etc.) ont aussi beaucoup diminué en lien avec les activités de pêche. La taille moyenne de nombreuses espèces exploitées diminue. Des espèces invasives sont de plus en plus présentes dans les captures des pêcheries locales.

– Les activités industrielles et urbaines ont largement pollué l'environnement marin marseillais. La zone sédimentaire à proximité du rejet de l'émissaire de Cortiou est encore contaminée en métaux (plomb, cadmium), hydrocarbures, pesticides organochlorés et PCB. Les niveaux de contamination restent également importants en différentes zones du golfe de Marseille, notamment en rade nord (port de commerce) et au droit des Goudes. Les maximums de toxicité des sédiments sont observés dans les mêmes secteurs, sans conséquences observées sur le plan écologique. Comme pour les détergents, ces concentrations sont confinées à la zone très proche de l'émissaire et se diluent très rapidement sur quelques centaines de mètres.

– S'il n'existe pas de zones permanentes de concentration des déchets en surface, les densités de microplastiques sont de l'ordre de 100 000 particules par km² dans la région marseillaise, valeurs au-delà des concentrations trouvées dans les océans mais en deçà des densités mesurées dans d'autres parties du bassin méditerranéen, comme le sud de l'Adriatique ou le bassin levantin (plusieurs millions de particules par km²).

- Les mesures prises et les évolutions récentes sont les suivantes :
 - La qualité des eaux marines et de baignade dans la baie de Marseille s'est améliorée depuis les années 1980. Les apports via la ville de Marseille ont été considérablement réduits et les comportements individuels (particuliers, pêcheurs, touristes, etc.) ont changé de manière significative. Bien que le traitement des eaux usées depuis 1987 et la mise en place du traitement biologique en 2008 aient permis d'arrêter la dégradation des fonds marins de la cuvette de Cortiou, l'émissaire constitue encore à ce jour

la principale source d'apport ou de contamination, sous forme dissoute et particulaire, au milieu marin.

– De nombreuses études montrent que les espèces et les écosystèmes ont des capacités variables de résistance après une perturbation (pêche, pollution, atteintes à l'intégrité du fond, etc.). La restauration écologique est la seule approche qui puisse conduire à la régénération d'écosystèmes dégradés, une fois la cause de dégradation supprimée.

– La création de réserves de pêche et d'aires marines protégées contribue à la valorisation du milieu marin. Par exemple, l'« effet réserve » a fait son œuvre à la suite de la création du parc marin de la Côte bleue en 1982 : les poissons sont plus gros, les femelles produisent plus d'œufs, et les alevins plus nombreux essaient le milieu environnant. Depuis 1983, des récifs artificiels et de protection participent à la recolorisation des fonds appauvris et empêchent le chalutage illégal (exemple suivi vingt-cinq ans plus tard par l'immersion des récifs du Prado qui ont multiplié par dix le volume de ces habitats sous-marins et conduit à interdire totalement la pêche sur les 200 ha de leur zone d'implantation). La création du parc national des Calanques en 2012, associée à l'amélioration du traitement des rejets de la ville et la réhabilitation de la cuvette de Cortiou, laisse augurer d'une meilleure gestion de ce haut lieu classé du littoral marseillais et cassidain. Ces milieux préservés permettent notamment le développement d'un écotourisme respectueux de l'environnement.

– Depuis 2015, le Contrat de baie de la rade de Marseille regroupe dans un projet fédérateur les études et plans d'action développés sur l'aire maritime pour améliorer la qualité écologique et sanitaire des masses d'eau côtières. L'information et la sensibilisation sur l'importance de la préservation du patrimoine naturel ainsi que les directives-cadres et les suivis écologiques mis en place par la communauté scientifique complètent ce programme de réhabilitation et de valorisation de la rade de Marseille.

Conclusions

Hubert Mazurek

LPED

Thomas Curt

INRAE

Joël Guiot

CEREGE

Cet état des lieux, réalisé par sept laboratoires et près de cinquante auteurs, présente un premier bilan environnemental de la région d'Aix-Marseille sur laquelle ils concentrent leurs recherches. Ces laboratoires font tous partie du LabEx OT-Med (Laboratoire d'excellence Objectif Terre Méditerranée) et pour certains d'entre eux également de l'OSU – Institut Pythéas (Observatoire des sciences de l'univers), une des composantes d'Aix-Marseille Université. Ce travail de synthèse a permis un dialogue constructif interlaboratoires et des échanges d'informations sur différentes problématiques environnementales concernant la région comme la métropole d'Aix-Marseille. Une telle initiative illustre l'intérêt de constituer des pôles scientifiques et de les associer à des collectivités locales ainsi qu'à des institutions publiques ou privées, et ce pour une meilleure gestion environnementale d'une région.

Huit chapitres exposent ainsi un large éventail des problématiques environnementales et des enjeux de Marseille et de sa région, éventail sous-tendu par la notion centrale de la durabilité face aux évolutions des territoires, du climat, et de l'urbanisation.

Tout n'a pas été recensé cependant, et il a fallu faire des choix. Mais cette première version reflète la diversité et la complexité de la région. Nous avons effectué en permanence des va-et-vient entre les échelles, depuis les mécanismes de fonctionnement de la mer Méditerranée jusqu'à la logique de la présence de plantes, en passant par l'écosystème ou le quartier. La région d'étude n'est pas de fait figée, mais dépend des questions abordées; il s'agit du grand Marseille au sens métropole Aix-Marseille Provence, une région emblématique sous influence de l'urbanisation, de l'industrialisation, du tourisme, de l'agriculture, etc., et sans qu'il soit possible de disposer d'une homogénéité spatiale et administrative au sens strict.

La gestion d'un territoire tel que celui de Marseille nécessite certes de penser local et à court terme pour résoudre les problèmes ou prospecter au plus proche des préoccupations des habitants. Toutefois, il est aussi nécessaire de se projeter à l'échelle globale spatialement, et sur une échelle de temps plus longue qui est celle de processus environnementaux sur plusieurs générations comme le sont le changement climatique, l'urbanisation, ou encore l'évolution incessante des activités commerciales. Aussi, il est aujourd'hui impératif de dépasser la gestion à court terme, car la ville et le territoire de demain se construisent aujourd'hui, et nous n'avons pas droit à l'erreur.

Les constats et les enjeux

En amont de ce travail de synthèse, force est de constater la dépendance de notre société aux problématiques environnementales et les choix en termes de gestion du territoire qu'imposent les problématiques environnementales. Le constat de cet enjeu environnemental, récent, devrait nous faire changer le paradigme de la planification et de la gestion territoriale. Tous les aspects de notre société sont aujourd'hui, à des degrés divers, climato-dépendants, soit par l'atténuation qu'ils nécessitent, soit par les impacts que la société subit et donc par son adaptation forcée à ces impacts. Ce constat est une donnée nouvelle par rapport au début des années 2000, dont la communauté scientifique et la société civile sont chaque jour plus conscientes, et qui doit être inscrit dans nos recherches et dans les politiques d'intervention.

Dans ce cadre, on notera :

- 1) l'importance des mécanismes d'échange de chaleur entre la ville et l'atmosphère qui a des répercussions sur la qualité de l'air, la santé publique, l'énergie, l'urbanisme, l'architecture, etc. ;
- 2) les forçages qui s'exercent sur les espèces et les écosystèmes via la gestion forestière, l'utilisation des ressources, la variation des agrosystèmes (expansion dans certains cas, rétraction dans d'autres), la contamination environnementale, la dégradation des milieux marins, etc. ;
- 3) l'importance et la complexité de la gestion du littoral, absolument centrale dans un espace comme celui de Marseille, du fait de la possibilité accrue d'événements extrêmes (tempêtes, canicules, submersions marines, séismes) et d'érosion côtière chronique, et ce dans une région où l'économie de la bande littorale est extrêmement développée.

Le second constat est celui de l'inéluctable croissance urbaine de l'agglomération marseillaise. C'est un processus irréversible comme dans la plupart des régions urbanisées du monde, qui implique une artificialisation croissante des sols et la diminution de la place laissée aux usages agricoles ou aux espaces naturels. La pression foncière et la spéculation provoquent de plus en plus un reclassement des terres agricoles en terres constructibles, ce qui peut constituer une opportunité

de croissance à court terme mais s'avère très contraignant sur le long terme ; au tournant des années 2020, nous arrivons en effet à la limite de l'interface entre zones urbaines et zones à protéger. Ce débat est crucial car il concerne la nécessité d'atténuer le changement climatique ; la sécurité alimentaire ; le maintien des paysages, de la biodiversité et des services écosystémiques ; et les risques d'inondations et d'incendies dont l'amplitude et la fréquence augmentent. Autant de pressions qui engendrent peu de protection juridique jusqu'à présent.

Les mécanismes qui provoquent cet étalement urbain sont très complexes et relèvent, au-delà de la croissance démographique pure, de variables politiques, économiques, sociologiques, urbanistiques du moment. Ces variables contribuent au jeu complexe des acteurs, lesquels, au travers des documents et des plans d'urbanisme, modifient les modes de vie. L'environnement a actuellement peu de place dans ce schéma et une réflexion l'intégrant à part entière est nécessaire pour maîtriser les usages du sol et leurs conséquences. Au moment où l'on tire la sonnette d'alarme face au réchauffement de la planète – et ce plus encore dans la région méditerranéenne – et aux multiples conséquences qui se font d'ores et déjà sentir, la ville doit en urgence inventer sa part de solution par une urbanisation durable et via les processus d'atténuation du changement climatique. Face à cette urgence, la complexité du dispositif des intervenants et de leurs champs de compétence est notable et limite la cohérence des politiques d'aménagement, ou, *a minima*, leur efficacité.

Le troisième constat est celui de la non-viabilité du modèle actuel de développement. Les coûts sociaux d'un tel modèle peuvent éventuellement paraître satisfaisants sur le court terme, si quelques actions de correction ponctuelles des effets environnementaux sont implémentées. Cependant, à plus long terme, si ces coûts deviennent trop importants pour les citoyens, ils réduiront l'attractivité du territoire. L'exemple le plus clair est celui de l'éloignement des zones de résidence (toujours plus loin à l'intérieur des terres) des zones d'emplois (qui restent sur la côte). De ce point de vue, les mécanismes de fonctionnement de la ville sont mal connus et mal appréhendés, mais leur convergence vers une fragmentation morphologique, sociale et écologique est bien documentée. En particulier, la fragmentation et la fermeture des espaces sont deux aspects qui vont à l'encontre de la durabilité, principalement par la spécialisation des lieux et la diminution de la biodiversité. Les barrières physiques qui se constituent sont autant de situations de blocage à la mobilité des personnes comme des espèces. Nous avons encore peu de méthodologie d'étude de la morphologie urbaine, alors qu'elle constitue un des éléments clés des impacts possibles du changement climatique et même de la génération de gaz à effet de serre. L'îlot de chaleur urbain est un bon exemple ; il n'existe aucune modélisation suffisamment fine de son comportement ni de ses effets dans les quartiers de Marseille ou *a fortiori* dans les villes de la région. Il n'y a par ailleurs aucune étude sur le métabolisme urbain de nos villes de Provence et sur la génération de gaz à effet de serre ou de réchauffements localisés.

La ville de Marseille et sa métropole sont face à une forte demande de participation de la société civile car les politiques urbaines sont souvent déconnectées des préoccupations des citoyens. Il ne s'agit plus aujourd'hui de proposer, en matière d'urbanisme, des solutions techniques, *smart* ou innovantes, mais bien d'inclure des référentiels plus subjectifs comme la qualité de vie, le bien-être, les relations sociales, la présence de la nature en ville, la neutralité carbone, et les préoccupations toujours croissantes de préservation de l'environnement. Ainsi, la nécessité de repenser les politiques urbaines et l'aménagement vers plus de prise en charge des questions environnementales par les citoyens s'impose.

Le quatrième constat réside dans le mot *concentration*. Ce mot-clé, dans le contexte des risques naturels, industriels et liés aux variabilités du changement climatique, implique que nous donnions une urgence absolue à la construction d'une vision du développement futur de la région intégrant l'environnement et les questions de résilience urbaine. La Provence et la Côte d'Azur concentrent un cocktail d'aléas naturels et technologiques, qui coïncide avec la concentration de la population et des enjeux humains et naturels à protéger; toutes les populations sont en situation de risque. L'enjeu du risque urbain devient une priorité pour la recherche.

Face au changement climatique, la gestion de l'eau s'impose en premier lieu. La combinaison de différents facteurs comme la tension de la demande urbaine, l'imperméabilisation croissante des sols via l'urbanisation ou les extrêmes des pluies méditerranéennes (épisodes méditerranéens et crues associées, sécheresses) requiert des outils spécifiques d'alerte et de suivi. L'exemple des crues à Nice (octobre 2015) ou dans le Var (octobre 2018), pour ne parler que des plus récentes, nous rappelle qu'une vigilance constante n'est plus négociable. La position littorale de la plupart des villes importantes implique également des risques de submersion marine et de développement de petits raz de marée dévastateurs pour les côtes.

La même remarque vaut pour la question des incendies. En effet, des périodes de sécheresse plus fréquentes accroissent le risque d'incendie et l'intensité des feux. Dans le même temps, l'urbanisation croissante et le tourisme estival augmentent la population exposée et peu sensibilisée à ces questions, et la fréquence des feux aux portes de zones urbanisées ou d'infrastructures croît (autoroutes en particulier).

Enfin, le cinquième constat réside dans le mot *forçage*, mot un peu barbare qui signifie «perturbation d'un équilibre». Près de la moitié de cet ouvrage en fait état. La biodiversité terrestre, littorale ou marine est affectée par des situations diverses de forçage :

- espèces végétales invasives (introduites volontairement ou accidentellement) qui modifient considérablement les paysages et leur fonctionnalité, ou espèces opportunistes face au changement climatique (comme les bactéries, algues ou méduses);

- diminution de la biodiversité urbaine par la fragmentation et la diminution des espaces verts publics ;
- transformation des écosystèmes et disparition d'espèces endémiques sous l'effet d'une fréquence de feu accrue ;
- apparition d'espèces toxiques (cyanobactéries, par exemple) du fait de l'augmentation de la salinité des étangs ;
- artificialisation des sols par des pratiques trop intensives ;
- perturbation des écosystèmes par les pollutions multiples (industrielles du passé, rejets urbains et macrodéchets), etc.

Ces impacts sont souvent exacerbés en Méditerranée et particulièrement à Marseille. La ville est entourée d'un massif calcaire et non d'une zone agricole, ce qui lui donne un avantage pour la génération d'écosystèmes riches contenant beaucoup d'espèces endémiques. De même la mer, malgré sa pauvreté en sels minéraux et en plancton, est d'une très grande diversité, mais extrêmement sensible à des modifications de ses paramètres biologiques et chimiques. On sait que les variations de température et la fréquence des canicules ont une influence directe sur les communautés de gorgone et les migrations de poissons par exemple, qui deviennent de bons indicateurs de ce changement climatique.

Enjeux des connaissances scientifiques

Devant ces constats, les chercheurs font aussi face à de nombreux défis.

Le premier est sans doute celui de la création de connaissances spécifiques. Les changements environnementaux, associés à un développement économique non soutenable, sont des processus continus, relativement lents, qui demandent un suivi constant pour mesurer / suivre / comprendre / modéliser les évolutions du territoire Aix-Marseille : artificialisation, évolution des paysages, applications et efficacité de politiques publiques, etc. La construction et le suivi de bases de données sont un premier défi pour alimenter de telles recherches. Ces bases de données sont parfois onéreuses à mettre en place et à alimenter, et les pouvoirs publics ne sont pas toujours sensibilisés à un outil qui n'apporte pas de résultat immédiat. Le petit répertoire en fin de volume montre l'effort entrepris par les laboratoires d'OT-Med en matière d'observatoires et la diversité des mesures qu'ils procurent. Il reste à mettre en relation ces informations ; c'est le grand enjeu de l'interdisciplinarité qui se met en place depuis plusieurs années, mais dont les outils et mécanismes sont encore à améliorer.

Il reste par ailleurs des domaines thématiques sous-exploités et qui nécessiteraient des appuis spécifiques. Il faut par exemple renforcer le travail des naturalistes et le recensement des espèces et des écosystèmes susceptibles d'être impactés par le changement climatique. En effet, des espèces disparaissent en continu avant même d'être recensées, en particulier dans le milieu marin.

Les études taxonomiques restent donc indispensables, même si elles sont souvent perçues comme « démodées », et leur suivi dans le temps et dans le contexte de leurs écosystèmes est une tâche indispensable. Les particularités marseillaises liées à la préservation des sols et des milieux aquatiques d'eau douce ne sont sans doute pas assez étudiées par rapport à leur valeur et à leur vulnérabilité. Nous avons encore cité dans cette conclusion la modélisation du climat urbain, qui ne fait l'objet que de très peu d'études au niveau national. Les effets d'îlot de chaleur urbain risquent de handicaper le développement urbain dans le futur par l'accroissement de l'inconfort climatique, souvent délétère, par leurs conséquences sur la santé ou sur la biodiversité, par l'apparition de « sécheresses » urbaines, et par l'accroissement de la demande énergétique (climatisation). Il est donc urgent de s'intéresser à des mesures fines des relations entre morphologie urbaine, architecture et climat.

La même remarque s'applique à la modélisation des émissions et capture de CO₂ en ville. Les programmes en cours doivent être sans cesse renforcés pour comprendre comment fonctionne la ville et comment elle contribue aux GES. Ces programmes doivent être étendus aux écosystèmes naturels dont les forêts méditerranéennes qui sont encore à ce jour des puits de carbone, mais qui pourraient devenir des sources sous la contrainte du réchauffement.

D'une manière générale, nous ne savons pas grand-chose du fonctionnement de la ville du point de vue de son métabolisme, de son climat (en relation à sa morphologie), et des impacts des variabilités climatiques sur sa vulnérabilité physique et sociale, etc. Nous ne savons absolument pas si les propositions architecturales et urbanistiques d'aujourd'hui répondront aux nécessités des impacts du changement climatique dans quarante ou cinquante ans; tout comme nous ne savons pas, il y a cinquante ans, que le modèle des cités de banlieue serait un échec social et économique. Cette constatation nous appelle à plus d'humilité sur l'état de nos connaissances et à innover dans un cadre de changement de paradigme urbain. L'ambition nous semble devoir être de diminuer le métabolisme urbain, et pour cela, de mieux connaître ce métabolisme. C'est une connaissance qui existe malheureusement dans peu de villes de France. Par ailleurs, il est nécessaire d'évaluer les « modèles » urbains aujourd'hui en vogue comme les écoquartiers, les bâtiments intelligents, les villes zéro carbone, etc. à la lumière de ce métabolisme, des modèles de variabilité climatique et des conditions de durabilité sociale.

Cette question du suivi nous amène à celle de la construction d'indicateurs d'état et de suivi des manifestations et des impacts des changements environnementaux. Si nous désirons avoir des points de repère en matière d'évolution des espèces et des écosystèmes anthropiques et « naturels » et en relation avec les pressions socio-économiques et environnementales, il nous faut des indicateurs fiables, facilement mesurables, et qui puissent être utilisés directement par les pouvoirs publics dans leur gestion du territoire. Une même et unique référence est nécessaire du côté de la recherche et du côté des décideurs; c'est

indispensable pour l'efficacité de nos recherches et des actions de gestion. Le corail rouge a par exemple été cité comme un bon indicateur de la santé des écosystèmes marins; la question est maintenant de savoir s'il peut faire l'objet d'un suivi régulier, raisonnable du point de vue économique, et au service de la définition de politiques de gestion par les collectivités territoriales. Les conditions optimales de ce transfert font aussi partie des enjeux de recherche.

Un des défis de la recherche est ainsi le « transfert » de ces connaissances aux acteurs, ou mieux, les modalités de travail, d'échange et de dialogue avec les acteurs et les collectivités territoriales pour une meilleure gestion à long terme. L'interdisciplinarité que le LabEx OT-Med promeut depuis 2012 devrait être le moteur d'approches plus transversales dans les politiques environnementales et d'aménagement du territoire. De même, il est nécessaire d'intégrer les effets d'échelle dans nos recherches et dans les réflexions sur les politiques. Il est restrictif de penser seulement local, car les réponses se font sentir souvent à une échelle régionale, voire plus, comme nous le montre l'introduction du chapitre sur la mer.

Cette question du transfert tourne autour des questions environnementales, certes, mais surtout du modèle d'occupation de l'espace. Quelle limite à l'expansion, à la densification? Hypercentre ou multifonctionnalité? Ces questions appellent à être étudiées concrètement, en pesant leurs avantages et leurs inconvénients, et en réalisant un bilan pour connaître les options les plus favorables dans un processus de remédiation ou d'adaptation.

Enfin, nos recherches sont de plus en plus orientées vers des réponses opérationnelles. En termes de modèles comme en termes d'outils, les approches multirisques et la prise en compte des enjeux sociétaux (ségrégation, perception, acceptabilité, coût, etc.) nous permettent d'améliorer les outils de prévention, voire d'en créer de nouveaux. Enfin, les réponses issues de l'ingénierie ne sont pas forcément les plus efficaces ni innovantes par rapport à celles qui se basent sur des réseaux d'expériences (Association France Digue, MC3, etc.).

De ce panorama un peu pessimiste, il faut retenir la mobilisation de la communauté scientifique et le rapprochement, sans cesse croissant, de cette communauté avec les agences d'urbanisme et les institutions en charge de la gestion du territoire. À ce titre, le GREC-Sud (Groupe régional d'experts sur le climat en région Sud-PACA) est un bel exemple de dialogue entre les scientifiques et les acteurs. Ce dialogue est un élément très prometteur car, malgré les limites mentionnées précédemment, les savoirs s'accumulent et les mécanismes et impacts possibles du changement climatique sont de plus en plus connus. Il existe beaucoup d'outils et de techniques qui nous permettent d'affronter les transitions et dans la région qui nous occupe, celle de Marseille et de la Méditerranée, de nombreuses opportunités écologiques et économiques se présentent, à condition, bien sûr, que nous sachions choisir et maîtriser les bons paramètres.

De multiples initiatives existent déjà, souvent en association avec les laboratoires de recherche. Dans le domaine de l'agriculture péri-urbaine ou même urbaine, on se référera à l'article de M. Moussaoui et P. Rossello¹, sur le site du GREC-Sud, qui fait une analyse du « triangle vertueux de l'agriculture urbaine » (figure 1).

Dans le domaine de l'architecture et de l'urbanisme, des études et expériences sont réalisées sur la végétalisation des toits (Consortium scientifique, avec l'IMBE, l'université de Louvain et l'université d'Avignon, associant des financements d'entreprises du bâtiment et des collectivités) en association avec l'École d'architecture de Marseille; tout comme des études sur l'architecture des habitats et des jardins en relation avec les espèces envahissantes (moustiques avec les équipes du LPED et de l'école d'architecture). Un projet LIFE « Nature dans les villes : gouvernance pour l'adaptation au changement climatique dans les métropoles côtières de Provence-Alpes-Côte d'Azur », qui rassemble un laboratoire de recherche (LPED) et six collectivités locales et régionales, propose des formations virtuelles aux agents des collectivités pour développer l'intégration des infrastructures vertes et bleues dans les projets d'aménagements.

Dans le domaine des risques, c'est la mission de l'INRAE de développer des actions en relation avec les politiques publiques. Dans le domaine des risques, en particulier des incendies, les recherches sont appliquées directement dans les dispositifs de prévention et d'intervention. Le pôle SAFE est une association qui permet à ses adhérents, entreprises et laboratoires de recherche de coopérer et d'accompagner le montage de projets collaboratifs sur la thématique du « Risque ».

En matière énergétique, de très nombreuses associations² et entreprises proposent aujourd'hui une offre en matière de transition vers une production autonome d'énergie électrique. Le centre CEA de Cadarache, bien que dédié au nucléaire, dispose de plusieurs programmes d'énergie alternative (solaire et bioénergie), en collaboration avec Aix-Marseille Université, l'Ifremer ou le CEREGE.

La conscience de la contamination de l'espace maritime s'empare aujourd'hui de nombreuses associations qui développent des activités autour de l'éducation ou de la récolte des déchets sur le littoral ou en mer. Les opérations de sensibilisation « zéro plastique » qui ont lieu tous les étés sont un succès, tant dans la collaboration entre la région PACA et les associations que dans la

1 M. Moussaoui, P. Rossello, « L'émergence de l'agriculture urbaine en milieu méditerranéen : entre potentiel et illusions (focus sur la métropole d'Aix-Marseille-Provence) », <http://www.grec-sud.fr/article/emergence-agriculture-urbaine-metropole-aix-marseille-provence>. On se référera d'ailleurs aux nombreux cahiers du GREC-Sud qui montrent de nombreuses réalisations en matière d'adaptation au changement climatique.

2 Voir en particulier l'annuaire de l'ARPE : <http://www.arpe-paca.org/associations.asp?ThNum=Th00000408>.

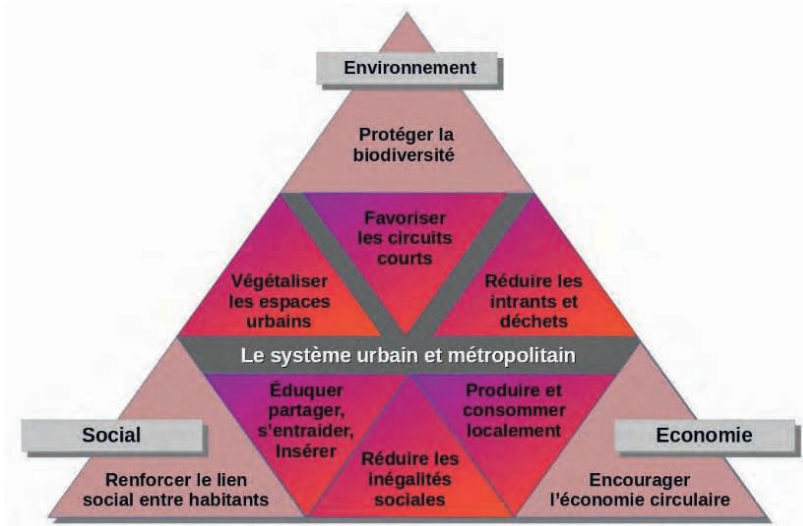


Figure 1. Triangle vertueux de l'agriculture urbaine. (Crédits : Myriam Moussaoui.)

prise en charge par les collectivités et l'Union européenne dans le cadre du plan climat, et dans les résultats sur les comportements des citoyens.

La mer Méditerranée est une masse énergétique précieuse, le soleil ne manque pas, et les vents qui balaient son littoral sont potentiellement sources d'énergie. La mobilisation de nos ressources humaines nous permettra de les utiliser au mieux et d'accompagner la transition environnementale déjà engagée en Méditerranée, grâce à une sensibilisation de l'ensemble des acteurs sur les enjeux décrits dans cet ouvrage.

Bibliographie

Chapitre 1

- COSTELLO, M.-J. *et al.* (2010) A census of marine biodiversity knowledge, resources, and future challenges, *PLOS ONE*, 5 (8), e12110, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0012110>.
- HASSAN, R., SCHOLTES, R., ASH, N. (2005) *Ecosystems and Human Well-Being: Current State and Trends. Findings of the Condition and Trends Working Group*, Washington, Island Press.
- LAUBIER, L. *et al.* (2003) La Méditerranée se réchauffe-t-elle?, *Marine Life*, 13 (12), p. 71-81.
- LEJEUSNE, C. *et al.* (2010) Climate change effects on a miniature ocean: the highly diverse, highly impacted Mediterranean Sea, *Trends in Ecology & Evolution*, 25 (4), p. 250-260, <https://doi.org/10.1016/j.tree.2009.10.009>.
- LEMONSU, A., GRIMMOND, C. S. B., MASSON, V. (2004) Modelisation of the surface energy budget of an old Mediterranean city core, *Journal of Applied Meteorology*, 43, p. 312-327.
- LEMONSU, A., PIGEON, G., MASSON, V., MOPPERT, C. (2006) Sea-town interactions over Marseille: 3D urban boundary layer and thermodynamic fields near the surface, *Theoretical and Applied Climatology*, 84 (1), p. 171-178, <https://doi.org/10.1007/s00704-005-0155-y>.
- PASCAL, M. *et al.* (2013) Definition of temperature thresholds: the example of the French heat wave warning system, *International Journal of Biometeorology*, 57 (1), p. 21-29, <https://doi.org/10.1007/s00484-012-0530-1>.
- ULLMANN, A., PIRAZZOLI, P. A., MORON, V. (2008) Sea surges around the Gulf of Lions and atmospheric conditions, *Global and Planetary Change*, 63 (2), p. 203-214, <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2007.10.002>.
- VENNETIER, M. *et al.* (2008) A new bioclimatic model calibrated with vegetation for Mediterranean forest areas, *Annals of Forest Science*, 65 (7), p. 711, <https://doi.org/10.1051/forest:2008050>.
- YOHIA, C. (2017) Genèse du mistral par interaction barocline et advection du tourbillon potentiel, *Climatologie*, 13, <https://doi.org/10.4267/climatologie.1182>.

Chapitre 2

- ARAÚJO, M.-B. (2003) The coincidence of people and biodiversity in Europe, *Global Ecology and Biogeography*, 12 (1), p. 512, <https://doi.org/10.1046/j.1466-822X.2003.00314.x>.
- BATLEY, T. (1991) A set of ethical principles to guide land use policy, *Land Use Policy*, 8 (1), p. 38, [https://doi.org/10.1016/0264-8377\(91\)90048-N](https://doi.org/10.1016/0264-8377(91)90048-N).
- BENOIT, G., COMEAU, A. (2012) *A Sustainable Future for the Mediterranean: The Blue Plan's Environment and Development Outlook*, Londres, Routledge.
- BERQUE, A., BONNIN, P., GHORRA-GOBIN, C. (2006) *La ville insoutenable*, Paris, Belin.
- BESSY-PIETRI, P. (2000) Les formes récentes de la croissance urbaine, *Économie et statistique*, 336 (6), p. 35-52.

- BRODY, S., CARRASCO, V., HIGHFIELD, W. E. (2006) Measuring the adoption of local sprawl: reduction planning policies in Florida, *Journal of Planning Education and Research*, 25 (3), p. 294-310, <https://doi.org/10.1177/0739456X05280546>.
- CASTEL, J.-C. (2007) De l'étalement urbain à l'émiettement urbain. Deux tiers des maisons construits en diffus, *Les Annales de la recherche urbaine*, 102 (1), p. 88-96, <https://doi.org/10.3406/aru.2007.2697>.
- CHAPIN III, F. S. *et al.* (2000) Consequences of changing biodiversity, *Nature*, 405 (6783), p. 234-242, <https://doi.org/10.1038/35012241>.
- CHARMES, E. (2007) Le malthusianisme foncier, *Études foncières*, 125 (1), p. 12-16.
- CHARMES, E. (2009) L'explosion péri-urbaine, *Études foncières*, 138 (1), p. 25-36.
- CHOAY, F. (1965) *L'urbanisme, utopies et réalités: une anthologie*, Paris, Éditions du Seuil.
- CLANCHÉ, F., RASCOL, O. (2011) Le découpage en unités urbaines de 2010: l'espace urbain augmente de 19 % en une décennie, *INSEE Première*, 1364.
- DARREL JENERETTE, G., POTERE, D. (2010) Global analysis and simulation of land-use change associated with urbanization, *Landscape Ecology*, 25 (5), p. 657-670, <https://doi.org/10.1007/s10980-010-9457-2>.
- DAVOUDI, S. *et al.* (2012) Resilience: a bridging concept or a dead end? "Reframing" resilience: challenges for planning theory and practice interacting traps: resilience assessment of a pasture management system in Northern Afghanistan urban resilience: what does it mean in planning practice? Resilience as a useful concept for climate change adaptation? The politics of resilience for planning: a cautionary note, *Planning Theory & Practice*, 13 (2), p. 299-333, <https://doi.org/10.1080/14649357.2012.677124>.
- DEDEIRE, M. (2002) La prise en compte du long terme en science régionale pour une autre lecture des dynamiques spatiales de l'agriculture française (1840-1990), *Revue d'économie régionale urbaine*, 4, p. 597-618.
- DEFRIES, R. *et al.* (2007) Land use change around protected areas: management to balance human needs and ecological function, *Ecological Applications*, 17 (4), p. 1031-1038, <https://doi.org/10.1890/05-1111>.
- DELATTRE, L. (2014) *Analyse des déterminants des choix de préservation des espaces agricoles et naturels dans les politiques locales d'urbanisme. Apports d'une approche multi-méthodes*, thèse de doctorat, École des hautes études en sciences sociales, <http://www.theses.fr/2013EHES0054#>.
- DELATTRE, L., CHANEL, O., NAPOLÉONE, C. (2012) Comment modéliser les déterminants locaux des espaces non urbanisés en France? L'apport d'une confrontation littérature-terrain, *Revue d'économie régionale et urbaine*, 5, p. 805-829.
- DELATTRE, L., CHANEL, O., NAPOLÉONE, C. (2014) Determinants of local public policies for farmland preservation and urban expansion: a French illustration, *Land Economics*, 90 (3).
- DUVERNOY, I., JARRIGE, F., MOUSTIER, P., SERRANO, J. (2005) Une agriculture multifonctionnelle dans le projet urbain: quelle reconnaissance, quelle gouvernance?, *Les Cahiers de la multifonctionnalité*, 8, p. 87-104.
- FISCHEL, W. A. (1987) *The Economics of Zoning Laws: A Property Rights Approach to American Land Use Controls*, Baltimore, JHU Press.
- FORMAN, R. T. T. (2008) The urban region: natural systems in our place, our nourishment, our home range, our future, *Landscape Ecology*, 23 (3), p. 251-253, <https://doi.org/10.1007/s10980-008-9209-8>.
- GENIAUX, G., NAPOLÉONE, C. (2005) Rente foncière et anticipations dans le péri-urbain, *Économie prévision*, 168 (2), p. 77-95.

- GRIMM, N. B., GROVE, J. G., PICKETT, S. T. A., REDMAN, C. L. (2000) Integrated approaches to long-term studies of urban ecological systems, *BioScience*, 50 (7), p. 571-584, [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2000\)050\[0571:İATLTO\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2000)050[0571:İATLTO]2.0.CO;2).
- HERSPERGER, A. M., LANGHAMER, D., DALANG, T. (2012) Inventorying human-made objects: a step towards better understanding land use for multifunctional planning in a periurban Swiss landscape, *Landscape and Urban Planning*, 105 (3), p. 307-314, <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2012.01.008>.
- LAWSON, D. M., LAMAR, C. K., SCHWARTZ, M. W. (2008) Quantifying plant population persistence in human-dominated landscapes, *Conservation Biology*, 22 (4), p. 922-928, <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2008.00936.x>.
- LEROI-GOURHAN, A. (1964) *Le geste et la parole*, t. I, *Technique et langage*, Paris, Albin Michel.
- MANLEY, P. N., PARKS, S. A., CAMPBELL, L. A., SCHLESINGER, M. D. (2009) Modeling urban land development as a continuum to address fine-grained habitat heterogeneity, *Landscape and Urban Planning*, 89 (1), p. 28-36, <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2008.09.005>.
- MCDONALD, R. I., KAREIVA, P., FORMAN, R. T. T. (2008) The implications of current and future urbanization for global protected areas and biodiversity conservation, *Biological Conservation*, 141 (6), p. 1695-1703, <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2008.04.025>.
- MCKINNEY, M. L. (2002) Urbanization, biodiversity, and conservation: the impacts of urbanization on native species are poorly studied, but educating a highly urbanized human population about these impacts can greatly improve species conservation in all ecosystems, *Bioscience*, 52 (10), p. 883-890.
- MÉDAIL, F., QUÉZEL, P. (1999) Biodiversity hotspots in the Mediterranean basin: setting global conservation priorities, *Conservation Biology*, 13 (6), p. 1510-1513, <https://doi.org/10.1046/j.1523-1739.1999.98467.x>.
- MEYER, W. B., TURNER, B. L. (1992) Human population growth and global land-use/cover change, *Annual Review of Ecology and Systematics*, 23 (1), p. 39-61.
- NAPOLÉONE, C., SANZ, E. (2013) *Intégrer les espaces naturels et agricoles dans la planification urbaine. Une démarche basée sur la caractérisation et la quantification spatiales du territoire et des paysages*, Nancy, Urbanités et Biodiversité.
- NGUYEN, M. T. (2009) Why do communities mobilize against growth: growth pressures, community status, metropolitan hierarchy, or strategic interaction?, *Journal of Urban Affairs*, 31 (1), p. 25-43, <https://doi.org/10.1111/j.1467-9906.2008.00427.x>.
- PÉRÈS, S. (2007) *La vigne et la ville: forme urbaine et usage des sols*, thèse de doctorat, Université Montesquieu – Bordeaux IV.
- PÉRÈS, S. (2009) Dynamique urbaine et rente foncière viticole dans le Bordelais. Une approche économétrique de la résistance, *Canadian Journal of Regional Science*, 32 (2), p. 241-255.
- RICHER, J. (1995) Explaining the vote for slow growth, *Public Choice*, 82 (3), p. 207-223, <https://doi.org/10.1007/BF01047694>.
- ROLLESTON, B. S. (1987) Determinants of restrictive suburban zoning: an empirical analysis, *Journal of Urban Economics*, 21 (1), p. 121, [https://doi.org/10.1016/0094-1190\(87\)90019-2](https://doi.org/10.1016/0094-1190(87)90019-2).
- SCHLÄPFER, F., HANLEY, N. (2003) Do local landscape patterns affect the demand for landscape amenities protection?, *Journal of Agricultural Economics*, 54 (1), p. 21-34, <https://doi.org/10.1111/j.1477-9552.2003.tb00046.x>.
- THEOBALD, D. M., ROMME, W. H. (2007) Expansion of the US wildland-urban interface, *Landscape and Urban Planning*, 83 (4), p. 340-354, <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2007.06.002>.

VIMAL, R. *et al.* (2012) Detecting threatened biodiversity by urbanization at regional and local scales using an urban sprawl simulation approach: application on the French Mediterranean region, *Landscape and Urban Planning*, 104 (3), p. 343-355, <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2011.11.003>.

Chapitre 3

AUDREN, G., BABY-COLLIN, V., DORIER, E. (2016a) Quelles mixités dans une ville fragmentée? Dynamiques locales de l'espace scolaire marseillais / Is there a place for social mixing in a fragmented city? Local dynamics of school choices in Marseille (France), *Lien social et politique*, 77, p. 38-61, <https://doi.org/10.7202/1037901ar>.

AUDREN, G., BOSSU, A., DARIO, J. (2016b) La fragmentation à Marseille, in ROBLES, C., MAZUREK, H. (éds.), *Les impromptus du LPED. Autour de la fragmentation*, Marseille, LPED, p. 50-64.

AUDREN, G., DORIER, E., ROUQUIER, D. (2019) Géographie de la fragmentation urbaine et territoires scolaires: effets des contextes locaux sur les pratiques scolaires à Marseille, in DANIC, B. *et al.* (dir.), *Les espaces de construction des inégalités éducatives*, Rennes, Presses universitaires de Rennes, p. 67-83.

BARTHÉLÉMY, C. *et al.* (2008) *Atlas analytique de la trame verte à Marseille* [rapport final du programme PIRVE, Programme interdisciplinaire de recherche ville et environnement], Marseille, PIRVE, LPED, TELEMME, ACTIGEO.

BARTHÉLÉMY, C. *et al.* (2017) *Petit atlas d'une ville-nature: jardins urbains et cultures buissonnières à Marseille*, Marseille, Wildproject.

BARTHÉLÉMY, C., CONSALÈS, J.-N. (2014) Ré-enchanter le territoire à partir de la biodiversité ordinaire: l'artiste, la friche et le jardin à Marseille, in *Les jardins dans la ville, entre nature et culture*, Rennes, Presses universitaires de Rennes, p. 305-315.

BERRY, I., DORIER, E., HAOUES, S., DARIO, J. (2015) La qualité environnementale en milieu urbain, évaluation pluridisciplinaire, introduction, *Méditerranée: revue géographique des pays méditerranéens*, 123, p. 3-11.

BRICHE, E., COLLANGE, L., MAZUREK, H. (2017a) *Climat et ville: interactions et enjeux en Provence-Alpes-Côte d'Azur*, Marseille, GREC-PACA.

BULKELEY, H. (2013) *Cities and Climate Change*, Abingdon, Routledge.

CHALVET, M., CLAEYS, C. (2011) Marseille, une ville méditerranéenne entre pénurie et inondation, *VertigO, la revue électronique en sciences de l'environnement*, hors-série 10, <https://doi.org/10.4000/vertigo.12083>.

CLERGEAU, P., BLANC, N. (2013) *Trames vertes urbaines. De la recherche scientifique au projet urbain*, Paris, Éditions du Moniteur.

DEBOUVERIE, J. (2018) *Développement durable et territoires*, vol. 9, n° 3, «L'altercité: rendre désirable la ville durable», Paris, Éditions Charles Léopold Mayer, <http://journals.openedition.org/developpementdurable/13010>.

DORIER, E. *et al.* (2010) *La diffusion des ensembles résidentiels fermés à Marseille. Les urbanités d'une ville fragmentée*, LPED [rapport de recherche].

DORIER, E., DARIO, J. (2016) Les résidences fermées en France, des marges choisies et construites, in GRÉSILLON, E., ALEXANDRE, B., SAJALOLI, B. (éds.), *La France des marges*, Paris, Armand Colin.

DORIER, E., BERRY-CHIKHAOUI, I., BRIDIER, S. (2012) Fermeture résidentielle et politiques urbaines, le cas marseillais, *Articulo. Journal of Urban Research*, 8, <https://doi.org/10.4000/articulo.1973>.

- DUMONT, M., HELLIER, E. (2010) *Les nouvelles périphéries urbaines. Formes, logiques et modèles de la ville contemporaine*, Rennes, Presses universitaires de Rennes.
- GEILING, F., BIDET, Y. (2015) Euroméditerranée Marseille: un projet urbain face au changement climatique, in TERRIN, J.-J. (éd.), *Villes et changement climatique. Îlots de chaleur urbains*, Marseille, Parenthèses.
- JUVANON DU VACHAT, R. (2015) *Villes et changement climatique. Îlots de chaleur urbains*, Marseille, Parenthèses.
- LIZÉE, M.-H. *et al.* (2011) Relative importance of habitat and landscape scales on butterfly communities of urbanizing areas, *Comptes Rendus Biologies*, 334 (1), p. 74-84, <https://doi.org/10.1016/j.crv.2010.11.001>.
- MANGIN, D. (2006) La rue en toutes franchises, *Pouvoirs*, 116 (1), p. 131-147.
- MAZUREK, H. (2018) Les modèles de ville durable en question, *La Documentation photographique*, n° 8125, « L'urbanisation du monde », Paris, La Documentation française.
- PAQUOT, T. (2016) *Terre urbaine: cinq défis pour le devenir urbain de la planète*, Paris, La Découverte, coll. « Poche ».
- PARRY, M. *et al.* (eds.) (2007) *Climate Change 2007. Impacts, Adaptation and Vulnerability: Working Group II Contribution to the Fourth Assessment Report of the IPCC (Vol. 4)*, Cambridge, Cambridge University Press.
- REIGNER, H., BRENAC, T., HERNANDEZ, F. (2014) *Nouvelles idéologies urbaines. Dictionnaire critique de la ville mobile, verte et sûre*, Rennes, Presses universitaires de Rennes.
- ROBLES, C., MAZUREK, H. (2016) *Les impromptus du LPED. Autour de la fragmentation*, Marseille, LPED.
- RONCAYOLO, M. (1996) *Les grammaires d'une ville: essai sur la genèse des structures urbaines à Marseille*, Paris, École des hautes études en sciences sociales.
- SALOMON CAVIN, J., BOURG, D. (2010) Deux conceptions de la durabilité urbaine: ville prométhéenne versus ville orphique, in PAQUOT, T., YOUNÈS, C. (éd.), *Philosophie de l'environnement et milieux urbains*, Paris, La Découverte, p. 117-136.
- SAUQUET, E. (2015) R2D2 2050: risque, ressource en eau et gestion durable de la Durance en 2050, *RéférenceS*, Direction de la recherche et de l'innovation (DRI) du Commissariat général au développement durable (CGDD), p. 47-55.
- SÉNÉCAL, G. (2007) Environnement urbain: cartographie d'un concept. Liminaire, *Environnement urbain / Urban Environment*, 1, p. 1-4.
- TOUATI, A. (2010) Histoire des discours politiques sur la densité, *Études foncières*, 145, p. 24-26.
- UNITED NATIONS HUMAN SETTLEMENT PROGRAMME (2011) *Cities and Climate Change: Global Report on Human Settlements*, Londres, Routledge.

Chapitre 4

- BONDUELLE, A., JOUZEL, J. (2014) *L'adaptation de la France au changement climatique mondial*, Conseil économique, social et environnemental, Les éditions des journaux officiels, NOR: CESL1400013X, http://www.pays-de-la-loire.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/2014_13_adaptation_changement_climatique.pdf.

Chapitre 5

- AUBERTIN, C. (2013) *Représenter la Nature ? ONG et biodiversité*, Paris, IRD Éditions.
- AUBERTIN, C., BOISVERT, V., VIVIEN, F.-D. (1998) La construction sociale de la question de la biodiversité, *Natures Sciences Sociétés*, 6 (1), p. 7-19.

- AURELLE, D. *et al.* (2011) Phylogeography of the red coral (*Corallium rubrum*): inferences on the evolutionary history of a temperate gorgonian, *Genetica*, 139 (7), 855, <https://doi.org/10.1007/s10709-011-9589-6>.
- BARDGETT, R. D., WARDLE, D. A. (2010) *Aboveground-Belowground Linkages: Biotic Interactions, Ecosystem Processes, and Global Change*, Oxford, Oxford University Press.
- BARRET, J., SCHWOB, I. (2005) Diversité végétale de la côte Bleue (secteur de Lavéra-La Couronne). Espèces d'intérêt patrimonial, *Bulletin de la Société linnéenne de Provence*, 56, p. 141-145.
- BAUMBERGER, T., AFFRE, L., CROZE, T., MESLÉARD, F. (2012a) Habitat requirements and population structure of the rare endangered *Limonium girardianum* in Mediterranean salt marshes, *Flora – Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants*, 207 (4), p. 283-293, <https://doi.org/10.1016/j.flora.2011.11.008>.
- BAUMBERGER, T., AFFRE, L., CROZE, T., MESLÉARD, F. (2012b) Co-occurring species indicate habitats of the rare *Limonium girardianum*, *Plant Ecology and Evolution*, 145 (1), p. 31-37, <https://doi.org/10.5091/plecevo.2012.685>.
- BAUMBERGER, T., AFFRE, L., CROZE, T., MESLÉARD, F. (2012c) Effects of submersion on survival, growth, and biomass allocation according to development stages of the rare halophyte *Limonium girardianum* L., *Aquatic Botany*, 102, p. 65-70, <https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2012.05.003>.
- BECK, S. *et al.* (2014) Towards a reflexive turn in the governance of global environmental expertise. The cases of the IPCC and the IPBES, *GAI – Ecological Perspectives for Science and Society*, 23 (2), p. 80-87, <https://doi.org/10.14512/gaia.23.2.4>.
- BENVENUTI, S. (2004) Weed dynamics in the Mediterranean urban ecosystem: ecology, biodiversity and management, *Weed Research*, 44 (5), p. 341-354, <https://doi.org/10.1111/j.1365-3180.2004.00410.x>.
- BERGANDI, D., BLANDIN, P. (2012) De la protection de la nature au développement durable : genèse d'un oxymore éthique et politique, *Revue d'histoire des sciences*, 65 (1), p. 103-142.
- BLANDIN, P. (2019) *De la protection de la nature au pilotage de la biodiversité*, Versailles, Quae.
- BOAVIDA, J. *et al.* (2016) A well-kept treasure at depth: precious red coral rediscovered in Atlantic deep coral gardens (SW Portugal) after 300 years, *PLoS One*, 11 (1), <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0147228>.
- BONIN, M., ANTONA, M. (2012) Généalogie scientifique et mise en politique des services écosystémiques et services environnementaux. Introduction au dossier, *VertigO, la revue électronique en sciences de l'environnement*, 12 (3), <https://doi.org/10.4000/vertigo.13147>.
- BORIE, M., HULME, M. (2015) Framing global biodiversity: IPBES between mother earth and ecosystem services, *Environmental Science & Policy*, 54, p. 487-496, <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2015.05.009>.
- BOSSU, A. (2015) *Rôle des jardins privés dans l'homogénéisation et la connectivité des paysages urbanisés méditerranéens*, thèse de doctorat, Aix-Marseille Université, <https://www.theses.fr/2015AIXM4758>.
- BRAMANTI, L. *et al.* (2013) Detrimental effects of ocean acidification on the economically important Mediterranean red coral (*Corallium rubrum*), *Global Change Biology*, 19 (6), p. 1897-1908, <https://doi.org/10.1111/gcb.12171>.
- BROWN, J. H. (1984) On the relationship between abundance and distribution of species, *The American Naturalist*, 124 (2), p. 255-279, <https://doi.org/10.1086/284267>.
- BRUNDTLAND, G. H. (1987) *Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future* (document A/42/427 – Development and international co-operation:

- environment), United Nations, <http://www.ask-force.org/web/Sustainability/Brundtland-Our-Common-Future-1987-2008.pdf>.
- BUISSON, E., DUTOIT, T. (2006) Creation of the natural reserve of La Crau: implications for the creation and management of protected areas, *Journal of Environmental Management*, 80 (4), p. 318-326, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2005.09.013>.
- BUREL, F., BAUDRY, J. (1999) *Écologie du paysage. Concepts, méthodes et applications*, n° 167-168, Paris, Librairie Lavoisier / Éditions TEC & DOC, <http://journals.openedition.org/etudesrurales/2968>.
- CAILLOL, H. (2011) *Catalogue des coléoptères de Provence. 5^e partie (Additions et corrections)*, vol. 80, Paris, MNHN.
- CHACE, J. F., WALSH, J. J. (2006) Urban effects on native avifauna: a review, *Landscape and Urban Planning*, 74 (1), p. 46-69, <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2004.08.007>.
- CHAPIN III, F. S. *et al.* (2000) Consequences of changing biodiversity, *Nature*, 405 (6783), p. 234-242, <https://doi.org/10.1038/35012241>.
- CHEPTOU, P.-O., LYZ, G. A. V. (2006) Pollination processes and the Allee effect in highly fragmented populations: consequences for the mating system in urban environments, *New Phytologist*, 172 (4), p. 774-783, <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2006.01880.x>.
- CHEVASSUS-AU-LOUIS, B. *et al.* (2009) *Approche économique de la biodiversité et des services liés aux écosystèmes: contribution à la décision publique*, n° 18, Paris, Ministère de l'Alimentation, de l'Agriculture et de la Pêche [rapport de recherche].
- CLAEYS, C. *et al.* (2019) Gardens, pesticides and mosquito-borne diseases: an interdisciplinary comparison between mainland France and the French Antilles, in CLAEYS, C. (ed.), *Mosquitoes Management. Between Environmental and Health Issues*, Berne, Peter Lang.
- CLAEYS, C., MIEULET, E. (2013) The spread of Asian tiger mosquitoes and related health risks along the French Riviera: an analysis of reactions and concerns amongst the local population, *International Review of Social Research*, 3 (2), p. 151-173, <https://doi.org/10.1515/irsr-2013-0015>.
- CLERGEAU, P., BLANC, N. (2013) *Trames vertes urbaines. De la recherche scientifique au projet urbain*, Paris, Éditions du Moniteur.
- CLOUARD, M. *et al.* (2014) Impact of lignite on pedogenetic processes and microbial functions in Mediterranean soils, *Geoderma*, 232-234, p. 257-269, <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.05.009>.
- COIFFAIT-GOMBAULT, C. (2011) *Règles d'assemblages et restauration écologique des communautés végétales herbacées méditerranéennes: le cas de la Plaine de La Crau (Bouches-du-Rhône, France)*, thèse de doctorat, Université d'Avignon, <https://www.theses.fr/2011AVIG0322>.
- COIFFAIT-GOMBAULT, C., BUISSON, E., DUTOIT, T. (2011) Hay transfer promotes establishment of Mediterranean steppe vegetation on soil disturbed by pipeline construction, *Restoration Ecology*, 19 (201), p. 214-222, <https://doi.org/10.1111/j.1526-100X.2010.00706.x>.
- COIFFAIT-GOMBAULT, C., BUISSON, E., DUTOIT, T. (2012) Are old Mediterranean grasslands resilient to human disturbances?, *Acta Oecologica*, 43, p. 86-94, <https://doi.org/10.1016/j.actao.2012.04.011>.
- COSTANZA, R. *et al.* (1997) The value of the world's ecosystem services and natural capital, *Nature*, 387 (6630), p. 253-260, <https://doi.org/10.1038/387253a0>.
- COURTOIS, G. (2000) Évolution de la réglementation concernant l'épandage des boues issues du traitement des eaux usées aspects sanitaires, *Forêt méditerranéenne*, 21 (3), p. 416-421.
- COWELL, C. M., STOUT, R. T. (2002) Dam-induced modifications to upper allegheny river streamflow patterns and their biodiversity implications, *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 38 (1), p. 187-196, <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2002.tb01545.x>.

- CRUTZEN, P. J., STOERMER, E. F. (2000) The anthropocene, *IGBP Global Change Newsletter*, 41, p. 17-18.
- DAILY, G. C. (1997) *Nature's Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems*, Washington, Island Press.
- DAILY, G. C. *et al.* (2011) Mainstreaming natural capital into decisions, in KAREIVA *et al.* (ed.), *Natural Capital: Theory and Practice of Mapping Ecosystem Services*, Oxford, Oxford University Press.
- DE BELLO, F. *et al.* (2010) Towards an assessment of multiple ecosystem processes and services via functional traits, *Biodiversity and Conservation*, 19 (10), p. 2873-2893, <https://doi.org/10.1007/s10531-010-9850-9>.
- DESCHAMPS-COTTIN, M. *et al.* (2013) Natures urbaines à Marseille : quels possibles pour une trame verte ?, in CLERGEAU, P., BLANC, N. (éd.), *Trame vertes urbaines. De la recherche scientifique au projet urbain*, Paris, Éditions du Moniteur.
- DÍAZ, S. *et al.* (2020) *Summary for Policymakers of the Global Assessment Report on Biodiversity and Ecosystem Services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services*, Bonn, IPBES secretariat, <https://doi.org/10.5281/zenodo.3553579>.
- DUTOIT, T. *et al.* (2011) Dix années de recherche dans une pseudo-steppe méditerranéenne : impacts des changements d'usage et restauration écologique, *Sécheresse*, 22 (2), p. 75-85.
- DUTOIT, T., JAUNATRE, R., BUISSON, E. (2013a) Mediterranean steppe restoration in France, in CLEWELL, A. F., ARONSON, A. J. (eds.), *Ecological Restoration Principles, Values, and Structure of an Emerging Profession*, Washington, Island Press.
- DUTOIT, T., BUISSON, E., COIFFAIT-GOMBAULT, C., JAUNATRE, R. (2013b) Résilience et restauration de la plaine de Crau, in TATIN, L. *et al.* (eds.), *Écologie et conservation d'une steppe méditerranéenne : la plaine de Crau*, Versailles, Quae.
- DUTOIT, T. *et al.* (2013c) The pseudo-steppe of La Crau (South-Eastern France): origin, management and restoration of a Mediterranean rangeland, in MORALES PRIETO, M. B., DIAZ, J. T. (eds.), *Steppe Ecosystems: Biological Diversity, Management and Restoration*, Hauppauge, Nova Science Publishers.
- ELTON, C. (1927) *Animal Ecology*, Chicago, University of Chicago Press.
- EVANS, K. L. (2010) Individual species and urbanisation, in GASTON, K. J. (ed.), *Urban Ecology*, Cambridge, Cambridge University Press, p. 53-87.
- FAHRIG, L. (2003) Effects of habitat fragmentation on biodiversity, *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 34 (1), p. 487-515, <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.34.011802.132419>.
- FARNET DA SILVA, A. M., BOUKHDOUD, N., GROS, R. (2016) Distance from the sea as a driving force of microbial communities under water potential stresses in litters of two typical Mediterranean plant species, *Geoderma*, 269, p. 1-9, <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.01.017>.
- FIGUIÈRES, C., SALLES, J.-M. (2012) *Donner un prix à la nature, c'est rendre visible l'invisible ou penser l'impensable ?*, Montpellier, UMR Lameta.
- GALPERN, P., MANSEAU, M., FALL, A. (2011) Patch-based graphs of landscape connectivity: a guide to construction, analysis and application for conservation, *Biological Conservation*, 144 (1), p. 44-55, <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2010.09.002>.
- GARRABOU, J. *et al.* (2009) Mass mortality in Northwestern Mediterranean rocky benthic communities: effects of the 2003 heat wave, *Global Change Biology*, 15 (5), p. 1090-1103, <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01823.x>.
- GARRABOU, J. *et al.* (2017) Re-shifting the ecological baseline for the overexploited Mediterranean red coral, *Scientific Reports*, 7 (1), 42404, <https://doi.org/10.1038/srep42404>.

- GARRABOU, J., HARMELIN, J. G. (2002) A 20-year study on life-history traits of a harvested long-lived temperate coral in the NW Mediterranean: insights into conservation and management needs, *Journal of Animal Ecology*, 71 (6), p. 966-978, <https://doi.org/10.1046/j.1365-2656.2002.00661.x>.
- GAUTIER, C., VALLUY, J. (1998) Générations futures et intérêt général. Éléments de réflexion à partir du débat sur le « développement durable », *Politix. Revue des sciences sociales du politique*, 11 (42), p. 7-36, <https://doi.org/10.3406/polix.1998.1723>.
- GHERARDI, F. (2010) Invasive crayfish and freshwater fishes of the world, *Revue scientifique et technique*, 29 (2), 241.
- GODARD, O. (1997) Social decision-making under scientific controversy, expertise, and the precautionary principle, in JOERGES, C., LADEUR, K.-H., VOS, E. (eds.), *Integrating Scientific Expertise into Regulatory Decisionmaking: National Experiences and European Innovations*, Baden, Nomos Verlagsgesellschaft, p. 39-73.
- GODEFROID, S. *et al.* (2011) How successful are plant species reintroductions?, *Biological Conservation*, 144 (2), p. 672-682, <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2010.10.003>.
- GÓMEZ-BAGGETHUN, E., DE GROOT, R., LOMAS, P. L., MONTES, C. (2010) The history of ecosystem services in economic theory and practice: from early notions to markets and payment schemes, *Ecological Economics*, 69 (6), p. 1209-1218, <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2009.11.007>.
- GRIME, J. P. (2006) Trait convergence and trait divergence in herbaceous plant communities: mechanisms and consequences, *Journal of Vegetation Science*, 17 (2), p. 255-260, <https://doi.org/10.1111/j.1654-1103.2006.tb02444.x>.
- GRINNELL, J. (1917) Field tests of theories concerning distributional control, *The American Naturalist*, 51 (602), p. 115-128, <https://doi.org/10.1086/279591>.
- GUILLAMOT, F., CALVERT, V., MILLOT, M.-V., CRIQUET, S. (2014) Does antimony affect microbial respiration in Mediterranean soils? A microcosm experiment, *Pedobiologia*, 57 (2), p. 119-121, <https://doi.org/10.1016/j.pedobi.2014.01.003>.
- GUIOT, J., CRAMER, W. (2016) Climate change: the 2015 Paris Agreement thresholds and Mediterranean basin ecosystems, *Science*, 354 (6311), p. 465-468, <https://doi.org/10.1126/science.aah5015>.
- HAGUENAUER, A., ZUBERER, F., LEDOUX, J.-B., AURELLE, D. (2013) Adaptive abilities of the Mediterranean red coral *Corallium rubrum* in a heterogeneous and changing environment: from population to functional genetics, *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 449, p. 349-357, <https://doi.org/10.1016/j.jembe.2013.10.010>.
- HARDION, L. *et al.* (2016) Geographical isolation caused the diversification of the Mediterranean thorny cushion-like *Astragalus* L. sect. *Tragacantha* DC. (Fabaceae), *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 97, p. 187-195, <https://doi.org/10.1016/j.ympev.2016.01.006>.
- HOBBS, R. J. *et al.* (2006) Novel ecosystems: theoretical and management aspects of the new ecological world order, *Global Ecology and Biogeography*, 15 (1), p. 17, <https://doi.org/10.1111/j.1466-822X.2006.00212.x>.
- HUTCHINSON, G. E. (1957) Concluding remarks, *Cold Spring Harbor Symposia on Quantitative Biology*, 22, p. 415-427, <https://doi.org/10.1101/SQB.1957.022.01.039>.
- IPBES (2019) *Summary for Policymakers of the Global Assessment Report on Biodiversity and Ecosystem Services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services*, Bonn, IPBES secretariat, <https://doi.org/10.5281/zenodo.3553579>.
- IPCC (2018) *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the Impacts of Global Warming of 1.5°C Above Pre-industrial Levels and Related Global Greenhouse Gas Emission Pathways*, in

- the Context of Strengthening the Global Response to the Threat of Climate Change, Sustainable Development, and Efforts to Eradicate Poverty*, Genève, IPCC secretariat.
- IPCC (2019) *Climate Change and Land: An IPCC Special Report on Climate Change, Desertification, Land Degradation, Sustainable Land Management, Food Security, and Green House Gas Fluxes in Terrestrial Ecosystems*, Genève, IPCC secretariat.
- JAUNATRE, R., BUISSON, E., DUTOIT, T. (2014) Can ecological engineering restore Mediterranean rangeland after intensive cultivation? A large-scale experiment in southern France, *Ecological Engineering*, 64, p. 202-212, <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.12.022>.
- JAUNATRE, R., BUISSON, E., DUTOIT, T., DOLIDON, B. (2011) Note méthodologique : exemple de restauration de la plaine de La Crau. L'écologie de la restauration face à la restauration écologique, *Sciences Eaux Territoires*, 2 (5), p. 36-39.
- JOHANET, A., KABOUCHE, B. (2019) *La faune des Bouches-du-Rhône*, Mèze, Biotopie éditions.
- KINDLMANN, P., BUREL, F. (2008) Connectivity measures: a review, *Landscape Ecology*, 23 (8), p. 879-890, <https://doi.org/10.1007/s10980-008-9245-4>.
- KNAPP, S. *et al.* (2012) Phylogenetic and functional characteristics of household yard floras and their changes along an urbanization gradient, *Ecology*, 93 (sp8), p. 83-98, <https://doi.org/10.1890/11-0392.1>.
- KNITTWIJS, L. *et al.* (2016) *New Depth Record of the Precious Red Coral Corallium Rubrum for the Mediterranean*, Monaco, Commission internationale pour l'exploration scientifique de la mer Méditerranée, <https://www.um.edu.mt/library/oar/handle/123456789/18340> [rapport de recherche].
- KONDOLF, G. M., BATALLA, R. J. (2005) Hydrological effects of dams and water diversions on rivers of Mediterranean-climate regions: examples from California, in GARCIA, C., BATALLA, R. J. (eds.), *Catchment Dynamics and River Processes: Mediterranean and Other Climate Regions*, Amsterdam, Elsevier.
- KROSBY, M., TEWKSBUURY, J., HADDAD, N. M., HOEKSTRA, J. (2010) Ecological connectivity for a changing climate, *Conservation Biology*, 24 (6), p. 1686-1689, <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2010.01585.x>.
- LAFFONT-SCHWOB, I. *et al.* (2011) Insights on metal-tolerance and symbionts of the rare species *Astragalus tragacantha* aiming at phytostabilization of polluted soils and plant conservation, *Ecologia Mediterranea*, 37 (2), p. 57-62, <https://doi.org/10.3406/ecmed.2011.1338>.
- LAHMAR, R., RUELLAN, A. (2007) Dégradation des sols et stratégies coopératives en Méditerranée : la pression sur les ressources naturelles et les stratégies de développement durable, *Cahiers Agricultures*, 16 (4), p. 318-323, <https://doi.org/10.1684/agr.2007.0119>.
- LASCOUMES, P. (2012) Acteurs et institutions de l'environnement, in LASCOUMES, P., *Action publique et environnement*, Paris, Presses universitaires de France, coll. « Que sais-je? », p. 50-79.
- LASCOUMES, P., LE BOURHIS, J.-P. (1998) Le bien commun comme construit territorial. Identités d'action et procédures, *Politix. Revue des sciences sociales du politique*, 11 (42), p. 37-66, <https://doi.org/10.3406/polix.1998.1724>.
- LAVELLE, P., SPAIN, A. (2001) *Soil Ecology*, Dordrecht, Springer.
- LEDOUX, J.-B. *et al.* (2010) Genetic survey of shallow populations of the Mediterranean red coral [*Corallium rubrum* (Linnaeus, 1758)]: new insights into evolutionary processes shaping nuclear diversity and implications for conservation, *Molecular Ecology*, 19 (4), p. 675-690, <https://doi.org/10.1111/j.1365-294X.2009.04516.x>.
- LE GALLIOT, N. (2017) Modélisation de l'histoire démographique d'*Arenaria provincialis*: aspects temporels et populationnels, mémoire de master 1 en biodiversité, écologie et évolution.

- LE LOUARN, M. (2014) La perruche à collier *Psittacula krameri*: modélisation des habitats potentiels de deux populations introduites en France, mémoire de M2 SET recherche, parcours BIOECO.
- LE LOUARN, M., CLERGEAU, P., BRICHE, E., DESCHAMPS-COTTIN, M. (2017) "Kill two birds with one stone": urban tree species classification using bi-temporal Pléiades images to study nesting preferences of an invasive bird, *Remote Sensing*, 9 (9), 916, <https://doi.org/10.3390/rs9090916>.
- LE LOUARN, M., CLERGEAU, P., STRUBBE, D., DESCHAMPS-COTTIN, M. (2018) Dynamic species distribution models reveal spatiotemporal habitat shifts in native range-expanding versus non-native invasive birds in an urban area, *Journal of Avian Biology*, 49 (4), p. 15-27, <https://doi.org/10.1111/jav.01527>.
- LEVREL, H. (2006) *Biodiversité et développement durable: quels indicateurs ?*, thèse de doctorat, École des hautes études en sciences sociales, <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00128430>.
- LIZÉE, M.-H. *et al.* (2012) Matrix configuration and patch isolation influences override the species-area relationship for urban butterfly communities, *Landscape Ecology*, 27 (2), p. 159-169, <https://doi.org/10.1007/s10980-011-9651-x>.
- LIZÉE, M.-H., TATONI, T., DESCHAMPS-COTTIN, M. (2016) Nested patterns in urban butterfly species assemblages: respective roles of plot management, park layout and landscape features, *Urban Ecosystems*, 19 (1), p. 205-224, <https://doi.org/10.1007/s11252-015-0501-5>.
- LIZÉE, M.-H., MAUFFREY, J.-F., TATONI, T., DESCHAMPS-COTTIN, M. (2011) Monitoring urban environments on the basis of biological traits, *Ecological Indicators*, 11 (2), p. 353-361, <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2010.06.003>.
- LOCHER, F., QUENET, G. (2009) L'histoire environnementale: origines, enjeux et perspectives d'un nouveau chantier, *Revue d'histoire moderne contemporaine*, 56 (4), p. 7-38.
- LOSOSOVÁ, Z. *et al.* (2006) Patterns of plant traits in annual vegetation of man-made habitats in central Europe, *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, 8 (2), p. 69-81, <https://doi.org/10.1016/j.ppees.2006.07.001>.
- LOVEJOY, T. (1980) Foreword, in SOULÉ, M. E., WILCOX, B. A. (eds.), *Conservation Biology: An Evolutionary-Ecological Perspective*, Sunderland, Sinauer Associates Inc., p. 395.
- MARIS, V. (2014) *Nature à vendre: les limites des services écosystémiques*, Versailles, Quae.
- MARSCHAL, C., GARRABOU, J., HARMELIN, J. G., PICHON, M. (2004) A new method for measuring growth and age in the precious red coral *Corallium rubrum* (L.), *Coral Reefs*, 23 (3), p. 423-432, <https://doi.org/10.1007/s00338-004-0398-6>.
- MCCAULEY, D. J. (2006) Selling out on nature, *Nature*, 443 (7107), p. 27-28, <https://doi.org/10.1038/443027a>.
- MEADOWS, D. H., MEADOWS, D. L., RANDERS, J., BEHRENS, W. W. (2018) The limits to growth, in CONCA, K., DABELKO, G. D. (eds.), *Green Planet Blues: Critical Perspectives on Global Environmental Politics*, New York, Westview Press.
- MÉDAIL, F., BAUMEL, A. (2018) Using phylogeography to define conservation priorities: the case of narrow endemic plants in the Mediterranean Basin hotspot, *Biological Conservation*, 224, p. 258-266, <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2018.05.028>.
- MEINARD, Y. (2011) *L'expérience de la biodiversité: philosophie et économie du rapport à l'environnement*, Paris, Hermann.
- MEINARD, Y. (2014) La place des valeurs dans l'étude des systèmes d'interaction hommes / milieux naturels, in CHENORKIAN, R., ROBERT, S. (éds.), *Les interactions hommes-milieux: questions et pratiques de la recherche en environnement*, Versailles, Quae.

- MEINARD, Y., MESTRALLET, J. (2018) La signification du statut de bien public de la biodiversité, in CASETTA, E., DELORD, J. (éds.), *La biodiversité en question: enjeux philosophiques, éthiques et scientifiques*, Paris, Éditions Matériologiques.
- MENGES, E. S. (2008) Restoration demography and genetics of plants: when is a translocation successful?, *Australian Journal of Botany*, 56 (3), p. 187-196, <https://doi.org/10.1071/BT07173>.
- MÉRAL, P., PESCHE, D. (2016) *Les services écosystémiques: repenser les relations nature et société*, Versailles, Quae.
- METZGER, M. J. *et al.* (2006) The vulnerability of ecosystem services to land use change, *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 114 (1), p. 69-85, <https://doi.org/10.1016/j.agee.2005.11.025>.
- MICOUD, A. (2005) La biodiversité est-elle encore naturelle?, *Écologie politique*, 30 (1), p. 17-25.
- MOLINA-MONTENEGRO, M. A., BADANO, E. I., CAVIERES, L. A. (2008) Positive interactions among plant species for pollinator service: assessing the 'magnet species' concept with invasive species, *Oikos*, 117 (12), p. 1833-1839, <https://doi.org/10.1111/j.0030-1299.2008.16896.x>.
- MOLINIER, R. (1981) *Catalogue des plantes vasculaires des Bouches-du-Rhône*, Marseille, Orchidaceae.
- MORITZ, C. (2002) Strategies to protect biological diversity and the evolutionary processes that sustain it, *Systematic Biology*, 51 (2), p. 238-254, <https://doi.org/10.1080/10635150252899752>.
- MORITZ, C., AGUDO, R. (2013) The future of species under climate change: resilience or decline?, *Science*, 341 (6145), p. 504-508, <https://doi.org/10.1126/science.1237190>.
- OSTROM, E. (1990) *Governing the Commons: The Evolution of Institutions for Collective Action*, Cambridge, Cambridge University Press.
- PATERSON, R. A., TOWNSEND, C. R., POULIN, R., TOMPKINS, D. M. (2011) Introduced brown trout alter native acanthocephalan infections in native fish, *Journal of Animal Ecology*, 80 (5), p. 990-998, <https://doi.org/10.1111/j.1365-2656.2011.01834.x>.
- PIVOTTO, I. D. *et al.* (2015) Highly contrasted responses of Mediterranean octocorals to climate change along a depth gradient, *Royal Society Open Science*, 2 (5), 140493, <https://doi.org/10.1098/rsos.140493>.
- POUGET, M. *et al.* (2013) Phylogeography sheds light on the central-marginal hypothesis in a Mediterranean narrow endemic plant, *Annals of Botany*, 112 (7), p. 1409-1420, <https://doi.org/10.1093/aob/mct183>.
- POUGET, M. *et al.* (2016) Spatial mismatches between plant biodiversity facets and evolutionary legacy in the vicinity of a major Mediterranean city, *Ecological Indicators*, 60, p. 736-745, <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.07.017>.
- PRATLONG, M. *et al.* (2015) The red coral (*Corallium rubrum*) transcriptome: a new resource for population genetics and local adaptation studies, *Molecular Ecology Resources*, 15 (5), p. 1205-1215, <https://doi.org/10.1111/1755-0998.12383>.
- PRATLONG, M. *et al.* (2018) Separate the wheat from the chaff: genomic scan for local adaptation in the red coral *Corallium rubrum*, *BioRxiv*, 306456, <https://doi.org/10.1101/306456>.
- RAUNKJÆR, C. (1934) *The Life Forms of Plants and Statistical Plant Geography. Being the Collected Papers of C. Raunkjær*, Oxford, Clarendon Press.
- RAZZAQUE, J., VISSEREN-HAMAKERS, I. (2019) Chapter 6: options for decision makers, in DÍAZ, S. *et al.* (eds.), *Summary for Policymakers of the Global Assessment Report on Biodiversity and Ecosystem Services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services*, Bonn, IPBES secretariat, <https://doi.org/10.5281/zenodo.3553579>.

- RIBEIRO, F., LEUNDA, P. M. (2012) Non-native fish impacts on Mediterranean freshwater ecosystems: current knowledge and research needs, *Fisheries Management and Ecology*, 19 (2), p. 142-156, <https://doi.org/10.1111/j.1365-2400.2011.00842.x>.
- SALDUCCI, M.-D. *et al.* (2019) How can a rare protected plant cope with the metal and metalloids soil pollution resulting from past industrial activities? Phytometabolites, antioxidant activities and root symbiosis involved in the metal tolerance of *Astragalus tragacantha*, *Chemosphere*, 217, p. 887-896, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.11.078>.
- SANTINI, C. (2013) Promenades plantées et espaces verts : un regard historique sur la nature en ville de Paris, *Cahiers DEMETER*, p. 211-226.
- SAURA, S., RUBIO, L. (2010) A common currency for the different ways in which patches and links can contribute to habitat availability and connectivity in the landscape, *Ecography*, 33 (3), p. 523-537, <https://doi.org/10.1111/j.1600-0587.2009.05760.x>.
- SCHRÖTER, M. *et al.* (2014) Ecosystem services as a contested concept: a synthesis of critique and counter-arguments, *Conservation Letters*, 7 (6), p. 514-523, <https://doi.org/10.1111/conl.12091>.
- SEASTEDT, T. R., HOBBS, R. J., SUDING, K. N. (2008) Management of novel ecosystems: are novel approaches required?, *Frontiers in Ecology and the Environment*, 6 (10), p. 547-553, <https://doi.org/10.1890/070046>.
- STEFFEN, W., GRINEVALD, J., CRUTZEN, P., MCNEILL, J. (2011) The anthropocene: conceptual and historical perspectives, *Philosophical Transactions of the Royal Society: A Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 369 (1938), p. 842-867, <https://doi.org/10.1098/rsta.2010.0327>.
- SUKHDEV, P. *et al.* (2010) *The Economics of Ecosystems and Biodiversity: Mainstreaming the Economics of Nature. A Synthesis of the Approach, Conclusions and Recommendations of TEEB*, Gland, Progress Press, UNEP.
- THEYS, J. (1993) *L'environnement à la recherche d'une définition*, Orléans, Institut français de l'environnement.
- THEYS, J. (2003) La gouvernance, entre innovation et impuissance. Le cas de l'environnement, *Développement durable et territoires. Économie, géographie, politique, droit, sociologie*, dossier 2, Gouvernance locale et développement durable, <https://doi.org/10.4000/developpementdurable.1523>.
- TORRENTS, O., GARRABOU, J., MARSCHAL, C., HARMELIN, J. G. (2005) Age and size at first reproduction in the commercially exploited red coral *Corallium rubrum* (L.) in the Marseilles area (France, NW Mediterranean), *Biological Conservation*, 121 (3), p. 391-397, <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2004.05.010>.
- TORRENTS, O., TAMBUTTÉ, E., CAMINITI, N., GARRABOU, J. (2008) Upper thermal thresholds of shallow vs. deep populations of the precious Mediterranean red coral *Corallium rubrum* (L.): assessing the potential effects of warming in the NW Mediterranean, *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 357 (1), p. 7-19, <https://doi.org/10.1016/j.jembe.2007.12.006>.
- TÓTH, G., STOLBOVOY, V., MONTANARELLA, L. (2007) *Soil Quality and Sustainability Evaluation. An Integrated Approach to Support Soil-Related Policies of the European Union*, Luxembourg, Office for Official Publications of the European Communities.
- VÉLA, E. *et al.* (2001) Liste des plantes vasculaires du site classé des Calanques (Marseille, Cassis, Bouches-du-Rhône), *Bulletin de la Société linnéenne de Provence*, 52, p. 139-148.
- VERGALLI, J. *et al.* (2016) Salt tolerance of *Planktothrix agardhii* (Gomont) Anagnostidis & Komárek (cyanoprokaryota) between freshwater and brackish strains in batch cultures, *Algalological Studies*, 150 (1), p. 3-19, https://doi.org/10.1127/algol_stud/2015/0210.

- VIDAL-MARTÍNEZ, V. M. *et al.* (2010) Can parasites really reveal environmental impact?, *Trends in Parasitology*, 26 (1), p. 44-51, <https://doi.org/10.1016/j.pt.2009.11.001>.
- VIVIEN, F.-D. (2003) Jalons pour une histoire de la notion de développement durable, *Mondes en développement*, 121 (1), p. 1-21.
- WILSON, E. O. (1992) *The Diversity of Life*, Londres, The Penguin Press.
- YAALON, D. H. (1997) Soils in the Mediterranean region: what makes them different?, *CATENA*, 28 (3), p. 157-169, [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(96\)00035-5](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(96)00035-5).
- YOUSSEF, S. *et al.* (2011) Factors underlying the narrow distribution of the Mediterranean annual plant *Arenaria provincialis* (Caryophyllaceae), *Folia Geobotanica*, 46 (4), p. 327-350, <https://doi.org/10.1007/s12224-011-9101-1>.

Chapitre 6

- AFFRE, L. *et al.* (2015) Regard écologique sur le recul stratégique: atouts et risques pour la diversité végétale péri-urbaine marseillaise, *VertigO, la revue électronique en sciences de l'environnement*, hors-série 21, <https://doi.org/10.4000/vertigo.15748>.
- BEAU, J.-P., FERRIER, J.-P., GIRARD, N., RICHEZ, J. (1978) Fos-sur-Mer: un espace clé pour la compréhension des changements de la société française, *Méditerranée*, 34 (4), p. 27-44, <https://doi.org/10.3406/medit.1978.1796>.
- BERTONCELLO, B., GIRARD, N. (2001) Les politiques de centre-ville à Naples et à Marseille: quel renouvellement urbain?, *Méditerranée*, 96 (1), p. 61-70, <https://doi.org/10.3406/medit.2001.3209>.
- BERTONCELLO, B., RODRIGUES-MALTA, R. (2003) Marseille versus Euroméditerranée / Marseille versus the Euromediterranean, *Annales de Géographie*, 112 (632), p. 424-436.
- BESANCENOT, J.-P. (2002) Vagues de chaleur et mortalité dans les grandes agglomérations urbaines, *Environnement, Risques & Santé*, 1 (4), p. 229-240.
- BESANCENOT, J.-P. (2007) *Notre santé à l'épreuve du changement climatique*, Paris, Delachaux et Niestlé.
- BIDET, Y. (2013) *Étude de l'impact météorologique de l'aménagement Euromed 2 en période de canicule*, p. 99 [rapport final de l'étude résultant du partenariat Météo-France – Euroméditerranée].
- BOUDOURESQUE, C.-F. *et al.* (2012) *Protection and Conservation of Posidonia Oceanica Meadows*, Marseille, RAMOGE / RAC/SPA.
- BOUDOURESQUE, C. F., BIANCHI, C. N. (2013) Une idée neuve: la protection des espèces marines, in LE DIRÉACH, L., BOUDOURESQUE, C. F. (éds.), *GIS Posidonie: plus de trente ans au service de la protection et de la gestion du milieu marin*, Marseille, GIS Posidonie, p. 184.
- CHALVET, M., CLAEYS, C. (2011) Marseille, une ville méditerranéenne entre pénurie et inondation, *VertigO, la revue électronique en sciences de l'environnement*, hors-série 10, <https://doi.org/10.4000/vertigo.12083>.
- CLAEYS, C. (2014) Créer un parc national des Calanques: préserver, partager ou confisquer un patrimoine socio-naturel?, *Annales de géographie*, 698 (4), p. 995-1015.
- CORLAY, J.-P. (1995) Géographie sociale, géographie du littoral, *Noroi*, 165 (1), p. 247-265, <https://doi.org/10.3406/noroi.1995.6623>.
- DAUMALIN, X. (2006) Industrie et environnement en Provence sous l'Empire et la Restauration, *Rives méditerranéennes*, 23, p. 27-46, <https://doi.org/10.4000/rives.522>.
- DAUMALIN, X. (2014) *Le patronat marseillais et la deuxième industrialisation. 1880-1930*, Aix-en-Provence, Presses universitaires de Provence, coll. « Le Temps de l'histoire ».

- DAUMALIN, X. *et al.* (2016) *Les calanques industrielles de Marseille et leurs pollutions: une histoire au présent*, Aix-en-Provence, Ref²C.
- DAUMALIN, X., GIRARD, N., RAVEUX, O. (2003) *Du savon à la puce: l'industrie marseillaise du XVII^e siècle à nos jours*, Marseille, Jeanne Laffitte.
- DAVIET, S., ROBERT, S. (2012) Faut-il bannir l'industrie des territoires méditerranéens ? Analyser la place de l'industrie dans la durabilité des territoires, in MÉSINI, B. (éd.), *Aménagement durable des territoires méditerranéens*, Aix-en-Provence, Presses universitaires de Provence, coll. « Espace et développement durable ».
- DELDRÈVE, V., DEBOUDT, P. (2012) *Le parc national des Calanques: construction territoriale, concertation, usages*, Versailles, Quae.
- DREAL PACA (2014a) *Territoire à Risque Important d'inondation (TRI) de Marseille – Aubagne. Cartographie des surfaces inondables et des risques – Service Prévention des Risques*, p. 6 [résumé non technique].
- DREAL PACA (2014b) *Territoire à Risque Important d'inondation (TRI) de Marseille – Aubagne. Cartographie des surfaces inondables et des risques – Service Prévention des Risques*, p. 32 [rapport explicatif].
- FAGET, D. (2011) *Marseille et la mer*, Rennes, Presses universitaires de Rennes / Aix-en-Provence, Presses universitaires de Provence.
- FONTANEL, J., GASNAULT, F. (2006) *Sur les quais: une histoire portuaire des Bouches-du-Rhône. Archives départementales*, Marseille, Images en manœuvres.
- GOIFFON, M., CONSALES, J.-N. (2005) Le massif des Calanques (Marseille-Cassis) et la Pointe des Châteaux (Saint-François, Guadeloupe). Périmètres d'intervention et mesures de protection sur deux grands sites littoraux péri-urbains, *Méditerranée. Revue géographique des pays méditerranéens / Journal of Mediterranean Geography*, 105, p. 29-35, <https://doi.org/10.4000/mediterranee.339>.
- IFREMER (2017) *Activité des navires de pêche 2016. Quartier maritime de Marseille*, p. 18 [système d'information halieutique de l'Ifremer].
- LAFONT-SCHWOB, I. (2015) Impacts présents d'activités industrielles passées : le cas de l'ancienne usine de plomb et d'argent de l'Escalette dans les Bouches-du-Rhône, *L'Atelier méditerranéen*, hors-série 21, p. 301-319.
- LAMBERT-HABIB, M. L. *et al.* (2011) *VuLiGAM – Vulnérabilité des systèmes Littoraux d'une Grande Agglomération Méditerranéenne*, p. 99 [rapport final].
- LANGLADE, I. (1999) *Marseille: littoral et gens de mer*, Tours, Sutton éditions.
- LASRAM, F. B. R. *et al.* (2010) The Mediterranean Sea as a 'cul-de-sac' for endemic fishes facing climate change, *Global Change Biology*, 16 (12), p. 3233-3245, <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2010.02224.x>.
- LAUBIER, L. *et al.* (2003) La Méditerranée se réchauffe-t-elle ?, *Marine Life*, 13 (12), p. 71-81.
- MÉDAIL, F., QUÉZEL, P. (1999) Biodiversity hotspots in the Mediterranean basin: setting global conservation priorities, *Conservation Biology*, 13 (6), p. 1510-1513, <https://doi.org/10.1046/j.1523-1739.1999.98467.x>.
- MÉDAIL, F., VERLAQUE, R. (1997) Ecological characteristics and rarity of endemic plants from southeast France and Corsica: implications for biodiversity conservation, *Biological Conservation*, 80 (3), p. 269-281, [https://doi.org/10.1016/S0006-3207\(96\)00055-9](https://doi.org/10.1016/S0006-3207(96)00055-9).
- METL (2013) *Le Schéma de Cohérence Territoriale (SCoT). Un projet stratégique partagé pour l'aménagement durable d'un territoire. Guide pratique à l'attention des élus*, Paris, Ministère d'égalité des territoires et du logement, http://www.territoires.gouv.fr/IMG/pdf/Le_SCoT_un_projet_strategique_partage.pdf.

- MORHANGE, C. (2001) Les variations relatives du niveau de la mer à Marseille depuis 5000 ans, in BOUIRON, M. (éd.), *Marseille: trames et paysages urbains de Gyptis au roi René. Actes du colloque international d'archéologie, Marseille, 3-5 novembre 1999*, Aix-en-Provence, Édisud, p. 35-42.
- ROBERT, S. (2016) Entre étalement et densification: une approche fine de l'urbanisation littorale sur la Côte bleue, Provence, *Cybergeo. European Journal of Geography*, <https://doi.org/10.4000/cybergeo.27451>.
- ROBERT, S., PLOUVIER, T. (2017) Lieux et pratiques de la plongée sous-marine sur la côte marseillaise: pour une approche géographique intégrée de l'espace marin littoral, *VertigO, la revue électronique en sciences de l'environnement*, 17 (1).
- RONCAYOLO, M. (2014) *L'imaginaire de Marseille. Port, ville, pôle*, Lyon, ENS Éditions.
- RTE (2013) *Accueil de la production hydroélectrique. Étude prospective de RTE*, La Défense, Réseau de transport d'électricité.
- VAUCHER, J. P. et B. (2012) *Calanques: un siècle d'amour et de vigilance. «Comment un territoire de passions devient parc national»*, Artignosc-sur-Verdon, Paroles.

Chapitre 7

- ABBOUD-ABI SAAB, M., ROMANO, J.-C., BENSOUSSAN, N., FAKHRI, M. (2004) Suivis temporels comparés de la structure thermique d'eaux côtières libanaises (Batroun) et françaises (Marseille) entre juin 1999 et octobre 2002, *Comptes Rendus Géoscience*, 336 (15), p. 1379-1390, <https://doi.org/10.1016/j.crte.2004.09.004>.
- ADLOFF, F. *et al.* (2015) Mediterranean Sea response to climate change in an ensemble of twenty first century scenarios, *Climate Dynamics*, 45 (9), p. 2775-2802, <https://doi.org/10.1007/s00382-015-2507-3>.
- ALDEBERT, Y. (Institut F. de R. pour l'Exploitation de la M.) (1997) Demersal resources of the Gulf of Lion (NW Mediterranean). Impact of exploitation on fish diversity, *Vie et Milieu*, «Biodiversity in dispersive environments», Paris, 18-20 Nov. 1996, <http://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=FR1999000709>.
- ASTRUCH, P. *et al.* (2018) *A Quantitative and Functional Assessment of Fish Assemblages of the Port-Cros Archipelago / Parc national de Port-Cros et Porquerolles*, 32, 1782.
- AUGIER, H. (2013) *Les Calanques: parc national, un siècle de combats et d'espérances*, Paris, Sang de la terre.
- BAKUN, A. (2006) Fronts and eddies as key structures in the habitat of marine fish larvae: opportunity, adaptive response and competitive advantage, *Scientia Marina*, 70 (S2), p. 105-122, <https://doi.org/10.3989/scimar.2006.70s2105>.
- BALLY, M., GARRABOU, J. (2007) Thermodependent bacterial pathogens and mass mortalities in temperate benthic communities: a new case of emerging disease linked to climate change, *Global Change Biology*, 13 (10), p. 2078-2088, <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2007.01423.x>.
- BĂNARU, D. *et al.* (2013) Trophic interactions in the Gulf of Lions ecosystem (NW Mediterranean) and fishing impact, *Journal of Marine Systems*, 111-112.
- BĂNARU, D. *et al.* (2014) Seasonal variation of stable isotope ratios of size-fractionated zooplankton in the Bay of Marseille (NW Mediterranean Sea), *Journal of Plankton Research*, 36 (1), p. 145-156, <https://doi.org/10.1093/plankt/fbt083>.
- BĂNARU, D., HARMELIN-VIVIEN, M. (2018) First catch of *Fistularia commersonii* Ruppell, 1838 in the Bay of Marseille (France, Northwestern Mediterranean Sea), *CYBIUM*, 42 (2), p. 208-209.

- BĂNARU, D., HARMELIN-VIVIEN, M., BOUDOURESQUE, C.-F. (2010) Man induced change in community control in the North-Western Black Sea: the top-down bottom-up balance, *Marine Environmental Research*, 69 (4), p. 262-275, <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2009.11.009>.
- BARTOLI, P., GIBSON, D. I., BRAY, R. A. (2005) Digenean species diversity in teleost fish from a nature reserve off Corsica, France (Western Mediterranean), and a comparison with other Mediterranean regions, *Journal of Natural History*, 39 (1), p. 47-70, <https://doi.org/10.1080/00222930310001613557>.
- BEAUGRAND, G. (2009) Decadal changes in climate and ecosystems in the North Atlantic Ocean and adjacent seas, *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 56 (8), p. 656-673, <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2008.12.022>.
- BEHRENFELD, M. J. *et al.* (2006) Climate-driven trends in contemporary ocean productivity, *Nature*, 444 (7120), p. 752-755, <https://doi.org/10.1038/nature05317>.
- BERDALET, E. *et al.* (2017) Harmful algal blooms in benthic systems: recent progress and future research, *Oceanography*, 30 (1), p. 36-45.
- BÉTHOUX, J. P. *et al.* (1999) The Mediterranean Sea: a miniature ocean for climatic and environmental studies and a key for the climatic functioning of the North Atlantic, *Progress in Oceanography*, 44 (1), p. 131-146, [https://doi.org/10.1016/S0079-6611\(99\)00023-3](https://doi.org/10.1016/S0079-6611(99)00023-3).
- BÉTHOUX, J.-P., GENTILI, B., TAILLIEZ, D. (1998) Warming and freshwater budget change in the Mediterranean since the 1940s, their possible relation to the greenhouse effect, *Geophysical Research Letters*, 25 (7), p. 1023-1026, <https://doi.org/10.1029/98GL00724>.
- BÉTHOUX, J. P., GENTILI, B., RAUNET, J., TAILLIEZ, D. (1990) Warming trend in the Western Mediterranean deep water, *Nature*, 347 (6294), p. 660-662, <https://doi.org/10.1038/347660a0>.
- BIANCHI, C. N. *et al.* (2012) Mediterranean Sea biodiversity between the legacy from the past and a future of change, *Life in the Mediterranean Sea: A Look at Habitat Changes*, p. 1-55.
- BIANCHI, C. N., MORRI, C. (2000) Marine biodiversity of the Mediterranean Sea: situation, problems and prospects for future research, *Marine Pollution Bulletin*, 40 (5), p. 367-376, [https://doi.org/10.1016/S0025-326X\(00\)00027-8](https://doi.org/10.1016/S0025-326X(00)00027-8).
- BIANCHI, C. N., CORSINI-FOKA, M., MORRI, C., ZENETOS, A. (2014) Thirty years after: dramatic change in the coastal marine habitats of Kos Island (Greece), 1981-2013, *Mediterranean Marine Science*, 15 (3), p. 482-497, <https://doi.org/10.12681/mms.678>.
- BLANFUNÉ, A., BOUDOURESQUE, C.-F., THIBAUT, T., VERLAQUE, M. (2016a) The sea level rise and the collapse of a Mediterranean ecosystem, the *Lithophyllum byssoides* algal rim, in THIEBAULT, S., MOATTI, J.-P. (eds.), *The Mediterranean Region under Climate Change. A Scientific Update*, Marseille, IRD Éditions, p. 285-289.
- BLANFUNÉ, A., BOUDOURESQUE, C., THIBAUT, T., VERLAQUE, M. (2016b) Le trottoir d'algues calcaires de Méditerranée: premier écosystème sinistré climatique?, *Le Tropézien*, 92, p. 12-13.
- BOISSERY, P. (2014) *L'assainissement des eaux usées en région littorale Provence-Alpes-Côte d'Azur*, Mémoires Institut océanographique Paul Ricard, 33-38.
- BOUDOURESQUE, C.-F. (2003) *The Erosion of Mediterranean Biodiversity. The Mediterranean Sea: An Overview of Its Present State and Plans for Future Protection*, lectures from the 4th International Summer School on the Environment.
- BOUDOURESQUE, C.-F. (2004) Marine biodiversity in the Mediterranean: status of species, populations and communities, *Travaux scientifiques du parc national de Port-Cros*, 20, p. 97-146.

- BOUDOURESQUE, C.-F. (2015) Taxonomy and phylogeny of unicellular eukaryotes, in BERTRAND, J.-C. *et al.* (eds.), *Environmental Microbiology: Fundamentals and Applications. Microbial Ecology*, Springer Netherlands, p. 191-257, https://doi.org/10.1007/978-94-017-9118-2_7.
- BOUDOURESQUE, C.-F. *et al.* (2004) Is there a negative interaction between biodiversity conservation and artisanal fishing in a marine protected area, the Port-Cros National Park (France, Mediterranean Sea)?, *Travaux scientifiques du parc national de Port-Cros*, 20, p. 147-160.
- BOUDOURESQUE, C.-F. *et al.* (2009) Regression of Mediterranean seagrasses caused by natural processes and anthropogenic disturbances and stress: a critical review, *Botanica Marina*, 52 (5), p. 395-418, <https://doi.org/10.1515/BOT.2009.057>.
- BOUDOURESQUE, C.-F. *et al.* (2012) *Protection and Conservation of Posidonia Oceanica Meadows*, RAMOGE / RAC/SPA.
- BOUDOURESQUE, C.-F. *et al.* (2014) Terrestrial versus marine diversity of ecosystems. And the winner is: the marine realm, in OUERGHI, A., LANGAR, H., BOUAFIF, C. (eds.), *Proceedings of the 5th Mediterranean Symposium on Marine Vegetation*, RAC/SPA, p. 11-25.
- BOUDOURESQUE, C.-F. *et al.* (2016a) The necromass of the *Posidonia oceanica* seagrass meadow: fate, role, ecosystem services and vulnerability, *Hydrobiologia*, 781 (1), p. 25-42, <https://doi.org/10.1007/s10750-015-2333-y>.
- BOUDOURESQUE, C. F. *et al.* (2016b) Where seaweed forests meet animal forests: the examples of macroalgae in coral reefs and the Mediterranean coralligenous ecosystem, in ROSSI, S. (ed.), *Marine Animal Forests: The Ecology of Benthic Biodiversity Hotspots*, Dordrecht, Springer, https://doi.org/10.1007/978-3-319-17001-5_48-1.
- BOUDOURESQUE, C.-F. *et al.* (2016c) Donor and recipient regions for exotic species of marine macrophytes: a case of unidirectional flow, the Mediterranean Sea, *Rapports de la Commission internationale pour la mer Méditerranée*, 41, 426.
- BOUDOURESQUE, C. F. *et al.* (2017a) The high heritage value of the Mediterranean sandy beaches, with a particular focus on the *Posidonia oceanica* “banquettes”: a review, *Sci. Rep. Port-Cros National Park*, 31, p. 23-70.
- BOUDOURESQUE, C.-F. *et al.* (2017b) Marine biodiversity: warming vs. biological invasions and overfishing in the Mediterranean Sea: take care, ‘One train can hide another’, *MOJ Ecology & Environmental Science*, 2 (4), 113, <https://doi.org/10.15406/mojes.2017.02.00031>.
- BOUDOURESQUE, C.-F., THIBAUT, T. (2018) Vivent les parasites!, *Le Tropézien*, 101, p. 14-15.
- BOUDOURESQUE, C.-F., VERLAQUE, M. (2002a) Biological pollution in the Mediterranean Sea: invasive versus introduced macrophytes, *Marine Pollution Bulletin*, 44 (1), p. 32-38, [https://doi.org/10.1016/S0025-326X\(01\)00150-3](https://doi.org/10.1016/S0025-326X(01)00150-3).
- BOUDOURESQUE, C.-F., VERLAQUE, M. (2002b) Assessing scale and impact of ship-transported alien macrophytes in the Mediterranean Sea, *CIESM Workshop Monographs*, 2, p. 53-61.
- BOUDOURESQUE, C.-F., VERLAQUE, M. (2012) An overview of species introduction and invasion processes in marine and coastal lagoon habitats, *CBM – Cahiers de Biologie Marine*, 53 (3), 309.
- BOUDOURESQUE, C.-F., RUITTON, S., VERLAQUE, M. (2005a) Large-scale disturbances, regime shift and recovery in littoral systems subject to biological invasions, in VELIKOVA, V., CHIPEV, N. (eds.), *Large-Scale Disturbances (Regime Shifts) and Recovery in Aquatic Ecosystems: Challenges for Management Towards Sustainability*, Paris, UNESCO, p. 85-101, <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.615.5170&rep=rep1&type=pdf>.

- BOUDOURESQUE, C. F., CADIOU, G., LE DIRÉAC'H, L. (2005b) Marine protected areas: a tool for coastal areas management, in LEVNER, E., LINKOV, I., PROTH, J.-M. (eds.), *Strategic Management of Marine Ecosystems*, Dordrecht, Springer, p. 29-52.
- BRINDAMOUR, A. *et al.* (2016) Environmental drivers explain regional variation of changes in fish and invertebrate functional groups across the Mediterranean Sea from 1994 to 2012, *Marine Ecology Progress Series*, 562, p. 19-35, <https://doi.org/10.3354/meps11912>.
- BRODEUR, R. D., SUGISAKI, H., HUNT, G. L., Jr. (2002) Increases in jellyfish biomass in the Bering Sea: implications for the ecosystem, *Marine Ecology Progress Series*, 233, p. 89-103, <https://doi.org/10.3354/meps233089>.
- BULTEL, E., LE MANACH, F., ULMAN, A., ZELLER, D. (2016) France (Mediterranean), in PAULY, D., ZELLER, D. (eds.), *Global Atlas of Marine Fisheries: A Critical Appraisal of Catches and Ecosystem Impacts*, Washington, Island Press, p. 263.
- CANEPA, A. *et al.* (2014) *Pelagia noctiluca* in the Mediterranean Sea, in PITT, K. A., LUCAS, C. H. (eds.), *Jellyfish Blooms*, Dordrecht, Springer, p. 237-266, https://doi.org/10.1007/978-94-007-7015-7_11.
- CATANESE, G. *et al.* (2018) *Haplosporidium pinnae* sp. Nov., a haplosporidan parasite associated with mass mortalities of the fan mussel, *Pinna nobilis*, in the Western Mediterranean Sea, *Journal of Invertebrate Pathology*, 157, p. 9-24, <https://doi.org/10.1016/j.jip.2018.07.006>.
- CHEN, C., BĂNARU, D., CARLOTTI, F. (2018) *Is the European Pilchard Crisis in French Mediterranean Related to Their Diet?*, 53rd EMBS (European Marine Biology Symposium), Ostende, Belgique, 17-21 septembre.
- CHESHIRE, A., ADLER, E. (2009) *UNEP/IOC Guidelines on Survey and Monitoring of Marine Litter*.
- CHEVALDONNÉ, P., LEJEUSNE, C. (2003) Regional warming-induced species shift in North-West Mediterranean marine caves, *Ecology Letters*, 6 (4), p. 371-379, <https://doi.org/10.1046/j.1461-0248.2003.00439.x>.
- CLOERN, J. E. *et al.* (2010) Biological communities in San Francisco Bay track large-scale climate forcing over the North Pacific, *Geophysical Research Letters*, 37 (21), <https://doi.org/10.1029/2010GL044774>.
- COLLIGNON, A. *et al.* (2012) Neustonic microplastic and zooplankton in the North Western Mediterranean Sea, *Marine Pollution Bulletin*, 64 (4), p. 861-864, <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2012.01.011>.
- COMBES, C. (2001) *Les associations du vivant. L'art d'être parasite*, Paris, Flammarion.
- CONVERSI, A. *et al.* (2010) The Mediterranean Sea regime shift at the end of the 1980s, and intriguing parallels with other European basins, *PLOS ONE*, 5 (5), e10633, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0010633>.
- COSTELLO, M.-J. *et al.* (2010) A census of marine biodiversity knowledge, resources, and future challenges, *PLOS ONE*, 5 (8), e12110, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0012110>.
- COX, T. E. *et al.* (2015) Effects of ocean acidification on *Posidonia oceanica* epiphytic community and shoot productivity, *Journal of Ecology*, 103 (6), p. 1594-1609, <https://doi.org/10.1111/1365-2745.12477>.
- COX, T. E. *et al.* (2016) Effects of in situ CO₂ enrichment on structural characteristics, photosynthesis, and growth of the Mediterranean seagrass *Posidonia oceanica*, *Biogeosciences*, 13, p. 2179-2194, <https://doi.org/10.5194/bg-13-2179-2016>.
- CREOCEAN (2018) *Étude et suivi de l'impact des rejets de l'usine d'alumine de Gardanne sur le milieu marin, synthèse globale du suivi 2016-2017*, t. II: Suivi ponctuel, t. III: Modélisation, t. IX: Hydrotalcite.

- CRISCI, C., BENSOUSSAN, N., ROMANO, J.-C., GARRABOU, J. (2011) Temperature anomalies and mortality events in marine communities: insights on factors behind differential mortality impacts in the NW Mediterranean, *PLOS ONE*, 6 (9), e23814, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0023814>.
- DEMANÈCHE, S., MERRIEN, C., BERTHOU, P., LESPAGNOL, P. (2009) *Rapport R3 Méditerranée continentale, échantillonnage des marées au débarquement. Méthode d'évaluation et évaluation des captures et de l'effort de pêche des flottilles de la façade Méditerranée continentale sur la période 2007-2008. Programme P6 AESYPECHE «Approche écosystémique de l'halieutique»,* Projet Système d'Informations Halieutiques SIH, Ifremer, France.
- DIAZ, F. *et al.* (2001) Early spring phosphorus limitation of primary productivity in a NW Mediterranean coastal zone (Gulf of Lions), *Marine Ecology Progress Series*, 211, p. 51-62, <https://doi.org/10.3354/meps211051>.
- ESTRADA, M., MARGALEF, R. (1988) Supply of nutrients to the Mediterranean photic zone along a persistent front, *Oceanologica Acta, Special Issue*, <https://archimer.ifremer.fr/doc/00267/37810>.
- FAGET, D. (2011) *Marseille et la mer: hommes et environnement marin (XVIII^e-XX^e siècle)*, Rennes, Presses universitaires de Rennes.
- FAIVRE, S., BAKRAN-PETRICIOLI, T., HORVATINČIĆ, N., SIRONIĆ, A. (2013) Distinct phases of relative sea level changes in the central Adriatic during the last 1500 years: influence of climatic variations?, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 369, p. 163-174, <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2012.10.016>.
- FARRUGIO, H. (2013) *La pêche en Méditerranée*, Mémoires Institut océanographique Paul Ricard.
- FERNANDES, P. G. *et al.* (2017) Coherent assessments of Europe's marine fishes show regional divergence and megafauna loss, *Nature Ecology & Evolution*, 1 (7), 0170, <https://doi.org/10.1038/s41559-017-0170>.
- FERRETTI, F., MYERS, R. A., SERENA, F., LOTZE, H. K. (2008) Loss of large predatory sharks from the Mediterranean Sea, *Conservation Biology*, 22 (4), p. 952-964, <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2008.00938.x>.
- GALGANI, F. *et al.* (2000) Litter on the sea floor along European coasts, *Marine Pollution Bulletin*, 40 (6), p. 516-527, [https://doi.org/10.1016/S0025-326X\(99\)00234-9](https://doi.org/10.1016/S0025-326X(99)00234-9).
- GALGANI, F. *et al.* (2010) *Marine Strategy Framework Directive-Task Group 10 Report Marine Litter Do Not Cause Harm to the Coastal and Marine Environment. Report on the Identification of Descriptors for the Good Environmental Status of European Seas Regarding Marine Litter under the Marine Strategy Framework Directive*, Luxembourg, Office for Official Publications of the European Communities.
- GALIL, B. S. (2008) Alien species in the Mediterranean Sea. Which, when, where, why?, in DAVENPORT, J. *et al.* (eds.), *Challenges to Marine Ecosystems*, Springer Netherlands, p. 105-116.
- GAMBAIANI, D. D., MAYOL, P., ISAAC, S. J., SIMMONDS, M. P. (2009) Potential impacts of climate change and greenhouse gas emissions on Mediterranean marine ecosystems and cetaceans, *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 89 (1), p. 179-201, <https://doi.org/10.1017/S0025315408002476>.
- GARRABOU, J. *et al.* (2009) Mass mortality in Northwestern Mediterranean rocky benthic communities: effects of the 2003 heat wave, *Global Change Biology*, 15 (5), p. 1090-1103, <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01823.x>.
- GATTUSO, J.-P., LAVIGNE, H. (2009) Technical note: approaches and software tools to investigate the impact of ocean acidification, *Biogeosciences*, 6 (10), p. 2121-2133, <https://doi.org/10.5194/bg-6-2121-2009>.

- GIRAULT, M. (2008) Caractérisation des communautés planctoniques en relation avec la biogéochimie en Méditerranée nord-occidentale, mémoire de master 2 en océanographie, Université de la Méditerranée, Centre d'océanologie de Marseille.
- GOBERVILLE, E. *et al.* (2010) Climate-driven changes in coastal marine systems of Western Europe, *Marine Ecology Progress Series*, 408, p. 129-148, <https://doi.org/10.3354/meps08564>.
- GOBERVILLE, E., BEAUGRAND, G., SAUTOUR, B., TRÉGUER, P. (2011) Evaluation of coastal perturbations: a new mathematical procedure to detect changes in the reference state of coastal systems, *Ecological Indicators*, 11 (5), p. 1290-1300, <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2011.02.002>.
- GOY, J., MORAND, P., ETIENNE, M. (1989) Long-term fluctuations of *Pelagia noctiluca* (Cnidaria, Scyphomedusa) in the Western Mediterranean Sea. Prediction by climatic variables, *Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers*, 36 (2), p. 269-279, [https://doi.org/10.1016/0198-0149\(89\)90138-6](https://doi.org/10.1016/0198-0149(89)90138-6).
- GOYET, C. *et al.* (2016) Thermodynamic forecasts of the Mediterranean Sea acidification, *Mediterranean Marine Science*, 17 (2), p. 508-518, <https://doi.org/10.12681/mms.1487>.
- GREER, A. T., COWEN, R. K., GUIGAND, C. M., HARE, J. A. (2015) Fine-scale planktonic habitat partitioning at a shelf-slope front revealed by a high-resolution imaging system, *Journal of Marine Systems*, 142, p. 111-125, <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2014.10.008>.
- GUERRERO, E. *et al.* (2016) High spatial heterogeneity of two planktonic cnidarian species related to the variability of a shelf-slope front at short time scales, *Scientia Marina*, 80 (4), p. 487-497, <https://doi.org/10.3989/scimar.04452.03A>.
- HALL-SPENCER, J. M. *et al.* (2008) Volcanic carbon dioxide vents show ecosystem effects of ocean acidification, *Nature*, 454 (7200), p. 96-99, <https://doi.org/10.1038/nature07051>.
- HALPERN, B. S. *et al.* (2008) A global map of human impact on marine ecosystems, *Science*, 319 (5865), p. 948-952, <https://doi.org/10.1126/science.1149345>.
- HARME LIN, J.-G., BASSEMAYOUSSE, F. (2008) *Méditerranée : à la découverte des paysages sous-marins*, Issy-les-Moulineaux, Glénat Livres.
- HARME LIN, J. G., RUITTON, S. (2010) Statut du mérour brun (*Epinephelus marginatus*) dans le parc national de Port-Cros (France, Méditerranée): état 2008 et évolution en quinze ans, *Sci. Rep. Port-Cros National Park*, 24, p. 147-159.
- HARME LIN-VIVIEN, M. *et al.* (2010) Seasonal variation in stable C and N isotope ratios of the Rhone River inputs to the Mediterranean Sea (2004-2005), *Biogeochemistry*, 100 (1), p. 139-150, <https://doi.org/10.1007/s10533-010-9411-z>.
- HARVELL, C. D. *et al.* (1999) Emerging marine diseases: climate links and anthropogenic factors, *Science*, 285 (5433), p. 1505-1510, <https://doi.org/10.1126/science.285.5433.1505>.
- HASSAN, R., SCHOLTES, R., ASH, N. (2005) *Ecosystems and Human Well-Being: Current State and Trends. Findings of the Condition and Trends Working Group*, Washington, Island Press.
- HERRMANN, M. *et al.* (2008) Dense water formation in the Gulf of Lions shelf: impact of atmospheric interannual variability and climate change, *Continental Shelf Research*, 28 (15), p. 2092-2112, <https://doi.org/10.1016/j.csr.2008.03.003>.
- HÖNISCH, B. *et al.* (2012) The geological record of ocean acidification, *Science*, 335 (6072), p. 1058-1063, <https://doi.org/10.1126/science.1208277>.
- IBANEZ, F., BOUCHER, J. (1987) Anisotropy of zooplankton populations in the Ligurian Sea front, *Oceanologica acta. Paris*, 10 (2), p. 205-216.
- JACQUET, S., GARNIER, C., MONNIN, C. (2018) *Rapport de synthèse du projet HYDROTALCITE pour l'étude des contaminants métalliques du rejet ALTEO en mer*, CSIRM / SAFE GE / CREOCEAN / ALTEO.

- JAMBECK, J. R. *et al.* (2015) Plastic waste inputs from land into the ocean, *Science*, 347 (6223), p. 768-771, <https://doi.org/10.1126/science.1260352>.
- JANNY, P. (2014) *Le littoral marseillais*, Mémoires Institut océanographique Paul Ricard.
- JANY, C., ZEBRACKI, M. (2012) *METROC: évaluation des apports de contaminants chimiques de la métropole marseillaise au milieu marin*, Ifremer, <https://archimer.ifremer.fr/doc/00116/22692>.
- JASPERS, C., ACUÑA, J. L., BRODEUR, R. D. (2015) Interactions of gelatinous zooplankton within marine food webs, *Journal of Plankton Research*, 37 (5), p. 985-988, <https://doi.org/10.1093/plankt/fbv068>.
- JOHNSON, R. G. (1997) Climate control required a dam at the Strait of Gibraltar, *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 78 (27), p. 277-281, <https://doi.org/10.1029/97EO00180>.
- KAPSENBERG, L. *et al.* (2017) Coastal ocean acidification and increasing total alkalinity in the Northwestern Mediterranean Sea, *Ocean Science*, 13 (3), p. 411-426, <https://doi.org/10.5194/os-13-411-2017>.
- KROEKER, K. J. *et al.* (2013) Impacts of ocean acidification on marine organisms: quantifying sensitivities and interaction with warming, *Global Change Biology*, 19 (6), p. 1884-1896, <https://doi.org/10.1111/gcb.12179>.
- KRUŽIĆ, P., SRŠEN, P., BENKOVIĆ, L. (2012) The impact of seawater temperature on coral growth parameters of the colonial coral *Cladocora caespitosa* (Anthozoa, Scleractinia) in the Eastern Adriatic Sea, *Facies*, 58 (4), p. 477-491, <https://doi.org/10.1007/s10347-012-0306-4>.
- LACOUÉ-LABARTHE, T. *et al.* (2016) Impacts of ocean acidification in a warming Mediterranean Sea: an overview, *Regional Studies in Marine Science*, 5, p. 1-11, <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2015.12.005>.
- LAMBECK, K. *et al.* (2014) Sea level and global ice volumes from the last glacial maximum to the holocene, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111 (43), p. 15296-15303, <https://doi.org/10.1073/pnas.1411762111>.
- LARDIC, J.-C. (2013) *Vers une nouvelle vision de la gouvernance maritime et littorale fédérant tous les acteurs de la mer*, Mémoires de l'Institut océanographique Paul Ricard.
- LAUBIER, L. *et al.* (2003) La Méditerranée se réchauffe-t-elle?, *Marine Life*, 13 (12), p. 71-81.
- LE BOURG, B. *et al.* (2015) Trophic niche overlap of sprat and commercial small pelagic teleosts in the Gulf of Lions (NW Mediterranean Sea), *Journal of Sea Research*, 103, p. 138-146, <https://doi.org/10.1016/j.seares.2015.06.011>.
- LEJEUSNE, C. *et al.* (2010) Climate change effects on a miniature ocean: the highly diverse, highly impacted Mediterranean Sea, *Trends in Ecology & Evolution*, 25 (4), p. 250-260, <https://doi.org/10.1016/j.tree.2009.10.009>.
- LELIEVELD, J. *et al.* (2012) Climate change and impacts in the Eastern Mediterranean and the Middle East, *Climatic Change*, 114 (3), p. 667-687, <https://doi.org/10.1007/s10584-012-0418-4>.
- LEMEE, R. *et al.* (1996) Feeding behaviour of *Paracentrotus lividus* in the presence of *Caulerpa taxifolia* introduced in the Mediterranean Sea, *Oceanologica Acta*, 19 (34), p. 245-253.
- LEMONSU, A., GRIMMOND, C. S. B., MASSON, V. (2004) Modelisation of the surface energy budget of an old Mediterranean city core, *Journal of Applied Meteorology*, 43, p. 312-327.
- LEMONSU, A., PIGEON, G., MASSON, V., MOPPERT, C. (2006) Sea-town interactions over Marseille: 3D urban boundary layer and thermodynamic fields near the surface, *Theoretical and Applied Climatology*, 84 (1), p. 171-178, <https://doi.org/10.1007/s00704-005-0155-y>.
- LE QUÉRÉ, C. *et al.* (2018) Global carbon budget 2017, *Earth System Science Data*, 10 (1), p. 405-448, <https://doi.org/10.5194/essd-10-405-2018>.

- LYNAM, C. P., HEATH, M. R., HAY, S. J., BRIERLEY, A. S. (2005) Evidence for impacts by jellyfish on North Sea herring recruitment, *Marine Ecology Progress Series*, 298, p. 157-167, <https://doi.org/10.3354/meps298157>.
- MACIAS, D., GARCIA-GORRIZ, E., PIRODDI, C., STIPS, A. (2014) Biogeochemical control of marine productivity in the Mediterranean Sea during the last 50 years, *Global Biogeochemical Cycles*, 28 (8), p. 897-907, <https://doi.org/10.1002/2014GB004846>.
- MARCELLIN YAO, K. *et al.* (2016) Time variability of the North-Western Mediterranean Sea pH over 1995-2011, *Marine Environmental Research*, 116, p. 51-60, <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2016.02.016>.
- MARIOTTINI, G. L., GIACCO, E., PANE, L. (2008) The mauve stinger *Pelagia noctiluca* (Forsskål, 1775). Distribution, ecology, toxicity and epidemiology of stings, *Marine Drugs*, 6 (3), p. 496-513, <https://doi.org/10.3390/md6030496>.
- MARTIN, S., GATTUSO, J.-P. (2009) Response of Mediterranean coralline algae to ocean acidification and elevated temperature, *Global Change Biology*, 15 (8), p. 2089-2100, <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2009.01874.x>.
- MAXWELL, S. L., FULLER, R. A., BROOKS, T. M., WATSON, J. E. (2016) Biodiversity: the ravages of guns, nets and bulldozers, *Nature*, 536 (7615), p. 143-145.
- MCNEIL, B. I., MATEAR, R. J. (2007) Climate change feedbacks on future oceanic acidification, *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 59 (2), p. 191-198, <https://doi.org/10.1111/j.1600-0889.2006.00241>.
- MERLIVAT, L. *et al.* (2018) Increase of dissolved inorganic carbon and decrease of pH in near surface waters of the Mediterranean Sea during the past two decades, *Biogeosciences*, 15 (18), p. 5653-5662, <https://doi.org/10.5194/bg-2017-284>.
- MILLET, B. *et al.* (2018) Unexpected spatial impact of treatment plant discharges induced by episodic hydrodynamic events: modelling Lagrangian transport of fine particles by Northern Current intrusions in the Bays of Marseille (France), *PLOS ONE*, 13 (4), e0195257, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0195257>.
- MILLS, C. E. (1995) Medusae, siphonophores, and ctenophores as planktivorous predators in changing global ecosystems, *ICES Journal of Marine Science*, 52 (34), p. 575-581, [https://doi.org/10.1016/1054-3139\(95\)80072-7](https://doi.org/10.1016/1054-3139(95)80072-7).
- MORAND, P., GOY, J., DALLOT, S. (1992) Recrutement et fluctuations à long terme de *Pelagia noctiluca* (Cnidaria, Scyphozoa), *Annales Institut océanographique*, 68, p. 151-158.
- MORON, V. (2003) L'évolution séculaire des températures de surface de la mer Méditerranée (1856-2000), *Comptes rendus Géoscience*, 335 (9), p. 721-727, [https://doi.org/10.1016/S1631-0713\(03\)00128-7](https://doi.org/10.1016/S1631-0713(03)00128-7).
- PALMIÉRI, J. *et al.* (2015) Simulated anthropogenic CO₂ storage and acidification of the Mediterranean Sea, *Biogeosciences (BG)*, 12, p. 781-802, <https://doi.org/10.5194/bg-12-781-2015>.
- PASCAL, M. *et al.* (2013) Definition of temperature thresholds: the example of the French heat wave warning system, *International Journal of Biometeorology*, 57 (1), p. 21-29, <https://doi.org/10.1007/s00484-012-0530-1>.
- PASCUAL, J., SALAT, J., PALAU, M. (1995) Evolución de la temperatura del mar entre 1973 y 1994, cerca de la Costa Catalana, in *Pour qui la Méditerranée au XXI^e siècle ? La Méditerranée: variabilités climatiques, environnement et biodiversité*, Montpellier, 6-7 avril 1995.
- PEREZ, T. *et al.* (2000) Mortalité massive d'invertébrés marins: un événement sans précédent en Méditerranée nord-occidentale, *Comptes rendus de l'Académie des sciences - Séries III - Sciences de la Vie*, 323 (10), p. 853-865, [https://doi.org/10.1016/S0764-4469\(00\)01237-3](https://doi.org/10.1016/S0764-4469(00)01237-3).

- PERGENT, G. *et al.* (2012) Les herbiers de magnoliophytes marines de Méditerranée. Résilience et contribution à l'atténuation des changements climatiques, *IUCN*, Gland, Switzerland.
- PERSONNIC, S. *et al.* (2014) An ecosystem-based approach to assess the status of a Mediterranean ecosystem, the *Posidonia oceanica* seagrass meadow, *PLOS ONE*, 9 (6), e98994, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0098994>.
- PHAM, C. K. *et al.* (2014) Marine litter distribution and density in European seas, from the shelves to deep basins, *PLOS ONE*, 9 (4), e95839, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0095839>.
- PIRODDI, C. *et al.* (2017) Historical changes of the Mediterranean Sea ecosystem: modelling the role and impact of primary productivity and fisheries changes over time, *Scientific Reports*, 7, 44491, <https://doi.org/10.1038/srep44491>.
- POLOVINA, J. J., WOODWORTH, P. A. (2012) Declines in phytoplankton cell size in the subtropical oceans estimated from satellite remotely-sensed temperature and chlorophyll, 1998-2007, *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 77-80, p. 82-88, <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2012.04.006>.
- PURCELL, J. E. (2012) Jellyfish and ctenophore blooms coincide with human proliferations and environmental perturbations, *Annual Review of Marine Science*, 4 (1), p. 209-235, <https://doi.org/10.1146/annurev-marine-120709-142751>.
- PURCELL, J. E., ARAI, M. N. (2001) Interactions of pelagic cnidarians and ctenophores with fish: a review, *Hydrobiologia*, 451 (1), p. 27-44, <https://doi.org/10.1023/A:1011883905394>.
- PURCELL, J. E., UYE, S., LO, W.-T. (2007) Anthropogenic causes of jellyfish blooms and their direct consequences for humans: a review, *Marine Ecology Progress Series*, 350, p. 153-174, <https://doi.org/10.3354/meps07093>.
- RAMESH, R. *et al.* (2015) Land-ocean interactions in the coastal zone: past, present & future, *Anthropocene*, 12, p. 85-98, <https://doi.org/10.1016/j.ancene.2016.01.005>.
- RASTORGUEFF, P.-A. *et al.* (2015) An ecosystem-based approach to evaluate the ecological quality of Mediterranean undersea caves, *Ecological Indicators*, 54, p. 137-152, <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.02.014>.
- RICHARDSON, A. J., BAKUN, A., HAYS, G. C., GIBBONS, M. J. (2009) The jellyfish joyride: causes, consequences and management responses to a more gelatinous future, *Trends in Ecology & Evolution*, 24 (6), p. 312-322, <https://doi.org/10.1016/j.tree.2009.01.010>.
- RICKER, W. E. (1981) Changes in the average size and average age of Pacific salmon, *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 38 (12), p. 1636-1656, <https://doi.org/10.1139/f81-213>.
- RIEBESELL, U., GATTUSO, J.-P. (2015) Lessons learned from ocean acidification research, *Nature Climate Change*, 5, p. 12-14, <https://doi.org/10.1038/nclimate2456>.
- RIXEN, M. *et al.* (2005) The Western Mediterranean deep water: a proxy for climate change, *Geophysical Research Letters*, 32 (12), <https://doi.org/10.1029/2005GL022702>.
- ROMANO, J.-C., BENSOUSSAN, N., YOUNES, W. A. N., ARLHAC, D. (2000) Anomalie thermique dans les eaux du golfe de Marseille durant l'été 1999. Une explication partielle de la mortalité d'invertébrés fixés?, *Comptes rendus de l'Académie des sciences - Séries III - Sciences de la Vie*, 323 (4), p. 415-427, [https://doi.org/10.1016/S0764-4469\(00\)00141-4](https://doi.org/10.1016/S0764-4469(00)00141-4).
- ROMANO, J.-C., LUGREZI, M.-C., DURAND, D., DURAND-LE BRETON, F. (2010) Série du marégraphe de Marseille: mesures de températures de surface de la mer de 1895 à 1956: une correction, *Comptes rendus Géoscience*, 342 (12), p. 873-880, <https://doi.org/10.1016/j.crte.2010.09.007>.
- ROUANET, E., TRIGOS, S., VICENTE, N. (2015) From youth to death of old age: the 50-year story of a *Pinna nobilis* fan mussel population at Port-Cros Island (Port-Cros National Park, Provence, Mediterranean Sea), *Scientific Report Port-Cros National Park*, 29, p. 209-222.

- RUITTON, S. *et al.* (2014) An ecosystem-based approach to assess the status of the Mediterranean coralligenous habitat, *RAC/SPA 2nd Mediterranean Symposium on the Conservation of Coralligenous and Other Calcareous Bio-Concretions*, 2, p. 153-158.
- SABATÉS, A., SALAT, J., MASÓ, M. (2004) Spatial heterogeneity of fish larvae across a meandering current in the Northwestern Mediterranean, *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 51 (4), p. 545-557, <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2003.11.003>.
- SALA, E. *et al.* (2002) A general model for designing networks of marine reserves, *Science*, 298 (5600), p. 1991-1993, <https://doi.org/10.1126/science.1075284>.
- SALA, E. *et al.* (2012) The structure of Mediterranean rocky reef ecosystems across environmental and human gradients, and conservation implications, *PLOS ONE*, 7 (2), e32742, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0032742>.
- SALA, E., BOUDOURESQUE, C.-F., HARMELIN-VIVIEN, M. (1998) Fishing, trophic cascades, and the structure of algal assemblages: evaluation of an old but untested paradigm, *Oikos*, 82 (3), p. 425-439, <https://doi.org/10.2307/3546364>.
- SALA, E., KIZILKAYA, Z., YILDIRIM, D., BALLESTEROS, E. (2011) Alien marine fishes deplete algal biomass in the Eastern Mediterranean, *PLOS ONE*, 6 (2), e17356, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0017356>.
- SALAT, J., PASCUAL, J. (2002) Tracking long term hydrological change in the Mediterranean sea, *CIESM Workshop Series*, 16, e29-32.
- SCHNEIDER, A., TANHUA, T., KÖRTZINGER, A., WALLACE, D. W. R. (2010) High anthropogenic carbon content in the Eastern Mediterranean, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 115 (C12), <https://doi.org/10.1029/2010JC006171>.
- SOMOT, S., SEVAULT, F., DÉQUÉ, M. (2006) Transient climate change scenario simulation of the Mediterranean Sea for the twenty-first century using a high-resolution ocean circulation model, *Climate Dynamics*, 27 (7), p. 851-879, <https://doi.org/10.1007/s00382-006-0167-z>.
- TEMPIER, E. (2018) Prud'homies de pêche, un modèle de gestion des communs, in BUTI, G. *et al.* (éds.), *Moissonner la mer. Économies, sociétés et pratiques halieutiques méditerranéennes (XX^e-XXI^e siècle)*, Aix-en-Provence, Maison méditerranéenne des sciences de l'homme, p. 239-251.
- THIBAUT, T. *et al.* (2017) An ecosystem-based approach to assess the status of Mediterranean algae-dominated shallow rocky reefs, *Marine Pollution Bulletin*, 117 (1), p. 311-329, <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.01.029>.
- THIBAUT, T., BLANFUNÉ, A., VERLAQUE, M. (2013) Mediterranean *Lithophyllum byssoides* (Lamarck) foslie rims: chronicle of a death foretold, *Rapports et PV des réunions de la Commission internationale pour l'exploration scientifique de la Méditerranée*, 40, 656.
- THIBAUT, T., BLANFUNÉ, A., BOUDOURESQUE, C.-F., VERLAQUE, M. (2015) Decline and local extinction of Fucales in French Riviera: the harbinger of future extinctions?, *Mediterranean Marine Science*, 16 (1), p. 206-224, <https://doi.org/10.12681/mms.1032>.
- ULLMANN, A., PIRAZZOLI, P. A., MORON, V. (2008) Sea surges around the Gulf of Lions and atmospheric conditions, *Global and Planetary Change*, 63 (2), p. 203-214, <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2007.10.002>.
- VAN BEVEREN, E. *et al.* (2014) Rapid changes in growth, condition, size and age of small pelagic fish in the Mediterranean, *Marine Biology*, 161 (8), p. 1809-1822, <https://doi.org/10.1007/s00227-014-2463-1>.
- VENNETIER, M. *et al.* (2008) A new bioclimatic model calibrated with vegetation for Mediterranean forest areas, *Annals of Forest Science*, 65 (7), p. 711, <https://doi.org/10.1051/forest:2008050>.

- VICENTE, N. (2020) *La grande nacre de Méditerranée. Pinna nobilis, un coquillage bivalve plein de noblesse*, Aix-en-Provence, Presses universitaires de Provence, coll. « Sciences Technologies Santé ».
- VICENTE, N., DE GAULEJAC, B. (1993) *Pinna nobilis* L. (mollusque bivalve), indicateur biologique du littoral méditerranéen, in BOUDOURESQUE, C. F. *et al.* (éds.), *Colloque international « Qualité du milieu marin »: indicateurs biologiques et physico-chimiques. Les 3^e Rencontres scientifiques de la Côte bleue, Carry-le-Rouet, 20-22 novembre 1992*, Marseille, GIS Posidonie, p. 141-150.
- ZENETOS, A. *et al.* (2010) *Alien Species in the Mediterranean Sea by 2010. A Contribution to the Application of European Union's Marine Strategy Framework Directive (MSFD). Part I. Spatial Distribution*, <https://doi.org/10.12681/mms.87>.
- ZENETOS, A. *et al.* (2017) Uncertainties and validation of alien species catalogues: the Mediterranean as an example, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 191, p. 171-187, <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2017.03.031>.
- ZUNINO, S., CANU, D. M., BANDELJ, V., SOLIDORO, C. (2017) Effects of ocean acidification on benthic organisms in the Mediterranean Sea under realistic climatic scenarios: a meta-analysis, *Regional Studies in Marine Science*, 10, p. 86-96, <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2016.12.011>.

Annexe 1

Présentation de l'OSU Institut Pythéas

L'Observatoire des Sciences de l'Univers (OSU) Institut Pythéas¹, créé en janvier 2012, fédère cinq grandes unités mixtes de recherche :

- CEREGE: Centre européen de recherche et d'enseignement des géosciences de l'environnement;
 - IMBE: Institut méditerranéen de biodiversité et d'écologie marine et continentale;
 - LAM: Laboratoire d'astrophysique de Marseille;
 - LPED: Laboratoire population environnement développement;
 - MIO: Institut méditerranéen d'océanologie;
- et une unité mixte de service, l'UMS Pythéas, une équipe de plus de cent personnes offrant des services transversaux aux laboratoires, incluant l'OHP, site d'observation pluridisciplinaire et les plates-formes techniques mutualisées.

L'OSU Institut Pythéas, placé sous la tutelle du CNRS et de l'IRD, est une école interne de l'université d'Aix Marseille couvrant les grandes thématiques scientifiques des sciences de la Terre, de l'environnement et de l'univers :

- géosciences de l'environnement;
- sciences de la biodiversité et écologie;
- astronomie;
- océanologie;
- interaction sociétés / environnement.

Les grandes missions de cet OSU sont :

- contribuer à l'enrichissement des connaissances;
- mener de grands programmes de recherche;
- participer à la conception d'instruments d'observation;
- valoriser ses recherches;
- développer des liens avec le monde industriel;
- participer à la formation universitaire... et à la diffusion de la culture scientifique.

1 <https://www.osupytheas.fr/?-Presentation-de-l-OSU->.

Plus de 1000 personnes travaillent pour l'Institut Pythéas sur plus de onze sites (Marseille – Luminy, Timone, Endoume, Saint-Charles, Saint-Jérôme, Technopole de Château-Gombert – Europôle de l'Arbois, Toulon, La Seyne-sur-Mer, Saint-Michel l'Observatoire, Avignon ainsi que des équipes dans les DOM-TOM, au Mexique et au Maghreb.



Annexe 2

Les services d'observation et les réseaux de l'OSU Institut Pythéas

La végétation dans l'arrière-pays de Marseille

Saint-Michel-l'Observatoire - OAK OBSERVATORY AT OHP

Site d'étude : OHP à Saint-Michel-l'Observatoire (04).

Responsables locaux : Mathieu Santonja (IMBE) et Ilja Reiter (ECCOREV).

Responsable national : Mathieu Santonja (IMBE).

Objectif : plate-forme expérimentale innovante (O3HP) dédiée à l'étude de l'impact du changement climatique sur le fonctionnement et la biodiversité de la forêt méditerranéenne.

Date de démarrage : 2009.

Équipements :

- sur une parcelle forestière de chênes pubescents et d'érables de Montpellier ;
- ensemble de passerelles disposées à hauteur de la canopée ;
- réseau de capteurs (température, humidité, radiation, etc.) disposés dans les différents compartiments de l'écosystème (+ de 100 capteurs) ;
- système d'exclusion de pluie dynamique afin de simuler un allongement de la saison sèche ;
- suivi de décomposition des litières, de mesures de composés organiques volatiles, etc.

Paramètres mesurés :

- paramètres abiotiques (précipitations, température, humidité, etc.) ;
- échanges gazeux (CO₂, respiration du sol, etc.) ;
- paramètres dendrométriques et écologiques (accroissement des arbres, flux de sève, phénologie, décomposition des litières, etc.) ;
- biodiversité du sol (mésafaune, etc.).

Site web : <https://o3hp.obs-hp.fr/index.php/fr>.

Saint-Michel-l'Observatoire - ICOS

Site d'étude : OHP à Saint-Michel-l'Observatoire (04).

Responsables locaux : Irène Xueref-Remy (IMBE), Yves Noack (CEREGE) et Ilja Reiter (OHP).

Responsable national : Michel Ramonet (LSCE).

Objectif : mesures de gaz à effet de serre (GES) au-dessus de la forêt.

Date de démarrage : fin 2012 – début 2013.

Équipements : mât de 100 m et préleveurs gaz, station polluants atmosphériques.

Paramètres mesurés :

- mesures de CO, CO₂, CH₄, COV ;
- mesures de polluants atmosphériques (O₃, NO_x, particules, etc.).

Site web : <http://icos-atc.lsce.ipsl.fr>.

Vallée du Rhône

Suivi des apports du Rhône

Site d'étude : Arles. Site du service national d'observation MOOSE (<http://www.moose-network.fr>) et de l'infrastructure de recherche ILICO (<https://www.ir-ilico.fr>).

Responsable local : Patrick Raimbault (MIO).

Objectif : quantification des apports rhodaniens à la mer et des impacts des crues.

Date de démarrage : 2005.

Équipements : échantillonneur Aqualyse, centrifugeuse CEPA Z61.

Paramètres mesurés :

- mesures quotidiennes : matière en suspension, sels nutritifs ; matières organiques dissoutes et particulaires (C/N/P) ;
- prélèvements bimensuels de matière en suspension et d'eau par centrifugation pour analyses DCE.

Sites web : bases de données MOOSE (<http://mistrals.sedoo.fr/MOOSE>) et Agence de l'eau SANDRE (<http://sandre.eaufrance.fr/Base-de-donnees>).

Observatoire des sédiments du Rhône

Site d'étude : ensemble du corridor rhodanien depuis les affluents du nord jusqu'à l'embouchure.

Responsables locaux : Michal Tal et Jean-Paul Ambrosi (CEREGE).

Responsables nationaux : Radakovitch Olivier (IRSN) et Piegay Hervé (ENS Lyon).

Observatoire rattaché à la Zone Atelier Bassin du Rhône.

Objectifs : produire, rassembler et gérer des données visant à caractériser les stocks et les flux sédimentaires, ainsi que les pollutions associées à ces sédiments. L'observatoire a également pour mission d'éclairer, par l'analyse de ces données, les gestionnaires et les élus. L'OSR est ainsi une plate-forme de recherche pluripartenaire s'inscrivant dans une co-construction entre scientifiques et gestionnaires.

Date de démarrage : 2010-2013.

Équipements : pour les labos de l'OSU l'équipement associé est un ADCP monté sur le bac de Barcarin, quatre tamis de terrain, une antenne GPS et des ordinateurs portables.

Paramètres mesurés : matière en suspension (quantité et mesures d'éléments majeurs et traces), bathymétrie de certaines zones, granulométrie des matières en suspension, de la charge de fond et du sédiment, concentrations en éléments traces dont métaux.

Site web : métadonnées et informations sur <http://www.graie.org/osr>.

Observatoire Hommes-Milieus Vallée du Rhône

Site d'étude : Vallée du Rhône.

Responsable locale : Carole Barthélémy (LPED), codirectrice OHM.

Responsable régional : Hervé Piégay (UMR 5600), codirecteur OHM.

Sa structure porteuse est l'UMR 5600 EVS. L'OHM est un des sites ateliers de la Zone Atelier Bassin du Rhône (ZABR) et collabore étroitement avec l'Observatoire des sédiments du Rhône (OSR).

Objectifs : l'OHM Vallée du Rhône a pour emprise géographique l'axe fluvial du Léman à la Méditerranée et s'intéresse tout particulièrement aux thématiques suivantes et à leurs interfaces :

- impacts socio-écologiques et économiques des aménagements et leurs conséquences ;
- hydrodynamique des sédiments et des charges polluantes ;
- restauration écologique des milieux aquatiques et riverains ;
- dynamiques des communautés sociales.

Date de démarrage : 2010.

Équipements : <http://ohm-vallee-du-rhone.in2p3.fr>.

Paramètres mesurés : approches interdisciplinaires de la vallée du Rhône et données en sciences de la vie, de l'environnement et sciences sociales. Les champs disciplinaires explorés sont larges allant des SHS aux sciences du vivant. Depuis 2015, la bancarisation, le partage et la géovisualisation des données produites et collectées dans les actions de recherche portées par l'OHM Vallée du Rhône sont coordonnés par Fanny Arnaud (CNRS, UMR 5600). À titre d'exemples :

- sciences de la vie : suivi piscicole, suivi macro-invertébré benthique, etc. ;
- sciences de l'environnement : suivi hydrologique et turbidimétrique, suivi des flux de polluant, suivi de l'évolution morphologique du chenal et des bras morts, suivi de la sédimentologie ;
- sciences sociales : suivi des perceptions des polluants.

Zones urbaines et péri-urbaines de Marseille

Relevé de papillons - Parcs urbains de la ville de Marseille

Site d'étude: Ville de Marseille.

Responsable locale: Magali Deschamps-Cottin (LPED).

Objectif: suivi des populations de lépidoptères (*Rhopalocera*) dans vingt-quatre parcs urbains de Marseille.

Date de démarrage: 2008.

Paramètres mesurés:

- population de papillons;
- détection de présence;
- comptage;
- distribution.

Site web: <http://madeinmarseille.net/16882-parc-urbain-papillons-biodiversite>.

Garrigues - CLIMED

Site d'étude: chaîne de l'Étoile, lieu-dit Les Mourets, 13013 Marseille, 43° 21' 56" N 05° 25' 32" E.

Responsable local: Nicolas Montes (IMBE).

Objectif: suivi des paramètres fonctionnels en garrigue : phénologie, biomasse, productivité, activité photosynthétique, suivi de biodiversité végétale et animale (mésosofaune, macrofaune) et suivi des paramètres abiotiques.

Date de démarrage: janvier 2010.

Équipements:

- 96 dispositifs d'exclusion de pluie de 16 m;
- un bras robotisé pour l'acquisition des données photographiques et télémétriques du couvert végétal;
- courant 2012: station météorologique avec transmission temps réel, capteurs PAR, trente sondes TDR.

Paramètres mesurés: humidité du sol (0-20 cm) et biodiversité.

Site web: <https://dataset.osupytheas.fr/geonetwork/srv/fre/catalog.search#/metadata/36d7e0d8-27ac-4692-ad06-a2dda1b121e1>.

Contexte après-mine - OHM Bassin minier de Provence

Site d'étude: Bassin minier de Provence.

Responsable local: Yves Noack (CEREGE).

Responsable national: réseau des OHM, Robert Chenorkian (DSA INEE).

Objectif: l'Observatoire Hommes-Milieus du Bassin minier de Provence est un dispositif du CNRS, Institut d'écologie et d'environnement, au service de la recherche scientifique sur les interactions entre l'homme et son milieu de

vie, la société et l'environnement. Ses objectifs sont d'étudier et de suivre le contexte de l'après-mine en Provence.

Date de démarrage: 2008.

Paramètres mesurés:

- paramètres physico-chimiques (eaux, air, sols);
- paramètres socio-économiques.

Site web: <http://www.ohm-provence.org> et construction d'une base de données en cours (catalogue, documentation, air, etc.).

Urbanisation et anthropisation côtière - OHM Littoral méditerranéen

Site d'étude: quatre zones côtières du littoral méditerranéen de la France: Littoral marseillais (de Port-Saint-Louis-du-Rhône à La Ciotat), golfe d'Aigues-Mortes, côte de Balagne, lagune de Biguglia.

Responsable local: Samuel Robert, ESPACE (UMR 7300).

Responsable national: réseau des OHM, Robert Chenorkian (DSA INEE).

Objectif: l'Observatoire Hommes-Milieux «Littoral méditerranéen» (OHM-LM) a pour objet l'étude de l'urbanisation et de l'anthropisation côtière en Méditerranée. Les travaux se spécialisent autour de quatre problématiques principales (l'urbanisation littorale, ses moteurs et ses effets; les activités récréatives et leurs interactions avec l'environnement côtier; fonctionnement, intégrité et restauration écologique des milieux; interactions entre pollutions / contaminations et mode de vie en zone côtière urbanisée; risques et fonctionnement des territoires) et autour de quatre objets spécifiques du littoral (la plage, le port, la lagune, l'aire protégée).

Date de démarrage: 2012.

Paramètres mesurés:

La diversité des études induit la collecte et la production de données relevant de différents registres et structurées sous différents formats. Selon des stratégies d'acquisitions différenciées, les études menées dans l'OHM-LM conduisent à la production de données:

- géographiques à référence spatiale sur l'occupation des sols, les fréquentations récréatives du littoral, la visibilité du paysage, l'urbanisme, etc.;
- physico-chimiques (eaux, air, sols);
- écologiques (espèces, habitats);
- socio-économiques (enquêtes sur les usages, les pratiques et les représentations sociales de l'environnement, de l'espace et des milieux littoraux).

Les corpus collectés et produits sont présentés dans les documents de restitution des études mis en ligne et dans le géocatalogue des données sur le site Internet.

Sites web: site de l'OHM (<http://www.ohm-littoral-mediterraneen.fr>) et catalogue des données (<http://www.ohm-littoral-mediterraneen.fr/spip.php?rubrique40>).

Baie de Marseille et littoral

Qualité de l'eau - Service d'observation en milieu littoral (SOMLIT)
- Marseille

Site d'étude: baie de Marseille, 05° 17' 30" E – 43° 14' 30" N (3 milles de la côte). Site du service national d'observation SOMLIT (<http://somlit.epoc.u-bordeaux1.fr/fr>) et de l'infrastructure de recherche ILICO (<https://www.ir-ilico.fr>).

Responsable national: Nicolas Savoye (EPOC Université Bordeaux I).

Responsable local: Gérald Grégori (MIO).

Objectifs:

- homogénéiser l'acquisition d'un corps de paramètres (hydroclimatiques, chimiques et biologiques) communs à tous les sites et rendre disponibles les données à l'ensemble de la communauté;
- permettre une étude comparée de séries à long terme sur les trois façades du littoral français (identification de fluctuations communes aux différents sites et réponses du littoral à des forçages climatiques ou anthropiques globaux – distinction entre ces deux sources de variabilité).

Date de démarrage: 1994.

Équipements:

- capteurs température, salinité, pression = CTD SBE 37;
- capteur fluorescence;
- capteurs oxygène;
- transmissiomètre.

Paramètres mesurés:

- profils 0-55 m température, salinité, oxygène, fluorescence;
- sur prélèvement à trois niveaux: oxygène, pH, matières en suspension, nutriments, matière particulaire (CHN), isotope stable ¹³C/¹⁵N, chlorophylle, communautés microbiennes (cytométrie en flux), communautés phytoplanctoniques et zooplanctoniques.

Site web: <http://somlit.epoc.u-bordeaux1.fr/fr>.

Phytoplancton - PHYTOBS

Site d'étude: baie de Marseille, 05° 17' 30" E – 43° 14' 30" N (3 milles de la côte). Site du service national d'observation Phytobs (<http://somlit.epoc.u-bordeaux1.fr/fr>) et de l'infrastructure de recherche ILICO (<https://www.ir-ilico.fr>).

Responsables nationaux: Maud Lemoine (Ifremer) et Pascal Claquin (BOREA).

Responsable locale: Véronique Barthaux (MIO).

Objectif: étudier l'ensemble des espèces phytoplanctoniques et le contexte hydrologique associé afin d'analyser les réponses des communautés phytoplanctoniques aux changements environnementaux, d'évaluer la qualité

du milieu littoral au travers d'indicateurs, définir les niches écologiques, et détecter les variations de phénologie. PHYTOBS a également pour objectif de faire travailler en synergie la communauté scientifique et permet, par le travail en réseau, la diffusion et le renforcement des compétences.

Date de démarrage: 1994.

Équipement: microscope.

Paramètres mesurés: communautés phytoplanctoniques de surface.

Site web: <https://www.ir-ilico.fr/Les-reseaux-elementaires/Fiches-d-identite-des-reseaux-elementaires/PHYTOBS>.

Qualité de l'eau - SOLEMIO

Site d'étude: baie de Marseille, 43°14,743' N, 5°17,1 95' E. Site du service national d'observation Coast-HF et de l'infrastructure de recherche ILICO (<https://www.ir-ilico.fr>).

Responsable national: Guillaume Charria (Ifremer).

Responsable local: Fabrice Garcia (MIO).

Objectif: suivi à long terme et haute fréquence des eaux littorales, prise en compte des événements extrêmes.

Date de démarrage: 2011-2012.

Équipements:

- bouée multiparamétrique SMATCH et transmission temps réel;
- mouillage et capteurs météo avec profileur multiparamétrique Provor et transmission temps réel.

Paramètres mesurés:

- continu en surface: température, salinité, oxygène, fluorescence et turbidité;
- deux profils 0-50 m par jour: température, salinité, oxygène, fluorescence et turbidité.

Site web: <http://www.coriolis.eu.org>.

Météo Frioul

Site d'étude: îles de Pomègues et sémaphore du Frioul, 48° 43' 37,19" N 3° 59' 14,93" W (hauteur: 25 m). Site du service national d'observation MOOSE (<http://www.moose-network.fr>) et de l'infrastructure de recherche ILICO (<https://www.ir-ilico.fr>).

Responsable local: Patrick Raimbault (MIO).

Objectif: météorologie locale en baie de Marseille.

Date de démarrage: 2007.

Équipements:

- station météorologique Auria avec transmission temps réel;
- anémomètre et girouette, baromètre, pyranomètre, pluviomètre.

Paramètres mesurés :

- vent (vitesse et direction);
- température et pression atmosphérique;
- irradiance;
- pluie.

Sites web : <http://meteolive.mio.osupytheas.fr> (visualisation temps réel), base de données du SO du MIO.

Dépôts atmosphériques

Site d'étude : îles de Pomègues et sémaphore du Frioul. Site du service national d'observation MOOSE (<http://www.moose-network.fr>) et de l'infrastructure de recherche ILICO (<https://www.ir-ilico.fr>).

Responsable local : Patrick Raimbault (MIO).

Objectif : flux de matières d'origine atmosphérique à la mer Méditerranée et mesures en réseau avec cap Béar et cap Ferrat.

Date de démarrage : 2007.

Équipements :

- collecteur atmosphérique MTX Italia;
- deux pompes à vide.

Paramètres mesurés :

- dépôts secs et humides : charge particulaire insoluble;
- composition élémentaire (C, N, P, N, Si) et métaux trace dans fraction insoluble et soluble.

Site web : <http://mistrals.sedoo.fr/MOOSE>.

Éclairement - SUNMEX

Site d'étude : baie de Marseille et récifs du Prado, 43° 15' 64" N, 05° 20' 01" E.

Responsables locaux : Richard Sempéré et Fabrice Garcia (MIO).

Objectif : mesurer « en continu » l'éclairement atmosphérique qui atteint la surface de l'océan, l'éclairement descendant et ascendant dans la colonne d'eau, ainsi que les différents paramètres qui contrôlent la pénétration de la lumière dans l'eau (matière organique dissoute colorée, c'est-à-dire CDOM, la chlorophylle *a* et la rétrodiffusion des particules).

Date de démarrage : avril 2011.

Équipements :

- ligne bio-optique et hydrologique;
- capteurs radiométriques Satlantic (surface, -2 m et -6 m);
- CTD Seabird (type à préciser);
- fluorimètre Wetlabs.

Paramètres mesurés :

- éclairement descendant et ascendant à huit longueurs d'onde: 305, 325, 340, 380, 412, 443, 495 et 565 nm ($\mu\text{W cm}^{-2} \text{nm}^{-1}$);
- teneur en matière organique dissoute colorée (CDOM) à 2 et 6 m;
- rétrodiffusion des particules à 650 nm (m^{-1});
- teneur en chlorophylle *a* ($\mu\text{g l}^{-1}$);
- température ($^{\circ}\text{C}$), salinité et pression (bar).

Site web : base de données MOI.

Température - T-MEDNet

Site d'étude : littoral marseillais.

Responsable local : Dorian Guillemain (Pythéas).

Objectif : T-MEDNet est un réseau d'observation sur les effets du changement climatique dans les écosystèmes côtiers marins en diffusant l'acquisition de protocoles de surveillance standard sur la température de l'eau de mer dans les cinquante premiers mètres et les indicateurs biologiques à grande échelle et à long terme.

Date de démarrage : 2005.

Équipements : capteurs de température.

Paramètre mesuré : température ($^{\circ}\text{C}$).

Site web : <http://www.t-mednet.org>.

Suivi de la phénologie d'invertébrés benthiques

Site d'étude : calanques de Marseille (île Maire).

Responsables locaux : Thierry Perez et Alexander Ereskovsky (IMBE).

Objectif : suivi de la phénologie d'invertébrés benthiques dans le contexte de changements climatiques.

Date de démarrage : 2001 (arrêt en 2009).

Paramètres mesurés : cycle de reproduction, effort de reproduction de plusieurs espèces d'éponges du coralligène et des grottes semi-obscurées. Dans certains cas, corrélation avec d'autres paramètres du métabolisme.

Suivi de la colonisation des récifs artificiels du Prado

Site d'étude : récifs artificiels de la baie du Prado.

Responsable local : Thierry Perez (IMBE).

Objectif : suivi de la colonisation des récifs artificiels du Prado par la faune sessile et mobile.

Date de démarrage : 2009.

Équipements : service de plongée Pythéas.

Paramètres mesurés :

- diversité et recouvrement des surfaces par la faune sessile (mesures sur quadrats photographiques);
- diversité et abondance de la faune vagile (échantillonnage annuel dans des systèmes expérimentaux de pochons de coquilles d'huîtres).

Suivi de populations d'invertébrés de grottes sous-marines

Site d'étude : côte des Calanques (Marseille-Riou-La Ciotat) et Monaco.

Responsables locaux : Pierre Chevaldonné et Thierry Perez (IMBE).

Objectif : suivi de populations d'invertébrés de grottes sous-marines dans le contexte de changements climatiques.

Date de démarrage : 2001 (fragmentaire avant).

Équipements :

- service plongée du COM, Pythéas;
- service d'histologie et de cytologie du COM;
- service commun de biologie moléculaire de l'IMBE.

Paramètres mesurés :

- démographie et génétique de plusieurs espèces d'éponges et de mysidacés de grottes sous-marines obscures;
- température hors grotte, et dans la grotte (plusieurs niveaux).

Température et salinité de surface - TRANSMED

Site d'étude : Méditerranée occidentale.

Responsable locale : Isabelle Taupier-Letage (MIO).

Objectif : suivi temporel à long terme de la température et de la salinité de l'eau de surface.

Date de démarrage : 2006, 2012 en opérationnel.

Paramètres mesurés : température (SST) et salinité (SSS).

Sites web :

- **Données en temps réel :** www.ifremer.fr/transmed.
- **Données en temps quasi réel :** CORIOLIS, GOSUD (<http://www.gosud.org>), Marine Copernicus Service (<http://marine.copernicus.eu>).
- **Données en temps différé :** <http://mistrals.sedoo.fr/HyMeX>, <http://marine.copernicus.eu>, Seadatanet.

Cadre : programme HyMeX (www.hymex.org) MISTRALS, Long Observing Period (2010-2020).

Annexe 3

Présentation du LabEx OT-Med

OT-Med¹ (Objectif Terre – Bassin méditerranéen) est un «Laboratoire d'excellence» (LabEx) sélectionné par le programme français Investissements d'Avenir. Il a été fondé en 2012 pour une durée de huit ans.

Il regroupe dix laboratoires de recherche et une fédération de recherche spécialisée dans différents domaines de l'environnement : géosciences, écologie, droit, économie et sciences sociales.

La recherche d'OT-Med est axée sur les changements globaux et les risques naturels dans le bassin méditerranéen. Le travail est divisé en trois axes WP et deux axes transversaux.

WP1 : changement climatique en Méditerranée et risques naturels

Le WP1 est consacré à l'étude des changements climatiques et anthropiques ainsi que des risques naturels. Ceci comprend :

- mer : circulation thermohaline, processus à moyenne échelle, interactions air-mer, impact des contaminations sur la mer ;
- aquifères, lac Tchad, bassins versants : évolution, salinisation, ressources en eau ;
- écosystèmes forestiers : interactions climat-gestion du feu ;
- échelles de temps longues : paléoclimatologie, paléocéanographie, paléosismologie, archéologie ;
- morphogenèse, risque sismique, modifications du trait de côte, glissements de terrain.

WP2 : impacts des changements climatiques et socio-économiques

Le WP2 a pour objectif de comprendre l'impact des changements climatiques et socio-économiques sur les écosystèmes, en mettant l'accent sur les services écosystémiques, en particulier en ce qui concerne :

¹ <http://www.otmed.fr>.

- la biodiversité : bases de données, conservation, gestion, services, évolution ;
- les sols : impacts de l'utilisation des sols et du climat, indicateurs de qualité, modélisation, gestion ;
- l'agriculture et la sylviculture : modèles et scénarios ;
- les écosystèmes marins : fonctionnement, ressources, réseaux trophiques, récifs artificiels, aires marines protégées.

WP3 : interaction homme-environnement, perception, adaptation et atténuation

Le WP3 analyse les interactions homme-environnement et examine la perception des dangers, l'adaptation et les mesures d'atténuation :

- modéliser la prise de décision dans le contexte des risques ;
- co-évolution du climat et des sociétés, adaptation au changement climatique ;
- comparaison des régimes de gouvernance internationale pour le climat et la biodiversité ;
- amélioration de la gestion des écosystèmes pour la conservation et la fourniture durable des écosystèmes.

TWP1 : les systèmes d'observation et les bases de données

TWP1 a pour objectif de coordonner les systèmes d'observation existants en relation avec la modélisation (TWP2) (voir liste complète ci-dessous) :

- services d'observation maritime ;
- Observatoire Environnement Humain Bassin minier de Provence ;
- Observatoire du Chêne à l'Observatoire de Haute-Provence (O3HP) ;
- observatoire Climex.

TWP2 : vers une modélisation intégrée des systèmes méditerranéens

Le but de TWP2 est de développer un modèle intégré pour la Méditerranée basé sur plusieurs composants couplés majeurs :

- modèles de circulation générale complexes (MCG) (exemples : modèle IPSL et modèles de complexité intermédiaire pour réaliser des simulations climatiques conjointes, comme LOVECLIM) ;
- réduction d'échelle à l'aide de modèles statistiques et de modèles à moyenne échelle (collaborations avec LabEx L-IPSL) ;
- modèles d'écosystème pour simuler la végétation naturelle et le bilan hydrique à l'échelle du bassin versant (LPJ-GUESS, LPJmL) ;
- modèle d'agrosystèmes (LPJmL) ;

- modèle marin, les partenaires d'OT-Med élaborent leurs propres codes pour les modèles couplés physique-biogéochimique 3D, couplés aux modèles hydrodynamiques développés par d'autres instituts collaborateurs (par exemple, Eco3M);
- la modélisation du comportement de la société face au changement climatique basée sur des modèles socio-économiques multi-agents.

Les objectifs

- Coordonner et stimuler la recherche interdisciplinaire sur les interactions homme-environnement dans les écosystèmes méditerranéens, en tenant compte du fonctionnement des écosystèmes, de la biodiversité et des aspects socio-économiques, et en tenant compte des différentes échelles de temps de l'évolution des écosystèmes (paléoclimatologie, paléo-écologie).
- Identifier et évaluer des stratégies innovantes pour aider les décideurs à élaborer des politiques publiques et des entreprises à traiter des questions environnementales (par le biais de données, de modèles et de technologies).
- Créer un centre interdisciplinaire pour l'environnement et le développement durable dans le bassin méditerranéen et les régions arides du Sahel.
- Contribuer au métaprogramme MISTRALS lancé par les structures de recherche nationales françaises travaillant sur la région méditerranéenne (par exemple: Paleomex, pour l'étude des interactions climat / sociétés passées ou Mermex [réponse des écosystèmes marins à la Méditerranée]).

Les actions

- Financement de bourses doctorales et postdoctorales.
- Organisation et (co)financement d'écoles d'été, de conférences, d'ateliers et de symposiums.
- Financement des projets collaboratifs interdisciplinaires entre laboratoires partenaires et des projets de mobilité de recherche.
- Invitation de scientifiques de renommée internationale pour des conférences et des projets collaboratifs.
- Système d'échange d'étudiants en collaboration avec des laboratoires étrangers: pays du sud de la Méditerranée, université d'État de San Diego, institut Grantham pour le changement climatique (Imperial College of London), Earth Institute (université de Columbia), etc.
- Participation à des conférences internationales.
- Éducation et information auprès du grand public, des associations et des organisations.
- Coopération avec les pôles de compétitivité et les entreprises privées.

Laboratoires OT-Med²

AMSE: Aix-Marseille School of Economics (*Université d'Aix-Marseille, Faculté d'économie et de gestion, Fondation Amidex, Investissement d'avenir, CNRS, EHESS, INSERM, IRD, ECM*), <https://www.amse-aixmarseille.fr>.

CEREGE: Centre européen de recherche et d'enseignement des géosciences de l'environnement (*Aix-Marseille Université, CNRS, IRD, Collège de France*), <https://www.cerege.fr>.

CERIC: Centre d'études et de recherches internationales et communautaires (*CNRS, Aix-Marseille Université, Faculté de droit et de science politique*), <https://dice.univ-amu.fr/fr/dice/ceric>.

ECCOREV: Écosystèmes continentaux et risques environnementaux (structure de recherche fédérative), <https://www.eccorev.fr>.

ESPACE: Laboratoire Étude des structures, des processus d'adaptation et des changements de l'espace (*CNRS, Université d'Avignon et des pays de Vaucluse, Aix-Marseille Université, Université Nice Sophia Antipolis*), <http://www.umrespace.org>.

IMBE: Institut méditerranéen de biodiversité et d'écologie marine et continentale (*Aix-Marseille Université, CNRS, IRD, Avignon Université*), <https://www.imbe.fr>.

LPED: Laboratoire population environnement développement (*Aix-Marseille Université, IRD*), <http://www.lped.fr>.

MIO: Institut méditerranéen d'océanographie (*Université d'Aix-Marseille, Université de Toulon, CNRS, IRD*), <http://www.mio.osupytheas.fr/fr>.

RECOVER: Risques, écosystèmes, vulnérabilité, environnement, résilience (*INRAE, AMU*), <https://www6.paca.inrae.fr/recover>.

URFM: Unité de recherche forêt méditerranéenne (*INRAE*), https://www6.paca.inrae.fr/ecologie_des_forets_mediterraneennes.

² Les tutelles sont indiquées en italique.

Présentation du LabEx OT-Med



Annexe 4

Glossaire et sigles

Glossaire

Abiotique (stress): se dit d'un facteur lié au milieu, indépendant des êtres vivants.

Active (faille): une faille peut être considérée comme active si elle a subi au moins une réactivation sismique au cours du quaternaire (sur les deux derniers millions d'années) et/ou si elle montre des évidences de déplacement très récent à actuel.

Aléa (sismique): probabilité (espérance mathématique) qu'en un lieu donné se produise un séisme d'une certaine énergie, c'est-à-dire d'une intensité ou magnitude donnée. C'est donc l'inverse de la période de retour appelée « récurrence ».

Aménitaire (valeur): tout aspect de l'environnement appréciable et agréable pour l'homme.

Anémochorie: dispersion des fruits ou graines d'une espèce végétale par le vent.

Anémogame: se dit d'une espèce végétale chez laquelle la pollinisation est assurée par le vent.

Anoxie: diminution de l'oxygène dissous ou présent et biodisponible dans le sol, les sédiments, l'eau ou l'atmosphère.

Anthropique: se dit d'une perturbation non naturelle causée par les activités humaines.

Archéosismologie: discipline qui permet de retracer l'histoire sismique d'une faille ou d'une région à l'échelle archéologique (archéosismicité), grâce à l'étude d'édifices ou de vestiges archéologiques affectés par un séisme ancien. Elle permet d'explorer une période comprise entre celle de la sismicité historique et de la paléosismicité.

Autogame: se dit d'une espèce végétale chez laquelle la pollinisation se réalise au sein de la même fleur.

Barocline: se dit d'un fluide lorsque les lignes d'égale pression (isobares) croisent celles d'égale densité (isopycnes) dans celui-ci.

Bathyal: qui concerne la zone sous-marine comprise entre 200 et 2000 m.

Benthique: se dit de toute espèce vivant dans la zone de fond aquatique, soit à proximité, soit directement sur ou dans le substrat.

Biocénose: ensemble des êtres vivants qui occupent un milieu donné (le biotope) en interaction les uns avec les autres et avec ce milieu. La biocénose et le biotope constituent l'écosystème.

Catabolisme: ensemble des réactions de dégradations moléculaires d'un organisme, à l'opposé de l'anabolisme, qui est l'ensemble des réactions de synthèse. Le catabolisme et l'anabolisme sont les deux composantes du métabolisme.

Chorologie: étude scientifique de la répartition géographique des espèces animales et végétales; expression cartographique de cette répartition.

Circalittoral: se dit de l'étage sous-marin compris entre le niveau des plus basses mers et la plus grande profondeur où croissent des algues.

Downscaling: descente d'échelle (méthodes numériques ou statistiques).

Édaphique: relatif à la nature des sols.

Éléments traces métalliques et métalloïdes: métaux toxiques au-delà d'un certain seuil dont certains sont radioactifs. Leurs concentrations environnementales (eau, air, sol, organismes) résultent d'apports anthropiques (industrie, transports, etc.) et naturels (volcanisme et altération des minéraux primaires).

Endozoochorie: dispersion des fruits ou graines d'une espèce végétale après ingestion par les animaux.

Entomogame: se dit d'une espèce végétale chez laquelle la pollinisation est assurée par les insectes.

Éphyrule: larve de méduse, dont certaines ont une multiplication asexuée qui les fait se découper en une suite de petites méduses.

Espèce commune: espèce largement distribuée géographiquement et/ou dont les individus sont fréquemment observés.

Espèce endémique: espèce restreinte à une zone géographique délimitée.

Espèce introduite ou allochtone (introduction): espèce qui se retrouve à l'extérieur de son aire de répartition naturelle, introduite accidentellement ou intentionnellement par les activités humaines.

Espèce invasive (invasion): espèce introduite par les activités humaines et qui se développe de manière importante au-delà de son point d'introduction et entraîne des changements négatifs au niveau des systèmes écologiques, économiques et de santé humaine.

Espèce rare: espèce présentant une rareté géographique (espèce localisée), démographique (populations peu denses) et/ou écologique (dépendance à un habitat ou à une ressource elle-même rare).

Espèce remarquable: espèce menacée particulièrement importante dans un écosystème ou un habitat donné.

Étrépage: pratique visant à décaïsser et à exporter le sol superficiel et la végétation, pratiquée en gestion des milieux et, autrefois, en agriculture.

Eutrophe: se dit d'un plan d'eau (étang, lac, etc.) dont les eaux enrichies en matières organiques sont le siège d'une prolifération végétale et bactérienne entraînant une désoxygénation prononcée de l'eau.

Faïlle: discontinuité ou fracture qui affecte la croûte terrestre montrant un mouvement relatif des deux blocs séparés par la faille. Le déplacement entre les deux blocs s'appelle le «rejet». C'est en fonction du type de rejet qu'est

établie la classification des failles. Ainsi, une faille décrochante est caractérisée par un rejet essentiellement horizontal dans le plan de la faille.

Forçage: contrainte forte qui oriente les dynamiques ou le fonctionnement des écosystèmes.

Fouling: fixation d'organismes sur un substrat artificiel, initialement nu, comme une coque de bateau.

Homogénéisation biotique: remplacement d'espèces natives régionales, souvent spécialistes, par des espèces introduites et/ou généralistes et parfois invasives.

Hydrocarbures aromatiques polycycliques: molécules constituées d'atomes de carbone et d'hydrogène mais dont la structure comprend au moins deux cycles aromatiques condensés.

Hypoxie: manque d'apport en oxygène au niveau des tissus de l'organisme.

Métabolite: composé organique intermédiaire ou issu du métabolisme.

Microsismicité: caractère d'un microséisme, tremblement de terre de faible amplitude uniquement décelable à l'aide d'instruments.

Niche écologique: Grinnell (1917) définit la niche comme étant l'ensemble des conditions abiotiques (facteurs physico-chimiques d'un écosystème) permettant la survie de l'espèce sans immigration. Elton (1927) définit la niche comme l'ensemble des conditions biotiques (interactions du vivant sur le vivant dans un écosystème). Pour Hutchinson (1957), la niche constitue l'ensemble des variables abiotiques et biotiques (références listées dans le chapitre 5).

Nurse: se dit d'une espèce nourricière qui facilite l'implantation et la croissance d'autres espèces.

Oligotrophe: se dit d'un milieu pauvre en substances nutritives, en particulier de certains lacs profonds et limpides, pauvres en éléments organiques mais riches en oxygène; se dit également des végétaux capables de subsister dans un milieu très pauvre.

Osmotique: se dit de la pression qui détermine le phénomène d'osmose et qui correspond à la différence des pressions exercées de part et d'autre d'une membrane semi-perméable par deux liquides de concentration différente.

Paléosismologie: ensemble des études qui recherchent le témoignage de séismes anciens (paléosismicité) par l'analyse de couches géologiques accumulées au pied d'une faille active. Ces couches, le plus souvent exposées dans des tranchées creusées à travers la trace en surface d'une faille active, constituent les témoignages géologiques de l'histoire sismique de la faille au cours du temps. En datant les couches successives, on date indirectement les événements sismiques successifs et l'on retrace donc l'histoire sismique de la faille ainsi que le temps de retour des séismes (récurrence sismique).

Pédogénèse: ensemble des processus physiques, chimiques et biologiques qui aboutissent à la formation, à la transformation ou à la différenciation des sols.

Phanérogame: qui a des organes sexuels (fleurs) apparents.

Phénologie: étude des variations des phénomènes périodiques de la vie animale et végétale en fonction du climat.

Phryganes: formations végétales thermo-méditerranéennes composées de plantes à feuilles persistantes.

Phyllosphère: ensemble des parties des plantes situées au-dessus du niveau du sol et considéré comme habitat pour les micro-organismes.

Phylogéographie: étude des principes et processus qui gouvernent la distribution des lignées généalogiques à l'échelle intraspécifique. Concrètement, la phylogéographie est un travail d'historien de la biodiversité qui consiste à émettre des scénarios ou hypothèses sur l'histoire démographique et biogéographique des populations, puis à les évaluer à partir de leur diversité génétique actuelle.

Phytostabilisation: utilisation d'un couvert végétal tolérant aux polluants présents dans un sol pour limiter leur dissémination dans l'environnement (par érosion éolienne ou hydrique ou par lessivage) et leur transfert à l'homme.

Pyrophyte: se dit d'une espèce qui supporte le feu.

Réseaux trophiques: ensemble de liens alimentaires qui relie un cortège d'organismes vivants de différentes espèces entre eux.

Résilience: capacité d'un écosystème à adapter son fonctionnement après avoir subi une perturbation sans indication de retour à un état « d'équilibre » ou « initial » de l'écosystème (Holling, 1973).

Risque sismique: désigne la probabilité qu'un séisme engendré dans une zone produise des dégâts matériels et des pertes en vies humaines. En d'autres termes, le risque, c'est la probabilité d'occurrence d'un événement et ses conséquences. Ce qui relie le risque à l'aléa, c'est la vulnérabilité (cf. vulnérabilité), qui permet de quantifier le pourcentage de perte en fonction de l'importance de l'événement.

Sismicité: fréquence, localisation et énergie (intensité, magnitude) des séismes ayant lieu dans une région donnée. La microsismicité concerne la sismicité des petits séismes, c'est-à-dire de magnitude comprise entre 0 et 3 environ, pas ou peu ressentis mais enregistrés par l'instrumentation sismique (les sismomètres).

Sismogénique: le comportement sismogénique (d'une faille) détermine les caractéristiques (magnitude maximale, temps de retour, etc.) des séismes pouvant être produits sur une faille. Le potentiel sismogénique d'une faille désigne son potentiel à générer des séismes ainsi que les caractéristiques (magnitude maximale, récurrence, etc.) de ces derniers.

Spéciation: formation d'espèces nouvelles; différenciation des espèces.

Symbiose racinaire: association intime et durable au niveau des racines d'une espèce végétale avec une autre espèce (les deux espèces différentes impliquées étant qualifiées de « symbiotes »).

Taxon: unité de classification zoologique ou botanique (famille, genre, espèce, etc.).

Téléostéen: poisson osseux dont le squelette est entièrement ossifié.

Tensioactif: molécule qui présente deux parties de polarité différente, l'une lipophile (qui retient les matières grasses) et apolaire, l'autre hydrophile (miscible dans l'eau) et polaire.

Thermoxérophile: se dit d'une espèce végétale qui recherche ou supporte des températures élevées au moins pendant sa période de végétation et/ou un sol aux réserves en eau limitées.

Upwellings: remontées d'eaux profondes plus froides et plus riches en nutriments.

Valence écologique: capacité d'une espèce à tolérer les variations des facteurs écologiques d'un milieu différent de son milieu naturel et à le coloniser.

Vulnérabilité (sismique): paramètre qui permet de quantifier le pourcentage de perte en fonction de l'importance de l'événement sismique; manière de déterminer les conséquences relatives à un séisme. Cette notion intègre à la fois la notion d'aléa et la perte probable en biens et activités productives ainsi qu'en vies humaines. La définition officielle de la vulnérabilité dans le domaine du risque sismique est le rapport du coût des dommages sur le coût de construction. Cette notion concerne le génie parasismique (normes de construction parasismique).

Zoochorie: dispersion des fruits ou graines d'une espèce végétale par les animaux.

Sigles

AMP: Aire marine protégée.

AViTeM: Agence des villes et territoires méditerranéens durables.

CEREGE: Centre européen de recherche et d'enseignement des géosciences de l'environnement.

CMIP5: Coupled Model Intercomparison Project Phase 5.

CNRS: Centre national de la recherche scientifique.

CORINE: Coordination et recherche de l'information en environnement.

CSIRM: Comité de surveillance et d'information sur les rejets en mer.

DDTM: Direction départementale des territoires et de la mer.

DIACT: Délégation interministérielle à l'aménagement du territoire et à l'attractivité régionale.

DREAL PACA: Direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement en Provence-Alpes-Côte d'Azur.

GES: gaz à effet de serre.

GICC: Gestion et impacts du changement climatique, programme de recherche financé par la Direction de la recherche et de l'innovation (DRI) du Commissariat général au développement durable (CGDD).

GIEC: Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat.

GIZC: Gestion intégrée des zones côtières.

IMBE: Institut méditerranéen de biodiversité et d'écologie marine et continentale.

INEE: Institut écologie et environnement du CNRS.

INRAE: Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement.

INSHS: Institut des sciences humaines et sociales du CNRS.

IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change.

LPED: Laboratoire population environnement développement.

MEDD: ministère de l'Écologie et du Développement durable.

MIO: Mediterranean Institute of Oceanography.

MUCEM: Musée des civilisations de l'Europe et de la Méditerranée.

OHM: Observatoire homme-milieu.

ONF: Office national des forêts.

OQSM: Observatoire des quartiers sud de Marseille.

OSU Institut Pythéas: voir annexe 1.

PCET: Plan climat énergie territorial.

PLU: plan local d'urbanisme.

POS: plan d'occupation des sols.

PPI: plan particulier d'intervention.

SCoT: Schéma de cohérence territoriale.

SYMADREM: Syndicat mixte interrégional d'aménagement des digues et du delta du Rhône et de la mer.

ZICO: Zone d'importance communautaire pour les oiseaux.

ZNIEFF: Zones naturelles d'intérêt écologique faunistique et floristique.

Table des matières

Bruno David	
Préface	
Vue sur la mer : les grandes métropoles du littoral	5
Hubert Mazurek, Thomas Curt et Joël Guiot	
Introduction	7
Xavier Giraud et Joël Guiot	
Chapitre 1	
Marseille face au changement climatique global	15
Francis Cann et Claude Napoléone	
Chapitre 2	
Enjeux futurs liés à l'usage actuel des sols dans l'agglomération marseillaise	29
Hubert Mazurek	
Chapitre 3	
Les enjeux de l'environnement urbain	43
Patrick Arnaud, Thomas Curt, Laurent Peyras, Rémy Tourment et Olivier Bellier	
Chapitre 4	
Risques et protection	65
Laurence Affre, Magali Deschamps-Cottin, Valérie Montes et Christine Robles	
Chapitre 5	
La biodiversité et les changements globaux	99
Samuel Robert et Isabelle Laffont-Schwob	
Chapitre 6	
Le littoral marseillais	147
Patrick Raimbault, Charles-François Boudouresque <i>et al.</i>	
Chapitre 7	
Le milieu marin autour de Marseille	171
Hubert Mazurek, Thomas Curt et Joël Guiot	
Conclusions	221
Bibliographie	231
Annexe 1	
Présentation de l'OSU Institut Pythéas	257
Annexe 2	
Les services d'observation et les réseaux de l'OSU Institut Pythéas	259
Annexe 3	
Présentation du LabEx OT-Med	269
Annexe 4	
Glossaire et sigles	275

Conception graphique de la couverture Valérie Julia – PUP (Aix-en-Provence)
Mise en page Jordy Niess – Grasse

Imprimé en France
sur les presses de SEPEC – Péronnas (01960)

Dépôt légal 1^{er} trimestre 2021

ISBN 979-10-320-0293-3

ISSN 2679-8735