



MISTRALS



EXPLORATIONS
DE MISTRALS
EN MÉDITERRANÉE

ÉDITO

La Méditerranée est un monde en soi qui a connu l'émergence de grandes civilisations. Elle est aujourd'hui encore un lieu unique de diversité biologique, culturelle, économique, politique et religieuse. Cet incroyable creuset, sans équivalent sur Terre, fait face à un nouveau défi : celui de devoir s'adapter rapidement aux effets combinés du réchauffement climatique, de la pression démographique et de l'usage excessif des ressources naturelles. Alors que la température de la planète n'a augmenté « que » de 1 °C, le réchauffement atteint 1,4 °C dans le bassin méditerranéen depuis le début de l'ère industrielle, avec des conséquences mesurables telles que l'élévation du niveau de la mer et son acidification, ou la baisse notable des précipitations dans le sud et l'est. Les travaux du GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) anticipent pour les décennies à venir une amplification de ces phénomènes qui, en Méditerranée plus qu'ailleurs, menacent directement la biodiversité et la santé des populations. Sollicités par les habitants et les décideurs soucieux d'atténuer ces bouleversements, les chercheurs du CNRS, du CEA, de l'IFREMER, de l'INRAE, de l'IRD, de Météo-France et de l'ADEME se sont organisés dès 2010 pour « se mettre au chevet » de la Méditerranée en se fédérant au sein d'un grand programme de recherche interdisciplinaire d'une durée de dix ans : MISTRALS.

Grâce à ce programme, plus de 1000 scientifiques de 23 pays ont étudié les interactions entre climat, environnement et civilisations anciennes, analysé les particules issues de la pollution atmosphérique à l'aide d'avions et de satellites, modélisé à l'aide de supercalculateurs les sécheresses, les crues et l'évolution des précipitations des prochaines décennies, embarqué sur des navires pour mesurer les courants du large, les contaminants dans l'eau et le phytoplancton, mesuré l'impact de l'agriculture et de l'urbanisation sur la pollution des sols et des eaux souterraines, ou encore décrit l'évolution de la biodiversité dans les eaux côtières ou sur les îles.

L'impressionnante quantité de connaissances tirées de ces travaux et publiées dans 1500 articles scientifiques a permis des avancées majeures pour comprendre les processus physiques, chimiques et biologiques qui affectent l'environnement en Méditerranée, et répondre aux problématiques sociétales de gestion durable des ressources (eaux, sols), de préservation de la qualité de l'air et des eaux, d'aménagement des territoires et de prévention des risques naturels (crues, tempêtes, sécheresses, etc.). MISTRALS a induit l'émergence de réseaux internationaux de scientifiques afin de structurer les futures recherches et communiquer vers le public et les décideurs.

Pour que la Méditerranée reste longtemps un monde où il fait bon vivre...

Cyril Moulin, Directeur adjoint du CNRS INSU



© Xavier Durrieu de Madron

TABLE DES MATIÈRES

LA RECHARGE DES AQUIFÈRES	4
BARRAGES ET RETRAIT DU LITTORAL AU MAGHREB.....	6
L'OBSERVATION SPATIALE POUR LE SUIVI DES RESSOURCES EN EAU	8
UNE MOSAÏQUE DE NUISANCES ET DE CONTAMINATIONS.....	10
QUEL AVENIR POUR LES CORAUX PROFONDS ?	12
VERS UNE MEILLEURE GESTION DE L'EAU AGRICOLE EN MÉDITERRANÉE	
DU SUD	14
LA ZONE LITTORALE, MÉMOIRE DES ÉVÈNEMENTS EXTRÊMES DU PASSÉ	16
PLUIES EXTRÊMES ET CRUES EN MÉDITERRANÉE	18
LE RAPPORT DU RÉSEAU MEDECC TIRE LA SONNETTE D'ALARME !	20
ÉVOLUTION CLIMATIQUE DES CANICULES OCÉANIQUES.....	22
LE CIRCUIT 3D DES MASSES D'EAU	24
DES ÉCOSYSTÈMES MILLÉNAIRES CONSTRUITS AVEC LE FEU	26
VIVRE SUR LES COLLINES MÉDITERRANÉENNES AU TEMPS DE LA	
SÈCHERESSE	28
POLLEN ET SÈCHERESSE : VERS UN RÉSEAU DE SURVEILLANCE	30
SOCIÉTÉS DU PASSÉ ET CHANGEMENTS CLIMATIQUES	32
LES CHAUVES-SOURIS, SENTINELLES DES CHANGEMENTS	34
LES OASIS MÉDITERRANÉENES.....	36
SINJAJEVINA, UN SOCIO-ÉCOSYSTÈME MILLÉNAIRE	38
CARESSE D'ÉPONGE, CARESSE DOUCE-AMÈRE.....	40

Port grec d'Héraklion, en Crète, et le massif enneigé du mont Psiloritis en arrière-plan, photographiés le 17 mars 2019 depuis le pont du *Pourquoi Pas ?*, navire de recherche de la Flotte océanographique française

LA RECHARGE DES AQUIFÈRES

Les ressources en eau de la plupart des zones méditerranéennes proviennent pour une large part des zones montagneuses situées en amont des bassins versants. Ces zones amont reçoivent suffisamment de précipitations, dont une partie sous forme de neige, pour générer des écoulements de surface qui sont fortement mobilisés en aval par l'agriculture irriguée. Toutefois, une part importante des précipitations s'infiltré en profondeur et va recharger les aquifères localisés en aval. Dans les zones de plaine, l'exploitation croissante de cette eau souterraine a pour conséquence un abaissement généralisé des niveaux des nappes, mettant en danger la durabilité des agro-systèmes méditerranéens. Il est donc crucial de comprendre le fonctionnement hydrologique de ces systèmes et en particulier les processus de recharge des aquifères depuis l'amont. Si l'impact du changement climatique sur l'enneigement et les débits des rivières retient déjà l'attention de la communauté scientifique, ses conséquences sur la recharge des nappes restent aujourd'hui mal connues.

Ce manque de connaissance est dû à la complexité des processus en jeu ainsi qu'à l'impossibilité d'observer directement les flux souterrains. Néanmoins, l'étude de la composition chimique et isotopique de l'eau permet d'obtenir des informations sur son cheminement souterrain et sur les interactions entre les différentes masses d'eau. Cette composition est influencée, entre autres, par l'altitude à laquelle sont tombées les précipitations, ainsi que par le taux d'évaporation qu'elles ont subi avant de s'infiltrer. Une autre approche pour évaluer la recharge se base sur le bilan hydrique d'un bassin. À partir de la connaissance des précipitations, des débits de surface et de l'évapotranspiration, il est possible de déduire la fraction infiltrée en profondeur grâce à l'équation de fermeture du bilan hydrologique. Ces connaissances permettent alors de modéliser les processus de recharge et de tester des scénarios de gestion ou d'impact des changements climatiques.

Une incertitude majeure est associée à la quantification de l'évapotranspiration très mal connue ou modélisée en montagne. Cette modélisation est également tributaire des observations *in situ* qui font souvent défaut pour la calibration ou validation des modèles. Il est donc fondamental de maintenir des observatoires pérennes pour mesurer régulièrement les variables météorologiques, les débits des rivières, l'hydrochimie, le niveau des nappes, les flux liés à l'irrigation, etc. C'est grâce à la complémentarité entre observation de terrain, observation satellitaire et modélisation que nous pourrions fournir les informations nécessaires pour une gestion optimale des ressources en eau et déterminer des répartitions soutenables des usages tenant compte des changements climatiques en cours.

Vincent Simonneaux, Lahoucine Hanich, Laurence Vidal, Younes Fakir



Dans les zones de plaine, l'exploitation croissante de l'eau souterraine a pour conséquence un abaissement généralisé des niveaux des nappes, mettant en danger la durabilité des agro-systèmes méditerranéens.

Plaine de comblement
d'Aremd, Vallée de la
Rheraya, Haut Atlas
occidental



BARRAGES ET RETRAIT DU LITTORAL AU MAGHREB

Pour assurer l'approvisionnement en eau de leurs populations et de leurs économies en développement, les pays du Maghreb ont lancé depuis les années 1960 un vaste programme de construction de barrages. La capacité cumulée de stockage d'eau des barrages du Maghreb est ainsi de 28 milliards de mètres cubes aujourd'hui. Cependant, le principe général de gestion de ces ouvrages étant la conservation de l'eau pour les usages essentiellement agricoles et domestiques, le corollaire en est une importante rétention de sédiments.

Comment évaluer la quantité de sédiments qui n'atteignent plus la mer depuis la construction des barrages ? Les flux de sédiments ne sont malheureusement peu ou pas du tout mesurés dans la plupart des pays. Pour documenter les exportations historiques de sédiments par les rivières vers les zones côtières, des actions communes ont été lancées dans le cadre de SICMED et PALEOMEX, deux programmes de MISTRALS, pour étudier les carottes de sédiments échantillonnées dans les terrasses alluviales récentes des principaux cours d'eau des plaines deltaïques des plus grands fleuves du Maghreb. Des études de granulométrie, de géochimie et de datation au Césium 137 ont été effectuées sur les carottes et comparées aux séries chronologiques des débits aux stations hydrologiques les plus proches. Ces stations servent de référence pour marquer les événements hydrologiques les plus importants qui apportent de grandes quantités de sédiments jusqu'au littoral, et ainsi participent à ce que l'on appelle leur « engraissement ».

Tous les résultats confirment que la construction des barrages a considérablement modifié la quantité et la qualité des sédiments libérés en aval des barrages jusqu'à la mer. Dans le cas de la rivière Medjerda en Tunisie, plus de 50 % des sédiments sont retenus dans les lacs de barrages et n'atteignent plus la mer. En proportion, ce sont surtout les sables qui restent piégés dans les réservoirs, car ils sont plus lourds. Ainsi, on ne les retrouve plus dans les carottes de sédiments prélevées en aval des barrages depuis plusieurs décennies. Le littoral du golfe de Tunis par exemple ne reçoit plus de sable du continent depuis près de 40 ans !

L'érosion côtière, déjà en marche du fait de l'augmentation du niveau marin, se voit donc accélérée par les barrages : elle peut atteindre des taux de recul de $-20 \text{ m} \pm 0.15 \text{ m/an}$ et réduit la largeur des plages, et se voit nettement sur les images satellitaires en comparant les dates 1936, 1974, 1988, 1999 et 2016. Ce phénomène modifie également le bilan écohydrologique des zones côtières et a nécessairement des impacts sur les activités socio-économiques. Confirmant l'ampleur régionale du phénomène, des résultats similaires ont été récemment obtenus pour les grands fleuves d'Algérie et du Maroc.

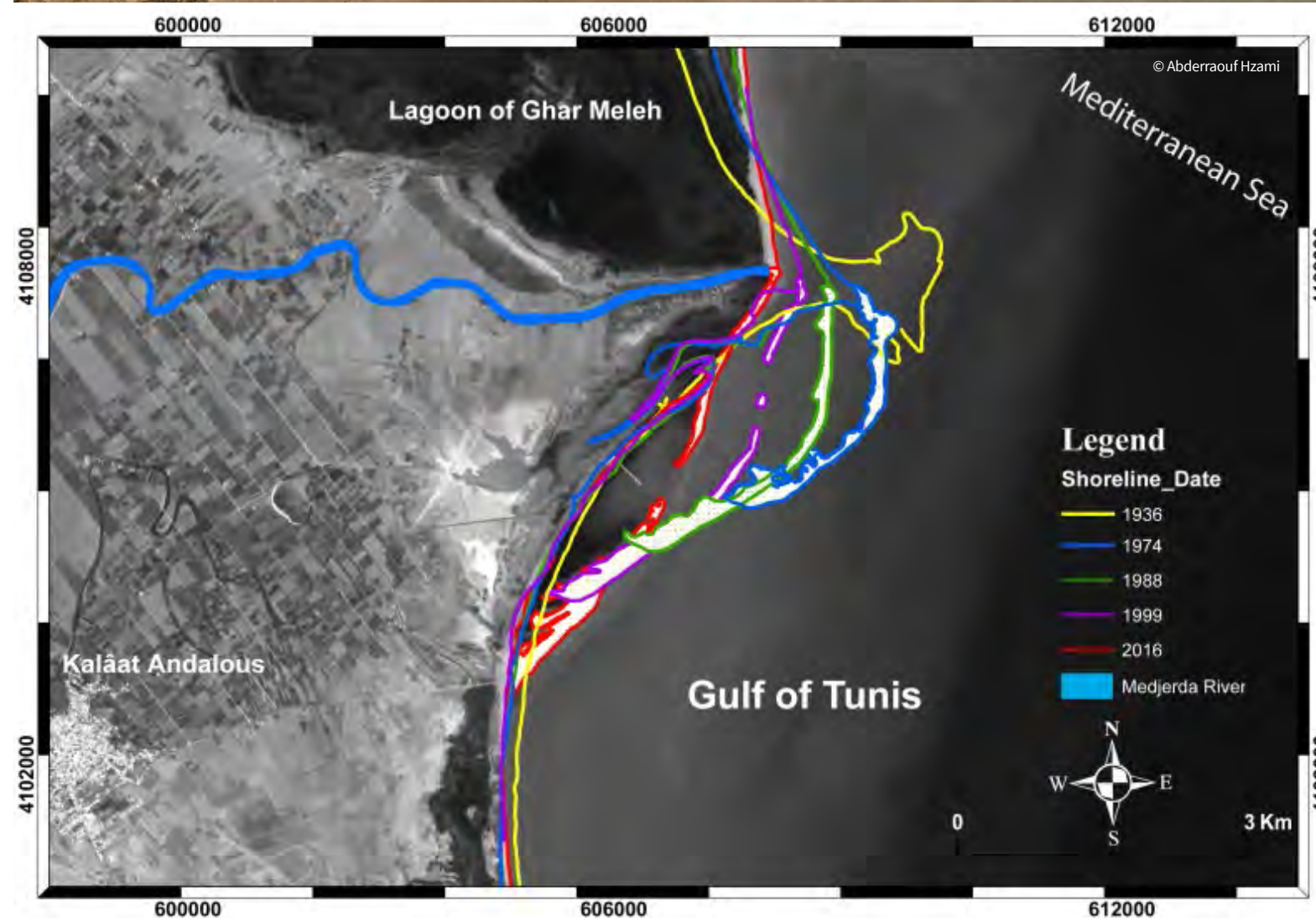
Ainsi, le choix de gestion à long terme de la ressource en eau par le stockage des eaux de ruissellement de surface dans des réservoirs s'avère avoir des conséquences environnementales graves. Si la disponibilité en eau est indispensable pour le développement socio-économique, une solution doit être trouvée de toute urgence pour libérer des sédiments vers la mer, afin de ralentir l'érosion côtière et maintenir la biodiversité littorale.

Gil Mahe, Oula Amrouni, Laurent Dezileau

“ L'érosion côtière, déjà en marche du fait de l'augmentation du niveau marin, se voit accélérée par les barrages. ”

En haut : Nouveau delta de la rivière Medjerda, golfe de Tunis, Tunisie

En bas : Érosion des plages sableuses aux alentours de l'ancien delta de la Medjerda



L'OBSERVATION SPATIALE POUR LE SUIVI DES RESSOURCES EN EAU

La région méditerranéenne est souvent considérée comme un exemple paradigmatique de l'extrême tension autour des ressources en eau. Leur surexploitation est déjà observée dans la plupart des pays méditerranéens et la situation ne peut que se détériorer davantage. Dans le contexte du changement climatique et de forts changements anthropiques, la gestion de l'eau s'avère donc, avec la sécurité alimentaire, la question centrale en Méditerranée au XXI^{ème} siècle.

Agriculture (qui consomme dans certains pays plus de 80 % des ressources), usage domestique, industrie : tandis que la demande globale en eau augmente sans relâche, et en particulier dans les pays du sud et de l'est de la Méditerranée, l'accès à l'eau pour les populations les plus pauvres et / ou les plus isolées reste limité. Il s'agit donc de trouver un bon équilibre entre les différentes demandes catégorielles. Comment quantifier les termes du cycle de l'eau continental ? Quels sont les processus à l'interface entre la surface continentale et l'atmosphère ? Quelles méthodes proposer pour une gestion plus durable de la ressource en eau en tenant compte des futures contraintes climatiques ? Dans le cadre du programme MISTRALS, des scientifiques se sont penchés sur ces importantes questions.

Dans toute la région méditerranéenne, les réseaux de mesures hydrométéorologiques sont souvent insuffisamment denses et mal adaptés aux besoins des gestionnaires d'accès aux données en temps quasi réel. La télédétection (par satellite principalement) a en revanche démontré un grand potentiel pour compléter les réseaux de mesure *in situ* lors de l'évaluation des composantes du cycle hydrologique. Il s'agit notamment des précipitations, de l'évapotranspiration, de la teneur en eau du sol, de la neige, mais également de la possibilité de générer des descriptions précises de l'occupation du sol et de la couverture végétale. A travers des analyses d'anomalies sur des longues séries temporelles des différents satellites, les capteurs spatiaux fournissent des informations essentielles pour la gestion ainsi que la surveillance des événements extrêmes et de leurs impacts. La large couverture spatiale de ces données devrait permettre une meilleure évaluation des risques en termes de sécurité hydrique régionale. Les progrès de la technologie des systèmes de positionnement satellite

et du smartphone ainsi que l'accès libre aux images satellites comme Sentinel (du programme européen Copernicus) ont permis le développement d'applications et d'outils intelligents pour aider les agriculteurs et les parties prenantes dans la prise de décision.

Grâce au programme MISTRALS, un véritable réseau international s'est développé autour de l'utilisation de l'observation spatiale pour le suivi des ressources en eau, incluant plusieurs pays du nord et sud de la Méditerranée. Cela a permis des avancées majeures dans la compréhension du cycle de l'eau et ses différents processus, ainsi qu'un meilleur suivi des événements extrêmes, notamment la sécheresse. En plus de nombreuses publications scientifiques co-signées par les chercheurs relevant du nord et du sud, plusieurs outils opérationnels et produits spatiaux (indices de sécheresse, occupation du sol, irrigation etc) sont transférés vers l'utilisation opérationnelle des gestionnaires dans différents pays, notamment au Maroc, en Tunisie et au Liban.

Gilles Boulet, Jamal Ezzahar, Ghaleb Faour, Lahoucine Hanich, Lionel Jarlan, Zohra Lili-Chabaane, Mehrez Zribi

Tandis que la demande globale en eau augmente sans relâche, et en particulier dans les pays du sud et de l'est de la Méditerranée, l'accès à l'eau pour les populations les plus pauvres et / ou les plus isolées reste limité. Il s'agit donc de trouver un bon équilibre entre les différentes demandes catégorielles.

Image Landsat du 14 Avril
2017, bassin du Tensift,
Maroc

UNE MOSAÏQUE DE NUISANCES ET DE CONTAMINATIONS

Au pied du Jebel Ressass, la Montagne de plomb décrite par Flaubert dans Salammbô, la plaine de Mornag est une terre fertile, aux superbes oliviers, et au passé millénaire : l'aqueduc romain y déroule ses 132 km de long pour approvisionner Carthage en eau. Ce paysage historique est soumis actuellement à une accumulation d'enjeux environnementaux. Oléiculture d'exportation, exploitation de plomb dans la montagne : si cette plaine porte depuis l'époque carthaginoise un long passé d'usages qui se combinent, et dont l'intensité varie dans le temps, le 20^{ème} et le 21^{ème} siècle ont vu leurs nuisances s'intensifier et des risques se multiplier, à l'instar d'autres territoires de la Méditerranée, anthropisés et transformés depuis une période aussi longue et étudiés par des programmes comme MISTRALS ou des groupes de recherche comme O-LIFE.

Dans cette plaine a été réalisée une enquête par cartographie à dire d'acteurs : on interroge les habitants avec le support d'une carte sur laquelle est scotchée un calque ; sur celui-ci, on dessine les perceptions des habitants comme réponse à une seule et unique question : « concernant l'environnement dans cette région, est-ce partout pareil ? ». Les différences et les risques sont alors positionnés tout au long de l'interview. En multipliant et combinant les cartes faites sur base des perceptions locales avec le système d'information géographique (SIG), on a ainsi pu recenser et circonscrire les risques et nuisances vus par les habitants et positionner de nouveaux qui n'étaient ni déjà connus ni envisagés dans les politiques publiques. Dix risques majeurs ont ainsi été recensés, certains connus et circonscrits comme les poussières des terrils chargées de métaux lourds, l'intrusion d'eaux salines du fait de la baisse de la nappe phréatique. D'autres, comme les déchets ménagers, les élevages industriels, l'assainissement des eaux sont plus diffus mais s'avèrent plus visibles dans la vie quotidienne, marquant la périurbanisation de ce territoire initialement rural mais de plus en plus connecté à Tunis.

Comme tous les pays des deux rives de la Méditerranée en voie d'industrialisation, la Tunisie doit adapter ses modes de régulation publique de ces risques et problèmes : poussières de cimenterie et de carrière, nitrates des eaux d'irrigation, pesticides de l'oléiculture sont autant de marqueurs de cette expansion agro-industrielle. Ainsi a-t-on identifié, au croisement de la route C35 et de l'embranchement vers le bourg d'Arrissala, un hameau qui cumule huit risques sur les dix. Cette

méthode peut servir aux élus et aux acteurs locaux pour hiérarchiser les priorités, du point de vue des populations, en termes de gestion des risques, contaminations et nuisances sur leur territoire. Un outil d'appui au développement et à la participation des citoyens au service de la nouvelle Tunisie contemporaine !

Mehdi Saqalli



En interrogeant les habitants avec le support d'une carte, dix risques environnementaux majeurs ont été recensés dans la plaine de Mornag en Tunisie.

Ruines des bâtiments de l'installation minière de la Penaroya datant du protectorat français et regardant vers le sud et la carrière et la cimenterie Cement Carthage, avec le Jebel Ressass à gauche



© Mehdi Saqalli

QUEL AVENIR POUR LES CORAUX PROFONDS ?

Nous avons tous en tête ces images de récifs coralliens aux couleurs éclatantes abritant une biodiversité fabuleuse. Nous nous imaginons nager dans les eaux chaudes et turquoise des régions tropicales pour les explorer. Mais peu d'images du monde corallien des régions tempérées ou subpolaires nous viennent à l'esprit. Pourtant, un monde bien plus mystérieux se cache dans les profondeurs de ces océans... un monde mis en péril par le réchauffement climatique et l'acidification des eaux méditerranéennes.

Solitaires ou organisés sous forme de récifs, les coraux profonds se développent depuis des milliers d'années le long des marges océaniques. Ces animaux, également appelés coraux d'eaux froides, vivent dans l'obscurité et, à la grande différence des coraux tropicaux, sans symbiose avec des Zooxanthelles, algues unicellulaires photosynthétiques. De l'ordre des Scleractinia, ils forment un squelette calcaire dur, souvent branchu. Grâce à leurs polypes, ils se nourrissent de particules et nutriments présents dans l'eau. Leur découverte a permis de mettre à jour un écosystème également riche d'une biodiversité propre à ces milieux extrêmes, avec la présence de nombreux poissons et invertébrés. En mer Méditerranée, les colonies coralliennes se développent dans les eaux à des profondeurs situées entre 200 et 700 m dont les températures sont de l'ordre de 12 à 14 °C.

Lors de missions océanographiques, des forages et l'utilisation de robots sous-marins ont permis de prélever les branches de ces coraux vivants, mais aussi fossiles, ensevelis dans les premiers mètres de sédiments, à la fois en Mer d'Alboran, à l'Ouest de la Méditerranée, au Sud de la Sardaigne, dans le Déroit Siculo-Tunisien ou encore au Sud de l'Italie et de Chypre dans le bassin oriental. La période de vie de ces coraux fossiles peut être déterminée précisément par des techniques de datation s'appuyant notamment sur le radiocarbone ou les isotopes de l'uranium et du thorium. L'analyse chimique de leurs branches calcaires fossiles offre une opportunité unique de reconstruire avec précision l'évolution passée de la température mais aussi de l'acidité des océans, paramètres aujourd'hui encore peu documentés à ces profondeurs.

Les premiers résultats de ces analyses isotopiques et élémentaires menées en laboratoire, par spectrométrie de masse, nous indiquent que les coraux profonds méditerranéens ont su s'acclimater pendant les cycles

climatiques et poursuivre leur développement malgré des températures extrêmement froides, de l'ordre de celle du dernier maximum glaciaire il y a 20 000 ans, soit de quelques degrés. Depuis le début de l'Holocène, soit 11 000 ans, ces écosystèmes coralliens se sont parfaitement adaptés à des conditions physico-chimiques remarquablement stables avec des températures situées autour de 12-13 °C et un pH de l'ordre de 8,0-8,1.

Avec le début de l'ère industrielle et le rejet massif de dioxyde de carbone (CO₂) dans l'atmosphère, les eaux de surface des océans se sont non seulement réchauffées de l'ordre de 1 °C, mais aussi acidifiées de plus de 0,1 unité pH. Nos données originales indiquent que ces tendances sont similaires pour les eaux plus profondes de la mer Méditerranée. Conjugués au réchauffement et à l'acidification, ces processus pourraient conduire, d'ici 2100, à la disparition des coraux profonds en Méditerranée, car les seuils de température et de pH favorables à leur développement pourraient être dépassés. Ces écosystèmes profonds pourront encore en revanche trouver des conditions propices à leur survie au-delà du détroit de Gibraltar, dans les eaux de l'Atlantique Nord, là où les températures ne devraient pas encore dépasser ces seuils critiques.

Eric Douville, Paolo Montagna, Marie-Alexandrine Sicre

D'ici 2100, les coraux profonds pourraient avoir disparu en Méditerranée, car les seuils de température et de pH favorables à leur développement pourraient être dépassés.

Lophelia orange, un corail dur dans le canyon Lacaze-Duthiers en Méditerranée occidentale. Photo prise à 500 m de fond avec un robot sous-marin dans le cadre du programme « Environnements marins extrêmes, biodiversité et changement global ».



VERS UNE MEILLEURE GESTION DE L'EAU AGRICOLE EN MÉDITERRANÉE DU SUD

L'irrigation en région méditerranéenne est une pratique indispensable pour le développement et le rendement des cultures. Dès l'antiquité, des systèmes ingénieux de drainage des eaux souterraines (qanât, fogagara ou khet-taras) ou d'exploitation des eaux de surfaces (séguias, qui sont des canaux déviant les eaux des oueds ou jessours, qui sont des ouvrages de conservation des eaux) ont été mis en place pour satisfaire les demandes agricoles. L'irrigation n'a depuis cessé de se développer, si bien qu'elle sollicite à ce jour jusqu'à 85 % de la ressource en eau disponible entraînant une baisse des nappes qui peut atteindre 3 m/an dans certaines régions. Agir sur la demande en eau agricole représente donc le principal levier d'économie d'eau. Bien qu'ambitieuses, les politiques publiques encourageant la modernisation des pratiques (conversion au goutte-à-goutte, water harvesting, irrigation déficitaire, réutilisation des eaux usées) restent inadaptées : une régulation permissive entraîne en effet un gaspillage d'eau ainsi que l'extension des surfaces irriguées. Cette économie est pourtant indispensable car il faudra, dans l'avenir, produire plus avec une quantité d'eau moindre, tant en raison de la croissance démographique que du réchauffement climatique et des mutations agricoles que connaît la région.

Grâce aux réseaux d'observation qui ont été mis en place, les scientifiques du programme MISTRALS se sont tout d'abord attachés à mieux comprendre le fonctionnement hydrologique des cultures en contexte méditerranéen et à quantifier les mutations en cours. À cause de forts enjeux économiques, la région est, en effet, témoin d'une forte augmentation des cultures arborées (oliviers, agrumes), très consommatrices en eau, en remplacement des cultures traditionnelles telles que les céréales. Aussi, des expériences spécifiques ont mis l'accent sur ces cultures au fonctionnement et à la structure plus complexes que les cultures annuelles. Les travaux menés, grâce à l'exploitation conjointes des données *in situ* et des observations satellites, ont également permis, en collaboration avec les acteurs de la gestion de l'eau agricole, d'établir des trajectoires d'évolution de la consommation en eau sous l'effet des changements climatiques et de pratiques. Ils ont également permis de quantifier l'impact sur les réservoirs de surface et souterrains afin d'accompagner la mise en place de mesures d'adaptation à la pénurie d'eau. Enfin, plusieurs outils d'aide à la décision visant

à apporter l'eau à la culture en temps et en quantité opportuns ont été développés et testés avec les offices d'irrigation et les agriculteurs.

Le programme MISTRALS aura donc grandement contribué à la fois à une meilleure connaissance de la consommation en eau des cultures actuelles, à projeter ces besoins en eau dans un contexte de fortes mutations des pratiques et de changement climatique ; dont tout indique qu'il ne sera pas favorable, mais aussi au développement d'outil d'aide à la décision pour rationaliser son usage.

Said Khabba, Michel Le Page, Zohra Lili-Chabaane, Jamal Ezzahar, Hedia Chakroun, Jarlan L, Valérie Le Dantec, Olivier Merlin, Fathallah Sghir, Vincent Simonneaux, Adrien Tavernier



L'irrigation n'a cessé de se développer, si bien qu'elle sollicite à ce jour jusqu'à 85 % de la ressource en eau disponible. Agir sur la demande en eau agricole représente donc le principal levier d'économie d'eau.

Système d'irrigation rudimentaire (séguia) à Ait Iazza au Maroc

Canal d'irrigation, région de Marrakech, Maroc



LA ZONE LITTORALE, MÉMOIRE DES ÉVÈNEMENTS EXTRÊMES DU PASSÉ

Au cours des trois dernières décennies, le bassin méditerranéen a connu une augmentation des événements extrêmes. Si les pluies intenses, crues éclair, et tempêtes violentes ont marqué l'histoire de la civilisation méditerranéenne, une compréhension complète des relations entre fluctuations climatiques, activité des tempêtes et réaction du littoral n'en est pas moins nécessaire, notamment pour prévoir la vulnérabilité des communautés littorales et les impacts économiques potentiels.

Intrinsèquement rares, les événements extrêmes sont difficiles à observer à l'échelle d'une vie humaine. Il est donc essentiel de les replacer dans un contexte temporel plus large, sur plusieurs millénaires, hors de l'influence du changement climatique récent, pour en décrire les tendances et décrypter les causes.

Dans le cadre du programme PaleoMeX de MISTRALS, des actions de terrain multidisciplinaires d'envergure ont été mises en œuvre de manière concertée pour reconstruire l'histoire de ces événements extrêmes sur le littoral ouest méditerranéen en France, Espagne, Maroc, Algérie, et Tunisie. Ces actions se sont concentrées sur des environnements topographiquement bas : des estuaires et des lagunes, sensibles aux submersions marines et aux inondations, qui reçoivent du matériel sédimentaire fin provenant du bassin versant en période de crue mais aussi des sables plus grossiers de l'avant côte et du cordon littoral en période de tempête. À partir de l'étude d'archives sédimentaires, il est alors possible de repérer l'alternance des événements extrêmes au cours des derniers milliers d'années. La comparaison de ces archives sédimentaires avec les sources textuelles historiques permet ensuite de confirmer, quantifier, dater et tester la fiabilité et la fréquence de ces événements historiques.

Nos archives montrent que des tempêtes d'une violence exceptionnelle ont eu lieu pour la plupart dans le contexte climatique particulier, des périodes « climatiquement froides » comme le « Petit âge glaciaire » entre le 15^{ème} et 19^{ème} siècles. Elles pourraient être liées à des modifications de circulation atmosphérique induites par le refroidissement qui caractérise cette période. Il est intéressant de noter en effet que les « super tempêtes »

les plus fréquentes coïncident avec les périodes les plus froides d'Europe à l'Holocène.

À ces époques, les zones côtières étaient cependant peu occupées par l'homme, notamment à cause du paludisme. Aujourd'hui, le manque de familiarité avec de tels événements extrêmes a conduit à estimer qu'il est peu probable qu'ils se produisent un jour à l'échelle d'une vie. Cela a conduit à l'élaboration de politiques publiques autorisant la construction de bâtiments à l'intérieur d'une zone potentiellement inondable par des tempêtes. Les derniers siècles ont vu un changement de régime dans les occurrences des tempêtes traversant la côte dans la zone du nord-ouest de la Méditerranée. Si le régime de la seconde moitié du Petit âge glaciaire revenait aujourd'hui, les conséquences seraient dramatiques pour les populations et les infrastructures humaines en zone littorale.

Laurent Dezileau, Maria Snoussi, Nejib Kallel, Otmane Raji, Malika Larara, Angel Perez Ruzafa, Jean-Philippe Degeai, Bernadette Tessier, Pierre Sabatier, Marie-Alexandrine Sicre



Le manque de familiarité avec les événements extrêmes a conduit à estimer qu'il est peu probable qu'ils se produisent un jour à l'échelle d'une vie et donc à élaborer des politiques publiques autorisant la construction de bâtiments à l'intérieur d'une zone potentiellement inondable.

Qendresa : le cyclone de type tropical méditerranéen s'intensifie rapidement et approche de Malte le 7 novembre 2014



PLUIES EXTRÊMES ET CRUES EN MÉDITERRANÉE

Les crues éclair affectent fréquemment les régions méditerranéennes, surtout pendant l'automne. Elles représentent 66 % du coût total des dommages causés par les inondations aux propriétés privées en France. Face à l'augmentation des sinistres liés à ces épisodes, il est crucial de savoir si le changement climatique est susceptible d'aggraver ces phénomènes.

Les épisodes de fortes précipitations observés dans les régions méditerranéennes comptent parmi les phénomènes météorologiques les plus extrêmes en France métropolitaine, avec des cumuls sur 24 h qui dépassent fréquemment les 100 mm. Plusieurs travaux menés dans le cadre du programme HyMeX ont montré une augmentation de l'intensité (c'est à dire le cumul de pluie sur une journée) des pluies extrêmes, en particulier depuis les années 80. On estime la hausse de l'intensité lors de ces épisodes à une valeur située entre +7 % et +39 % sur la période 1961-2015. Cette fourchette d'incertitude traduit la difficulté à quantifier précisément le changement climatique dans les séries observées, du fait de la variabilité naturelle du climat, qui joue de manière particulièrement forte pour les événements extrêmes. Si la plupart des projections futures convergent désormais vers une augmentation probable de l'intensité des pluies extrêmes, elles varient fortement en fonction des régions et des saisons. Des études à des échelles plus fines s'avèrent donc nécessaires.

Comment se traduit cette intensification de pluies extrêmes sur les crues et inondations ? Paradoxalement, on ne retrouve pas de hausse généralisée des épisodes de crues dans le sud de la France. Pour certains bassins méditerranéens en effet, l'augmentation des fortes précipitations est associée à un nombre réduit de jours de pluie et une évapotranspiration plus intense, liée à la hausse des températures. De ce fait, la teneur en eau du sol diminue et le ruissellement également. En revanche, dans des zones urbanisées ou encore sur des sols nus, soumis à l'érosion, des pluies plus intenses peuvent augmenter l'ampleur des inondations. Ainsi l'intensification observée des pluies extrêmes se répercute très différemment selon les bassins versants, en fonction de

leur topographie et des types de sol, avec néanmoins une tendance à la diminution de la fréquence des crues fluviales. Les scénarios futurs sur les crues demeurent donc pour le moment incertains, en particulier pour les plus petits bassins soumis aux crues torrentielles.

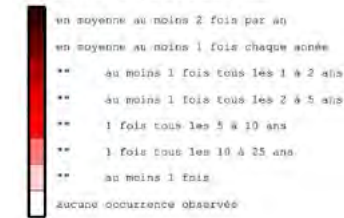
Si l'absence de tendance à la hausse des crues est une bonne nouvelle, elle doit cependant être nuancée en raison d'une vulnérabilité accrue des territoires à ces épisodes. Les régions méditerranéennes ont connu une forte densification de la population et une extension des zones urbanisées dans les dernières décennies, augmentant ainsi l'exposition au risque de crue. La mise en place de systèmes de prévision, d'alerte et de gestion de crise efficaces pour la protection des biens et des personnes, associée à une urbanisation maîtrisée, sont les clefs pour réduire la vulnérabilité des populations aux épisodes de pluies intenses et aux crues qu'elles génèrent.

Yves Tramblay, Aurélien Ribes, Juliette Blanchet, Samuel Somot, Freddy Vinet

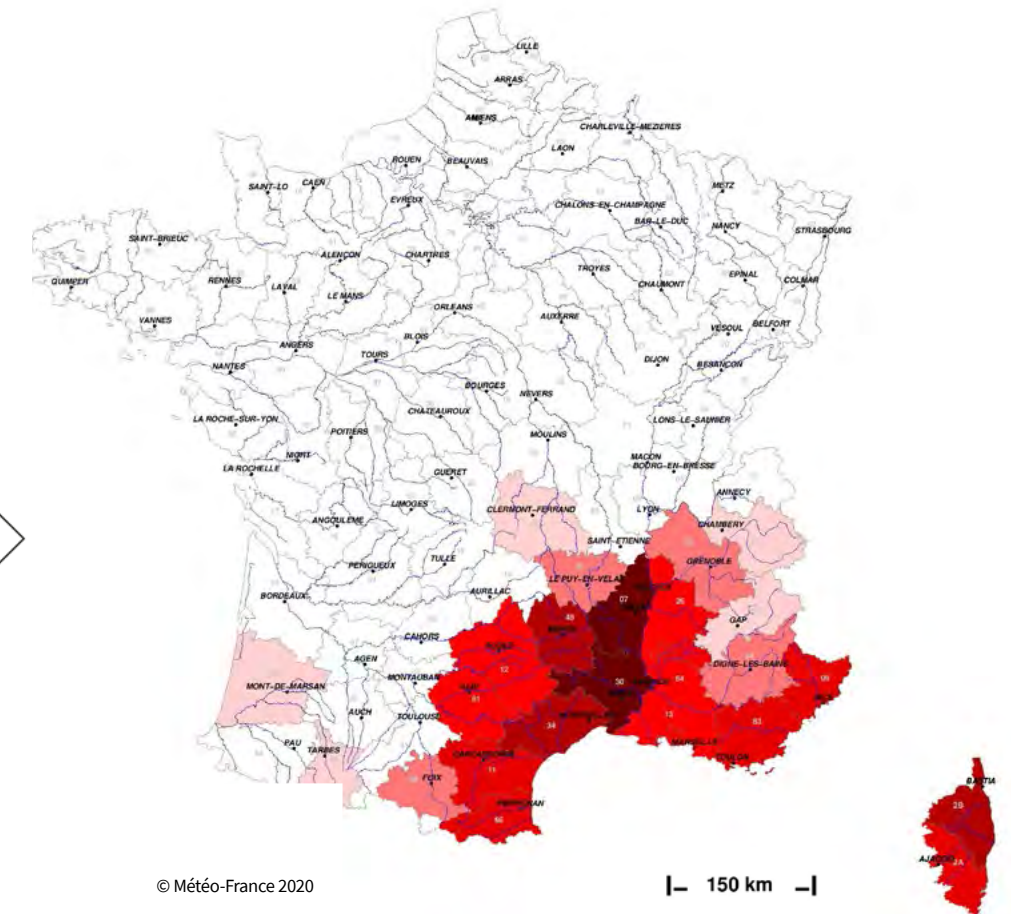


Les épisodes de fortes précipitations observés dans les régions méditerranéennes comptent parmi les phénomènes météorologiques les plus extrêmes en France métropolitaine, avec des cumuls sur 24 heures qui dépassent fréquemment les 100 mm.

Fréquences moyennes d'apparition



Fréquence d'apparition des épisodes avec plus de 200 mm de pluie en une journée sur la période 1970-2019



Inondation d'une rue au cours d'un épisode de fortes précipitations



LE RAPPORT DU RÉSEAU MEDECC TIRE LA SONNETTE D'ALARME !

La région méditerranéenne subit aujourd'hui de nombreuses pressions environnementales qui entrent en résonance et rendent les systèmes naturels, socio-économiques et humains de plus en plus vulnérables. Les politiques de développement durable des pays méditerranéens doivent réduire ces risques, et augmenter la résilience. Afin de faire bénéficier des informations nécessaires aux prises de décision et aux actions à l'ensemble des pays de la région, le réseau d'experts méditerranéens sur les changements climatiques et environnementaux (MedECC) a entrepris de rassembler les connaissances scientifiques dans un premier rapport qui va sortir fin 2020. Ses conclusions nous interpellent sur l'urgence de réponses fortes à une situation qui se dégrade de manière alarmante.

Déjà supérieures de 1,5 °C à celles de l'époque préindustrielle, les températures moyennes annuelles du bassin méditerranéen augmentent plus vite que la température globale. Elles pourraient encore augmenter de 3,8 à 6,5 °C d'ici 2100 si on n'infléchit pas les émissions de gaz à effet de serre, avec comme corolaire, des canicules plus fréquentes, plus intenses, impactant tant la santé que l'alimentation. A titre d'exemple, le blé, un des piliers du régime diététique méditerranéen risque de voir baisser sa productivité de 7,5 % par degré de réchauffement global !

Alors que la demande en eau pourrait accroître de 22 à 74 % d'ici 2100 en raison de l'évolution démographique, de l'augmentation du tourisme de masse et de la demande agricole (jusqu'à 18 %), les précipitations estivales pourraient être réduites de 10 à 30 % dans certaines régions, accentuant les pénuries d'eau existantes et diminuant la productivité agricole. En parallèle, des événements extrêmes plus fréquents et plus intenses, une salinisation des sols, une dégradation des terres et l'émergence d'agents pathogènes affecteront également la production alimentaire terrestre.

Déjà menacée par la surpêche, la production alimentaire marine sera également impactée : réchauffement de la mer (de 1 à 4 °C), acidification, forte pollution de multiples sources, espèces envahissantes Une combinaison de facteurs qui peut affecter la répartition des espèces et déclencher l'extinction locale de plus de 20 %

des poissons et invertébrés marins exploités vers 2050 ! Déjà en chute libre, le poids moyen des prises pourrait continuer à baisser jusqu'à 49 % en 2050 par rapport à 2000. Certaines espèces emblématiques, comme les posidonies et les coralligènes sont très touchées.

Certaines villes sont en danger de submersion à cause de l'augmentation du niveau de la mer (de +6 cm au cours des 20 dernières années à 17 cm sur le dernier siècle). Une tendance qui devrait s'accroître avec des valeurs globales de 43 à 84 cm d'ici 2100 et des différences régionales parfois importantes ... mais surtout avec un risque non négligeable de dépasser le mètre en raison d'une nouvelle déstabilisation de la calotte glaciaire en Antarctique.

L'élaboration de politiques d'adaptation aux changements climatiques et environnementaux en cours et d'atténuation des changements futurs est donc vitale. A ces fins, ce rapport, qui est accompagné d'un résumé pour les décideurs, sera discuté avec les parties prenantes et autorités de la région méditerranéenne.

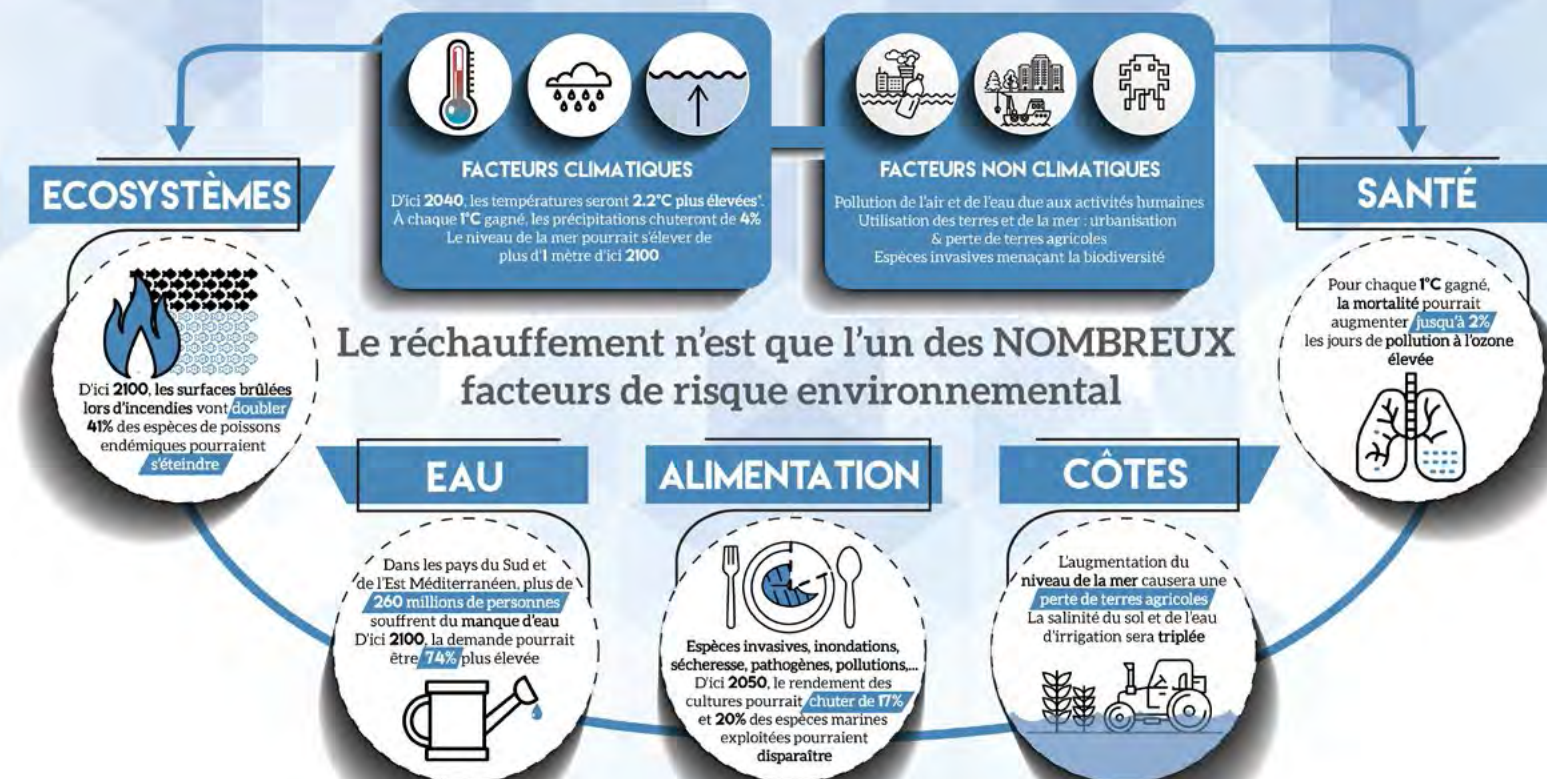
Katarzyna Marini, Joël Guiot, Wolfgang Cramer

Les températures moyennes annuelles du bassin méditerranéen augmentent plus vite que la température globale. Elles pourraient augmenter de 3,8 à 6,5 °C d'ici 2100 si on n'infléchit pas les émissions de gaz à effet de serre.

Mérou badèche, espèce victime de surpêche en Méditerranée



CHANGEMENT ENVIRONNEMENTAL : RISQUES ET IMPACTS SUR LE BASSIN MÉDITERRANÉEN



ÉVOLUTION CLIMATIQUE DES CANICULES OCÉANIQUES

Au cours des dernières décennies, des épisodes anormalement chauds ont été observés dans l'océan avec des impacts écologiques et socio-économiques importants. Ces événements, appelés « canicules océaniques » (ou marine heatwaves en anglais), se superposent au réchauffement climatique de long-terme et peuvent survenir dans les zones côtières ou en pleine mer. Ils entraînent des changements visibles dans les écosystèmes marins et les pêcheries. En Méditerranée, suite aux épisodes de canicules océaniques de 1999, 2003 et 2006, on a ainsi observé de nombreux cas de mortalité massive d'espèces, telles les gorgones ou les posidonies, une plante à fleurs marine présente uniquement en Méditerranée, dont l'écosystème est unique. Par ailleurs, des migrations d'espèces commerciales peuvent également se produire : on sait par exemple que cela a été le cas dans l'Atlantique Nord en ce qui concerne le homard, suite à la canicule de 2012. En modifiant les pratiques de pêche et de récolte, les migrations de homard ont conduit à la faillite d'importantes pêcheries, allant jusqu'à créer des tensions entre les nations.

Bien que la Méditerranée soit identifiée comme une des zones les plus sensibles au réchauffement climatique futur, le cas des canicules océaniques dans cette région a pour le moment été peu décrit. Récemment, des observations satellites de fine échelle, des simulations numériques de l'initiative Med-CORDEX, modèles régionaux de climat à haute résolution et couplés et un algorithme automatique de détection des événements ont été utilisés pour étudier pour la première fois ces événements à l'échelle de l'ensemble du bassin.

Dans le climat actuel, les canicules océaniques de surface en Méditerranée durent, en moyenne, 15 jours avec une intensité moyenne de 0,6 °C au-dessus du seuil et une extension spatiale maximale de la surface de la mer d'environ 40 %. Au cours des dernières décennies, une augmentation significative de la durée, de l'extension spatiale et de l'intensité des canicules océaniques de surface est mise en évidence en Méditerranée. En mer, les canicules des étés 2003, 2012, 2015 et 2017 sont les événements les plus sévères observés au cours de la période étudiée (1982-2017).

D'après les simulations climatiques, cette tendance devrait se poursuivre au cours du 21^{ème} siècle, les événements de canicules océaniques devenant plus longs et plus intenses, quel que soit le scénario d'émission des

gaz à effet retenu. En particulier, dans le scénario du pire (RCP8.5) à la fin du 21^{ème} siècle, les simulations projettent au moins une canicule océanique par an, jusqu'à 4 mois plus longue et 4 fois plus intense que dans le climat actuel (HIST). Leur extension spatiale maximale passerait de 40 % en moyenne aujourd'hui à presque 100 % de la surface de la mer Méditerranée et la canicule océanique observée en 2003 serait alors considérée comme peu sévère sous ce nouveau climat. Seul le scénario RCP2.6, qui est le plus proche des limites définies par les accords de Paris sur le climat, pourrait limiter l'aggravation des canicules océaniques en Méditerranée.

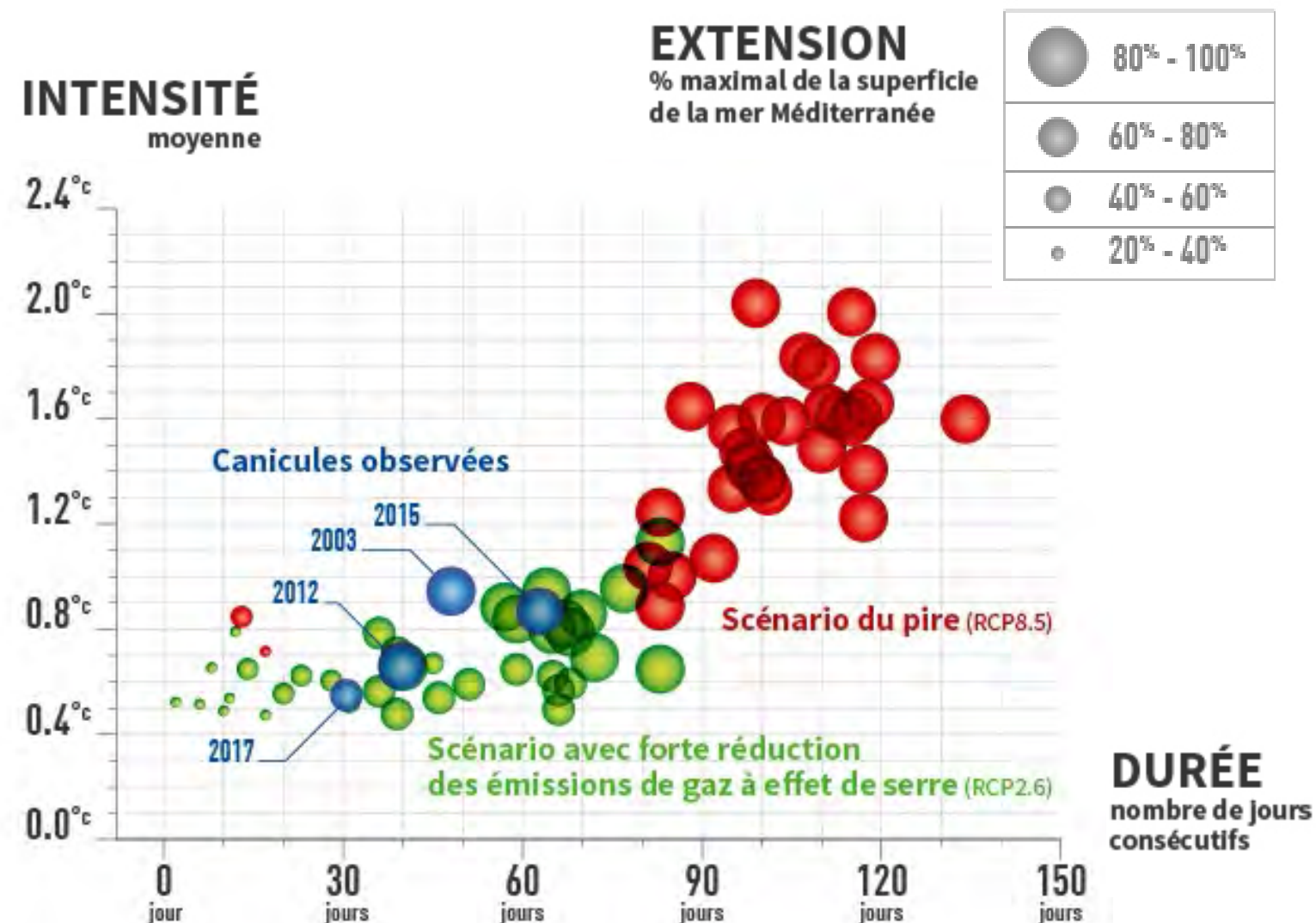
Samuel Somot, Sofia Darmaraki



En Méditerranée, suite aux épisodes de canicules océaniques de 1999, 2003 et 2006, on a observé de nombreux cas de mortalité massive d'espèces.

En haut : Gorgone rouge à un stade avancé de nécrose, avec des restes grisâtres de coenenchyme (partie charnue qui recouvre l'axe squelettique) et l'axe corné totalement nu.

En bas : Intensité, durée et extension spatiale des canicules océaniques en mer Méditerranée à la fin du 21^{ème} siècle (2071-2100). Les canicules océaniques les plus sévères jamais observées sont représentées en bleu, les canicules simulées par le modèle pour le scénario à haute émission de gaz à effet de serre, dit aussi scénario du pire (RCP85), sont en rouge, et celles pour le scénario à basse émission (RCP26), en vert.



LE CIRCUIT 3D DES MASSES D'EAU

Parce que les courants déterminent la distribution de la chaleur, du sel, de l'oxygène, des éléments nutritifs ainsi que des larves, comprendre le circuit 3D des masses d'eau s'avère crucial à plus d'un titre. La Méditerranée, qui fonctionne comme un modèle réduit d'océan, peut nous apprendre beaucoup.

La circulation thermohaline est la circulation océanique engendrée par les différences de densité de l'eau de mer, provenant des écarts de température et de salinité des masses d'eau : sous l'effet des interactions avec l'atmosphère, notamment, l'eau qui est en surface peut devenir plus dense et plonger à des niveaux intermédiaires, voire jusqu'au fond.

En raison de son climat, la Méditerranée perd plus d'eau par évaporation qu'elle n'en reçoit par les précipitations et les fleuves. Sans le fort apport de l'océan, via le détroit de Gibraltar (où il rentre 1 million de m³ d'eau par seconde), le niveau de la Méditerranée baisserait de 0.5 à 1 m par an. On estime à 100 ans en moyenne la période entre le moment où l'eau entre, en surface, à Gibraltar puis y ressort, en profondeur, transformée en eau méditerranéenne par convection (voir figure).

En raison de cette forte évaporation, l'eau résidente en Méditerranée est plus salée, et donc plus dense que celle de l'Atlantique. L'eau Atlantique rentrée le plus récemment reste donc au-dessus, ce qui détermine les courants de surface en Méditerranée. Puis elle se propage vers l'est dans les parties sud, et revient enfin vers l'ouest dans les parties nord, décrivant dans chaque bassin un circuit général dans le sens antihoraire.

Pendant les hivers rudes, les vents continentaux froids et secs refroidissent l'eau de surface dans les parties nord et accroissent sa salinité par évaporation et par mélange avec les eaux intermédiaires salées : sa densité augmente et l'eau coule alors littéralement sur le fond, avec une spécificité méditerranéenne : entre ~200 m et 3000 m de fond la température ne chute pas en deçà de ~13 °C. Autre conséquence, l'eau profonde est très oxygénée, permettant une vie foisonnante au fond de la mer. Les polluants (y compris atmosphériques) y sont malheureusement également très bien transférés.

Heureusement ce mélange profond remet des éléments nutritifs dans la couche de surface, préparant ainsi le printemps (floraison du phytoplancton).

Les campagnes en période hivernale représentent un défi qui a longtemps freiné les recherches sur la formation d'eau profonde, un moteur de la circulation en trois dimensions. Pendant l'hiver 2012-2013, la synergie du programme MISTRALS a permis la réalisation d'une « super-campagne » dans le golfe du Lion. Non seulement des mouillages, des bouées météo, des navires océanographiques¹ et des avions de recherche ont été déployés, mais aussi des plateformes autonomes issues des derniers développements technologiques pour fournir l'extension dans le temps et dans l'espace en temps quasi-réel : bouées dérivant avec le courant de surface, flotteurs-profileurs (ARGO), planeurs sous-marins (« gliders »), capteurs installés sur un navire de commerce, et enfin profileurs de vent installés à terre. Les prévisions météorologiques et océanographiques, avec l'assimilation des observations *in situ* et satellitaires, permettaient enfin d'alerter sur les épisodes de mistral, de déployer dans les zones à échantillonner d'autres outils complémentaires comme les ballons pressurisés, des radiosondages, un avion et un navire dédié. Ainsi notre compréhension de la formation d'eau profonde méditerranéenne et de ses impacts a beaucoup progressé ces dernières années.

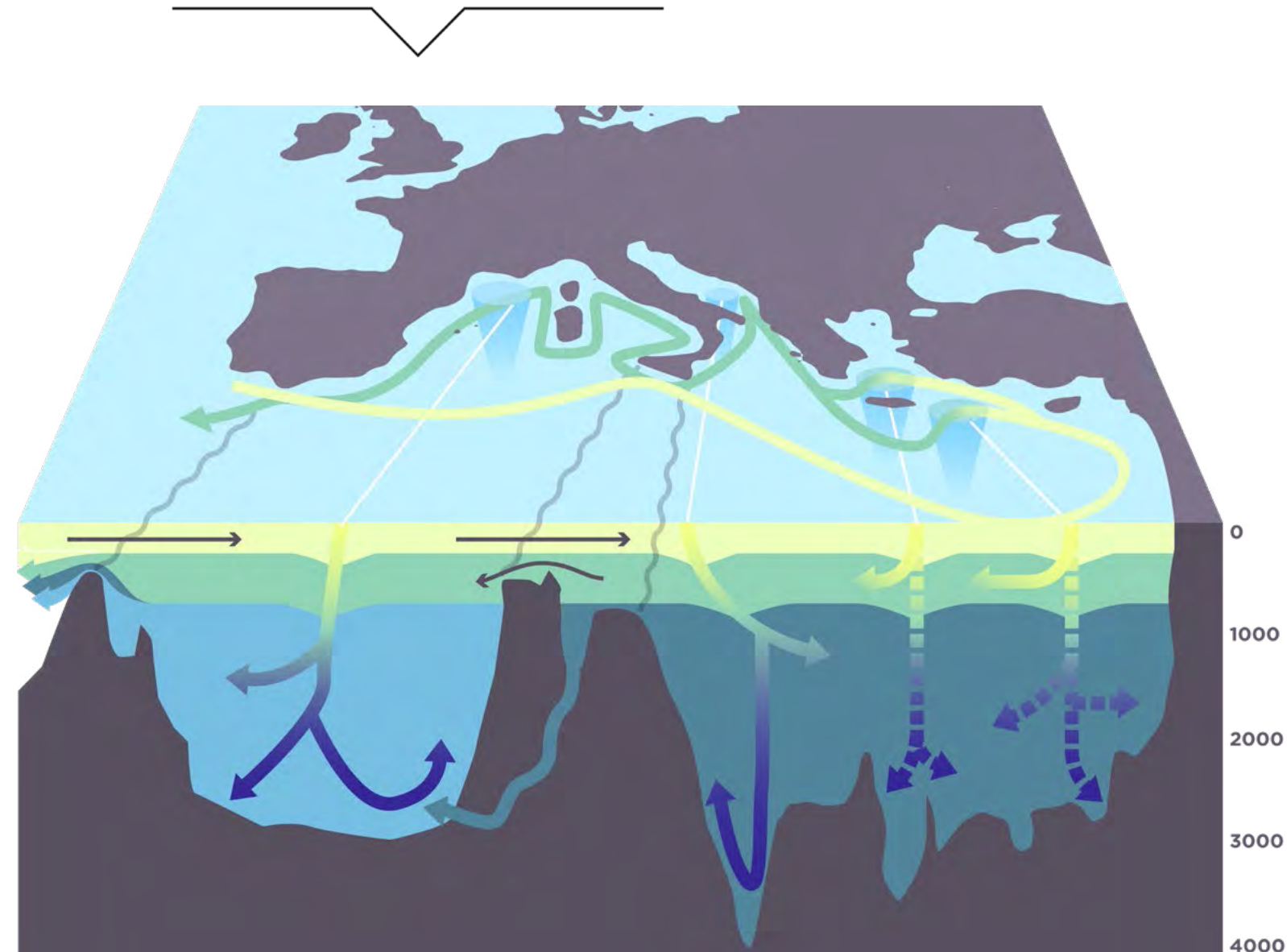
Isabelle Taupier-Letage

¹ Les navires océanographiques étant alloués selon un calendrier fixé un à deux ans à l'avance, un navire a été affrété pour pouvoir échantillonner sur alerte (coup de mistral).



En raison de son climat, la Méditerranée perd plus d'eau par évaporation qu'elle n'en reçoit par les précipitations et les fleuves. Sans le fort apport de l'océan, via le détroit de Gibraltar, le niveau de la Méditerranée baisserait de 0.5 à 1 m par an.

Schéma simplifié du circuit 3D des masses d'eau en Méditerranée. L'eau de surface d'origine atlantique est figurée en jaune, les eaux intermédiaires formées dans le Bassin Oriental en vert, et les eaux profondes résultant de la convection en bleus (en pointillés dans le Bassin Oriental car plus épisodiques).



DES ÉCOSYSTÈMES MILLÉNAIRES CONSTRUITS AVEC LE FEU

On ignore souvent que la biodiversité méditerranéenne a fortement évolué depuis le début de l'occupation humaine, et cela, en partie au moins, en lien avec les feux utilisés dans les pratiques agro-pastorales. Aussi notre perception des feux de forêt, alimentée par les images effrayantes de méga-feux, n'a pas toujours été négative.

Nos données sur les régimes de feux, c'est-à-dire leur fréquence, intensité, saisonnalité et leurs facteurs de contrôle, couvrent une période de temps courte relativement à l'échelle des processus. Dans le cadre du projet PaleoMex du programme MISTRALS, qui s'intéresse aux interactions passées entre climat, environnement et sociétés, plusieurs reconstructions et analyses des régimes de feux holocènes (entre 11 000 et 8 000 ans avant aujourd'hui) en région méditerranéenne ont été réalisées, notamment grâce à la quantification et à la caractérisation des microparticules de charbons de bois produites par les feux, et conservées dans les sédiments qui se déposent dans les lacs et tourbières. Ces archives sédimentaires permettent, en complément des régimes de feux, de documenter l'histoire de la végétation, du climat et des occupations humaines qui interagissent avec ces feux.

Au début de l'Holocène, les conditions climatiques, liées aux paramètres orbitaux de la Terre, ont alimenté des incendies de grande ampleur, en particulier dans les pinèdes du pourtour du bassin méditerranéen. Si, il y a 7 000 ans environ, grâce à un climat plus humide, les incendies deviennent beaucoup moins fréquents et plus localisés, les activités humaines altèrent cette évolution naturelle dès le Néolithique (entre 9 000 à 6000 ans avant aujourd'hui). L'Homme ayant appris à cultiver, il utilise alors le feu pour gagner des terres sur la forêt afin de se nourrir. Cette première étape dans l'ouverture de la couverture végétale a entraîné dans un premier temps une augmentation de la diversité végétale dans la chênaie autour des premiers établissements agricoles. Entre 4 000 à 2 000 ans environ, la transformation des paysages se généralise jusqu'à s'intensifier avec l'Empire Romain. Les pratiques agro-pastorales, incluant l'usage répété du feu, conduisent alors à des transitions

irréversibles dans les écosystèmes caractérisées notamment par une diversification des espèces des milieux ouverts, une diminution de la biodiversité forestière et de la richesse végétale à l'échelle régionale. Les feux agro-pastoraux jouent alors un rôle primordial, en limitant l'accumulation de combustible et donc la propagation de feux incontrôlables. Le brûlage dirigé peut être aussi utilisé pour créer une perturbation intermédiaire régénératrice de la dynamique écologique.

Comparée aux valeurs des six millénaires précédents, la durée de la saison de feux a considérablement augmenté au cours des dernières décennies, alors qu'en même temps les étés sont devenus beaucoup plus chauds. Les valeurs s'avèrent à présent comparables à celles du début de l'Holocène. Le bassin méditerranéen est donc confronté à une accumulation des facteurs de risque de feux inédite dans son histoire : réchauffement climatique, abandon des terres, accumulation de combustible et superposition des espaces forestiers avec les activités et aménagements anthropiques favorisant le déclenchement de feux non souhaités et destructeurs. Les politiques de gestion du risque auraient tout à gagner à prendre en compte les pratiques millénaires.

Boris Vannière

Feu de forêt de nuit, 2007



Comparée aux valeurs des six millénaires précédents, la durée de la saison de feux a considérablement augmenté au cours des dernières décennies, alors qu'en même temps les étés sont devenus beaucoup plus chauds.



VIVRE SUR LES COLLINES MÉDITERRANÉENNES AU TEMPS DE LA SÈCHERESSE

Le site archéologique de Case Bastione, proche de Enna - au centre de la Sicile sur les monts Erei, à 610 mètres au-dessus du niveau de la mer - est situé au pied d'une falaise dans un environnement privilégié proche d'un lac et de cours d'eau. À la faveur de sa position entre terre et mer, son occupation préhistorique remonte à la fin de l'Âge du Cuivre/début de l'Âge du Bronze (fin du 3^{ème} millénaire av. J.-C.). Les archéologues évaluent la présence d'un village d'environ 2 hectares, caractérisé par des structures de cabanes avec des bases en pierre, de nombreux poteaux en bois et des parois en matériaux végétaux recouverts de torchis. Plusieurs structures de combustion, au moins en partie utilisées pour griller les céréales, y sont décrites.

Les fouilles archéologiques, réalisées stratigraphiquement, visaient une reconstruction la plus détaillée possible de l'environnement dans lequel ces communautés humaines vivaient et interagissaient. L'analyse des sols a mis en évidence des restes de charbon de bois et graines, témoins de l'exploitation des ressources végétales et de l'économie du village par les préhistoriques. La principale ressource forestière utilisée est le bois de chênes caducifoliés (*Quercus virgiliana*), qui dominaient le paysage. Les restes ostéologiques étudiés apportent la preuve d'une activité humaine tournée vers l'exploitation de la faune forestière accompagnant la consommation d'une faune domestiquée (caprins et bovins). Plusieurs espèces et variétés de céréales et légumineuses complètent la diète.

Les restes botaniques comme les graines ont fait l'objet d'analyses isotopiques permettant de reconstituer les conditions d'aridité auxquelles ont été soumises les cultures. En accord avec les reconstructions paléoclimatiques fournies par l'analyse des pollens déposées dans le lac de Pergusa non loin de Case Bastione et d'autres enregistrements en Méditerranée, il apparaît qu'autour de cette phase, la Méditerranée centrale a traversé une période d'aridité. Toutefois, même si les résultats de Case Bastione montrent un changement climatique entre 4500 et 4200 ans, celui-ci n'a cependant pas beaucoup

influencé les conditions environnementales du territoire autour du site. En considérant la démographie de l'île à la fin du 3^{ème} millénaire, nous pouvons envisager que les communautés humaines ont fait le choix de se déplacer des côtes vers des environnements moins affectés par ces changements, et mieux adaptés pour l'agriculture.

Le paysage de la Sicile centrale du 21^{ème} siècle (malgré les activités humaines depuis les débuts de la mécanisation, il y a plus d'un siècle, qui se sont traduits par la perte du patrimoine sylvicole) est mieux conservé et moins érodé que les territoires côtiers. Il ressort de notre étude sur l'histoire environnementale de Case Bastione que le statut de cet écosystème multimillénaire des monts Erei doit être repensé, réhabilité et reconnu comme un centre de biodiversité agro-pastoral, un patrimoine à conserver pour les générations futures. Dans le contexte des changements globaux, la vulnérabilité des îles de la Méditerranée pourrait être réduite en s'inspirant des pratiques multimillénaires (économie locale avec la culture des céréales et légumineuses, utilisation du bois d'espèces endémiques et des ressources naturelles en eau).

Claudia Speciale

Vue du paysage actuel de Case Bastione depuis Monte Gaspa



Dans le contexte des changements globaux, la vulnérabilité des îles de la Méditerranée pourrait être réduite en s'inspirant des pratiques multimillénaires.



POLLEN ET SÉCHERESSE : VERS UN RÉSEAU DE SURVEILLANCE

Les modèles climatiques du GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) prédisent une augmentation de la sécheresse en Méditerranée avec pour conséquence un impact majeur sur les écosystèmes comme sur les sociétés. La région méditerranéenne est considérée comme un hot-spot de biodiversité, hautement sensible au changement climatique. Son climat présente des caractéristiques particulières avec sa saison sèche et chaude pendant 2 à 8 mois et ses hivers doux, les précipitations intervenant aux intersaisons et en hiver. La végétation méditerranéenne est composée d'une mosaïque de types de végétation qui constitue la forêt méditerranéenne et ses dérivés dégradés comme la garrigue ou le maquis. Elle réunit, selon les régions et les altitudes, différentes espèces emblématiques : des arbres tels que le chêne vert, le chêne liège, le pin et l'olivier dont l'extension géographique a longtemps été choisie pour définir l'aire du climat méditerranéen, ainsi que des arbustes ou buissons tels que le pistachier, la bruyère arborescente, l'arbusier, la filaire ou la lavande. Au cours de son histoire, la forêt méditerranéenne s'est modifiée sous l'effet de sécheresses de plus en plus fréquentes, de plus en plus longues et intenses, mais aussi de sa transformation par l'homme. Son observation doit s'intensifier afin d'évaluer précisément la réponse de ces socio-écosystèmes et la modéliser pour mener une politique de gestion durable.

Les changements de végétation, et plus particulièrement de la production pollinique, dépendent principalement de la température et des précipitations (saisonniers et annuels). La palynologie (étude des grains de pollen) fournit une image de la végétation d'un site à un moment donné, les grains de pollen étant caractéristiques d'une famille, d'un genre voire d'une espèce de plante. Le changement climatique induit des modifications de la végétation qui se traduisent par des variations de composition de la pluie pollinique émise par celle-ci.

Dans le cadre d'une collaboration au sein de MISTRALS, entre les programmes PaleoMex et BiodivMex, et du réseau Polarise, des suivis polliniques mensuels et annuels ont donc été mis en place sur des sites observatoires et/ou Natura 2000 de plusieurs pays méditerranéens pour analyser la réponse de la végétation méditerranéenne, et en particulier celle de ses éléments emblématiques tels que le chêne vert, l'olivier ou la vigne (sauvage ou cultivée). Les grains de pollen sont collectés dans des pièges à pollen et analysés pour

détecter les changements de la composition de la pluie pollinique en fonction des paramètres environnementaux, en particulier de la sécheresse. En parallèle, la composition de la pluie pollinique passée est analysée sur plusieurs sites pour tenter de mettre en évidence des marqueurs de la résistance, de la dégradation ou de la résilience de certaines espèces qui pourraient servir d'indicateurs d'alerte. Les grains de pollen sont, dans ce cas, étudiés dans des sédiments prélevés lors de carottages, marins ou lacustres, puis comptés afin de repérer des périodes clé de son histoire. Ainsi la palynologie a révélé la presque totale disparition de la forêt méditerranéenne lors d'épisodes très secs du passé. Les données en cours d'acquisition permettront de documenter et d'interpréter l'évolution de la biodiversité face à la sécheresse (trajectoires, points de ruptures, etc...) au cours des derniers siècles à millénaires.

Nathalie Combourieu-Nebout, Odile Peyron, Marie-Alexandrine Sicre, Yildiz Aumeeruddy-Thomas, Virginie Baldy



La palynologie (étude des grains de pollen) a révélé la presque totale disparition de la forêt méditerranéenne lors d'épisodes très secs du passé.

Culture de l'olivier sur l'île de Pantelleria qui s'est adapté à la sécheresse et au climat venteux



SOCIÉTÉS DU PASSÉ ET CHANGEMENTS CLIMATIQUES

Les nombreuses recherches sur le rôle du changement climatique dans les transformations des sociétés du passé ont été stimulées par les changements contemporains. On sait que l'Holocène a connu des oscillations climatiques secondaires, dont certaines ont duré plusieurs siècles, s'expliquant par des changements régionaux relativement complexes en réponse à des changements d'échelle planétaire. Par ailleurs, les brillantes civilisations qui se sont succédées dans l'espace méditerranéen ont connu des fins souvent difficiles à expliquer. La tentation est donc de lier changement climatique et vulnérabilité des sociétés méditerranéennes passées.

C'est dans l'objectif d'examiner cette hypothèse que les participants du projet PaleoMex du programme MISTRALS ont cherché, d'une part, à détecter les conséquences environnementales des changements climatiques à l'échelle des lieux de vie des populations du passé et, d'autre part, à déterminer comment un changement climatique rapide, à l'échelle géologique, peut produire un changement social comme une transformation du peuplement ou la fin d'une civilisation. À partir des archives sédimentaires disponibles (sédiments des plaines alluviales et littorales, des lacs, des tourbières) et en particulier les bioindicateurs qu'elles contiennent (grains de pollen, algues, champignons, microparticules carbonneuses, etc.), ils ont pu effectuer des recherches géoarchéologiques (qui ont pour but de restituer et de comprendre les changements de l'environnement autour des sites archéologiques) et paléoenvironnementales, à la fois au plus près des sites archéologiques et à l'échelle régionale.

Deux exemples permettent de mettre en exergue les résultats obtenus. Au 4^{ème} millénaire ANE, le changement climatique intervient alors qu'une grande partie de l'Égée connaît une baisse spectaculaire du nombre de sites archéologiques, à tel point que l'on parle de «millénaire perdu». Pourtant, au nord de l'Égée, la continuité de l'activité agricole et pastorale n'est pas remise en question par des changements hydrologiques importants. La période semble plutôt marquée par une transformation de l'organisation du peuplement qui accompagne des mutations de la production matérielle (céramique, bijoux, etc.). Si le changement climatique a eu des conséquences environnementales, il n'a donc pas profondément modifié les ressources exploitées par les sociétés de la fin du Néolithique et du début de l'âge du

Bronze. Une observation du même ordre peut être faite un peu plus tard en Anatolie. Une nette aridification du climat est contemporaine de la fin silencieuse de l'Empire Hittite vers 1200 ANE. Pourtant, le système agricole complexe et performant qui associe des ressources variées (fruits, céréales, olives, vigne, élevage, ...) va perdurer bien au-delà de la fin de l'âge du Bronze. Le changement politique est bien contemporain du changement climatique mais le mode de production agricole est résilient. Il faut donc chercher ailleurs les explications sur la fin de l'Empire Hittite.

Ces recherches montrent la complexité des liens entre changements climatiques et socio-économiques et invitent à quitter le paradigme de l'effondrement. Pour envisager la complexité des interactions entre société et climat, le concept de transformations socio-environnementales permettrait de décrire avec précision, de l'échelle locale à l'échelle régionale, les liens qui se nouent entre les sociétés et leur environnement à une époque donnée. Il permettrait également de mieux analyser la capacité des sociétés à se transformer face au changement climatique. Ce concept semble donc primordial pour comprendre l'impact du climat sur les sociétés, aujourd'hui comme hier.

Laurent Lespez



Pour envisager la complexité des interactions entre société et climat, le concept de transformations socio-environnementales permettrait de décrire avec précision, de l'échelle locale à l'échelle régionale, les liens qui se nouent entre les sociétés et leur environnement à une époque donnée.

Paysage de maquis et de plaine littorale cultivée en Grèce du nord



LES CHAUVES-SOURIS, SENTINELLES DES CHANGEMENTS

Bien que souvent mal aimées des populations, les chauves-souris s'avèrent être un allier précieux des paléoclimatologues et paléoécologues grâce à leurs déjections. Leur guano est en effet une archive intéressante, en particulier en ce qui concerne le bassin méditerranéen, où diverses espèces prolifèrent. À l'aide de carottages dans les tas de guano parfois impressionnants situés dans les grottes, on peut reconstruire les conditions environnementales et climatiques passées. Mais si l'analyse des isotopes stables (carbone, azote, soufre, oxygène, hydrogène comme indicateurs d'écologie et climat) des guano et poils des chauve-souris permet en théorie d'accéder à ces connaissances, d'un point de vue pratique, il faut d'abord connaître les sources d'alimentation des chiroptères (chauve-souris), et notamment leur consommation d'insectes pour mener à bien ce travail.

Les chiroptères sont une composante majeure de la biodiversité. Ils régulent les populations d'arthropodes, la dispersion des graines et la pollinisation. En Europe, les chauves-souris sont insectivores, consommant jusqu'à 70 % de leur poids en insecte par nuit, un vrai insecticide naturel ! Leur « valeur économique » dans l'agriculture et la sylviculture est estimée à plusieurs milliards de dollars US/an. Ce service qu'elles rendent à l'Homme est cependant fragilisé puisque 25 % des espèces sont menacées ou quasi-menacées d'extinction dans le monde. Plusieurs facteurs comme l'intensification agricole, ou le stress hydrique sont à l'origine de ce déclin, qui risque de s'accélérer.

Une campagne d'échantillonnage a démarré en 2018. Une bâche étendue sous la toiture d'une magnanerie du Parc national des Cévennes (PNC) a permis de collecter mensuellement le guano de *Rhinolophus hipposideros*. Par ailleurs, des poils de cinq espèces de chiroptères au PNC¹ et de deux espèces en Sicile² ont été prélevés. Les premières données montrent des différences de régimes alimentaires entre les espèces : celles consommant des insectes terrestres³, des araignées et diptères dans les milieux les plus humides⁴ ou des insectes aquatiques comme les diptères⁵. Par ailleurs, des changements saisonniers importants sont parfois repérés. Ils pourraient être dus à des variations physiologiques tout le long de la chaîne alimentaire (arbre-insecte-chiroptères).

Grâce à ces données, on peut mieux interpréter les isotopes mesurés sur les carottes de guano des grottes de Sicile datées au carbone 14 et aux isotopes du plomb.

L'identification des restes d'insectes permettra aussi de compléter les reconstructions des variations du régime alimentaire des chauves-souris, des paysages et des climats au cours du temps. L'étude des chiroptères, sentinelles des changements du climat et des paysages méditerranéens d'hier, d'aujourd'hui et de demain, nécessite la mise en place d'un observatoire méditerranéen dédié aux relations chiroptères-insectes-végétation.

Ilhem Bentaleb

¹ *Myotis daubentonii*, *M. emarginatus*, *M. nattereri*, *R. hipposideros* et *R. ferrumequinum*

² *M. myotis* & *Miniopterus schreibersii*

³ *R. ferrumequinum*, *M. nattereri*

⁴ *M. emarginatus*

⁵ *R. hipposideros* et *M. daubentonii*



En Europe, les chauves-souris consomment jusqu'à 70 % de leur poids en insecte par nuit, un vrai insecticide naturel ! Ce service qu'elles rendent à l'Homme est cependant fragilisé puisque 25 % des espèces sont menacées ou quasi-menacées d'extinction dans le monde.



© Matteo De Stefano / MUSE



Rhinolophus ferrumequinum ou Grand rhinolophe

Rhinolophus hipposideros, ou petits rhinolophes, perchés sous les escaliers d'un clocher d'église



© Jessicaljil / Flickr

LES OASIS MÉDITERRANÉENES

Entretenues par les sociétés du Sahara et d'Arabie parfois depuis des millénaires, les oasis doivent certainement autant leur existence au réseau d'échange qui existe entre elles que ce réseau doit son existence aux oasis. Les oasis ne sont pas des objets géographiques périphériques, mais des nœuds d'un réseau insulaire qui a été l'architecture de grands royaumes ou organisations politiques. On peut même se demander si la condition de l'échange, y compris par-delà le désert, n'est pas en fait la raison d'être des oasis. Elle structure en effet leur organisation, leur économie et... également leur agrobiodiversité.

Le palmier dattier (*Phoenix dactylifera* L.) est l'objet d'une importante culture fruitière dans les régions désertiques. Cette plante a été domestiquée il y a environ 7 000 ans au Proche-Orient et probablement ensuite diffusée vers l'Afrique du Nord. De l'Arabie au Sahara, cette espèce est principalement cultivée dans les oasis : c'est la plante-clef des agroécosystèmes oasiens. Les dattiers et ses nombreuses variétés sélectionnées par des générations d'agriculteurs permettent la culture sous-jacente d'un étage d'arbres fruitiers et, à leur ombre, d'un autre étage de plantes potagères, céréalières et fourragères. Le dattier fournit bien sûr avec ses dattes une vraie ressource alimentaire, mais aussi de nombreux matériaux d'artisanat et de construction. Des études génétiques menées récemment indiquent que les palmiers dattiers du nord de l'Afrique sont issus de l'hybridation entre les dattiers du Moyen-Orient et le palmier de Crète (*Phoenix theophrasti* Greuter), espèce relictuelle du nord-est de la Méditerranée. Plus précisément, il y aurait une part plus importante de l'ADN du dattier de Crète dans les dattiers de l'ancienne oasis Siwa, siège de l'oracle d'Amon. Celle-ci, située dans le désert Libyque, a connu une forte influence grecque.

D'une qualité reconnue depuis l'Antiquité, les dattiers de cette oasis berbérophone se voient singularisés par une probable hybridation méditerranéenne. Grâce au programme BioDivMeX Mistrals, un important travail de terrain permet d'affirmer que ce sont en particulier ceux des palmiers dattiers qui croissent dans des palmeraies abandonnées depuis l'époque ptolémaïque

qui partagent une plus grande part de leur ADN avec le palmier de Crète. La compréhension des origines de cette singularité devrait permettre, à terme, de mieux comprendre les échanges entre Orient et Occident, mais aussi entre le Nord et le Sud de la Méditerranée au cours de l'Antiquité. On peut se demander si l'insularité maritime méditerranéenne du *mare nostrum* n'aurait finalement pas son pendant dans ce *desertum nostrum* qu'est le Sahara !

Vincent Battesti, Muriel Gros-Balthazard



Dans les régions désertiques, les dattiers et ses nombreuses variétés sélectionnées par des générations d'agriculteurs permettent la culture sous-jacente d'un étage d'arbres fruitiers, et, à leur ombre, d'un autre étage de plantes potagères, céréalières et fourragères.

Sur les marges de la palmeraie de Maraqi dans l'oasis de Siwa (désert Libyque, en Égypte) au moment de la récolte d'un palmier dattier isolé, le 6 novembre 2015



SINJAJEVINA, UN SOCIO-ÉCOSYSTÈME MILLÉNAIRE

En termes agronomiques, les communs pastoraux de la haute montagne méditerranéenne impliquent généralement la mise en défens¹ totale ou partielle d'un espace ou d'une ressource pastorale durant une période déterminée du printemps. Cette pratique est répandue pratiquement dans toutes les montagnes de la Méditerranée. Accordée par une assemblée d'éleveurs, elle permet le repos de la végétation dans des moments spécialement sensibles (e.g. croissance des plantes, floraison, production des grains, etc.), de maximiser la production fourragère et d'assurer sa continuité année après année. Sur le plan écologique, elle a comme résultats le maintien d'une couverture végétale plus dense et des sols mieux conservés que les espaces d'accès ouvert non gérés communautairement. La biodiversité est souvent aussi plus importante dans ces communs que dans des zones homologues sans gestion communautaire. En conséquence, même s'il est moins intégré dans les politiques nationales, le concept des communs est désormais inclus dans les décisions politiques et les initiatives des organisations non gouvernementales, telles la CDB², l'UICN³, le PNUD⁴, et le PNUE⁵.

Une recherche, menée depuis 2018 sur les montagnes de Sinjajevina-Durmitor au Monténégro et soutenue par BioDiVmeX, a permis de découvrir le pâturage de montagne géré communautairement. C'est le plus grand des Balkans et le deuxième d'Europe. Ce plateau calcaire de plus de 1 000 km², situé à environ 1 600 à 2 200 m d'altitude, abrite un important patrimoine culturel et une importante biodiversité qui ont motivé de nombreuses mesures et initiatives de protection. Mais la riche diversité bio-culturelle de Sinjajevina n'est pas seulement le produit d'un hasard : elle est le fruit d'une symbiose recherchée entre écologie et société. En effet, cette étude a permis de découvrir que Sinjajevina est un patrimoine socio-écologique partagé par plus de 250 familles d'éleveurs et 8 tribus monténégrines, hérité d'un passé pastoral plusieurs fois millénaire, où écosystèmes pastoraux et sociétés pastorales ne sauraient plus exister l'un sans l'autre. Il s'agit d'une synthèse entre la nature et des générations de pasteurs qui, à travers leurs logiques tribales séculaires, ont gouverné ce territoire en établissant des modes de gestion et des usages cherchant à façonner des écosystèmes d'une façon très concrète convenant à leurs économies d'élevage (e.g. des milieux ouverts, favorisant ou défavorisant les différentes espèces en fonction de l'ouverture des espaces au pâturage, ou encore l'utilisation du feu, etc.). À leur

tour, ces sociétés ont dû s'adapter aux conditions rudes du terrain. Avec pour résultat un système co-adaptatif, où des nombreuses espèces propres à ces espaces ne peuvent plus exister sans l'activité pastorale et sans lesquelles l'activité pastorale ne peut plus exister. En septembre 2019, le gouvernement monténégrin a inauguré un camp d'entraînement militaire et de bombardement de 7 500 ha au cœur de ces pâturages habités, pouvant affecter irrémédiablement la continuité de l'activité pastorale. Cette décision devrait porter un coup fatal à ces écosystèmes uniques, pourtant construits à travers les millénaires d'action humaine et qui dépendent toujours, aujourd'hui, de la présence soutenue du pastoralisme.

Pablo Dominguez

¹ La « mise en défens » d'une parcelle ou d'une partie de parcelle est l'installation de clôtures, assortie de l'interdiction de pénétrer

² Convention sur la diversité biologique

³ Union internationale pour la conservation de la nature

⁴ Programme des Nations unies pour le développement

⁵ Programme des Nations unies pour l'environnement



Le pâturage de montagne Sinjajevina est un patrimoine socio-écologique partagé par plus de 250 familles d'éleveurs et 8 tribus monténégrines, hérité d'un passé pastoral plusieurs fois millénaire, où écosystèmes pastoraux et sociétés pastorales ne sauraient plus exister l'un sans l'autre.

Troupeau de moutons au katun (quartier pastoral) d'Okrugljak, devant l'église du Rosaire



Messe du 2 août, jour de la Saint Élie, protecteur des bergers, devant l'église du Rosaire à plus de 1 800 m, au cœur des pâturages d'altitude de Sinjajevina. Portée par le patriarche de l'église orthodoxe serbe au Monténégro, cette messe est tenue pour protester le plan de militarisation de ce territoire habité.



CARESSE D'ÉPONGE, CARESSE DOUCE-AMÈRE

Les éponges sont des animaux aquatiques possédant un système aquifère parfois sophistiqué qui en fait de puissants filtres de particules en suspension dans la colonne d'eau. Parmi les 9000 espèces connues, une quinzaine d'éponges « de bain », appartenant à la famille *Spongiidae*, sont exploitées à travers le monde pour la qualité de leur squelette en fibres de spongine. Ce squelette organique leur confère finesse, douceur et des qualités absorbantes qui ont suscité dès l'Antiquité leur pêche en Méditerranée. Elle se poursuit aujourd'hui encore en mer Égée, dans le golfe de Gabès, autour des îles Lampedusa et Pantelleria, ou encore sur les côtes septentrionales de la mer Adriatique.

Cette pêche pluriséculaire a vécu son dernier « âge d'or » après la Seconde Guerre mondiale, puis elle est entrée en récession brutale dans le dernier tiers du XX^{ème} siècle. Le programme interdisciplinaire SACOLEVE s'est attaché à analyser les changements qui ont affecté cette activité halieutique entre les XVIII^{ème} et XXI^{ème} siècles. L'originalité de la démarche résidait dans le croisement des statistiques de pêche, des sources historiques et des connaissances de la biologie des éponges.

Longtemps tributaires de techniques ancestrales (harpon, apnée), les pêcheurs d'éponge ont été confrontés à une mutation radicale de leur pratique au cours du XIX^{ème} siècle : la diffusion du scaphandre et la généralisation, jusqu'aux années 1950, du chalutage ont transformé profondément les sociétés insulaires, soumises à un processus de prolétarianisation et de vives tensions politiques. La pratique de la plongée en scaphandre a également engendré une cruelle crise sanitaire : des accidents de décompression ont provoqué un nombre important de paralysies et une surmortalité sans précédent dans le monde de la pêche. Néanmoins, les tonnages de pêche, dopés par la forte demande des sociétés occidentales, atteignent des sommets à la fin du XIX^{ème} siècle, puis au milieu du XX^{ème} siècle. Le déclin rapide de cette activité, après 1950, résulte d'interactions complexes faisant se succéder, en mer Égée, un processus de surpêche, puis un abandon du métier par une majorité de pêcheurs. Dans les années 1980, les espèces ciblées se raréfient, victimes de maladies et dans certains cas de mortalités massives liées aux premières manifestations du changement climatique. Ces épisodes catastrophiques se feront plus fréquents, la combinaison des effets négatifs d'un changement régional s'ajoutant aux conséquences du triomphe de l'éponge de synthèse produite par

l'industrie, et aux résultats des bouleversements géopolitiques dans les pays du sud de la Méditerranée.

Pourtant, les pêcheurs d'aujourd'hui ne jettent pas l'éponge. Leur savoir-faire irremplaçable et leur adaptabilité par le maintien d'une grande diversité de pratiques et d'une certaine mobilité régionale permettent de profiter de la reconstitution parfois spectaculaire de certains bancs spongifères. Ainsi, une résilience semble possible, pour peu que l'on préserve les flottilles de pêcheurs aux petits métiers de Méditerranée. À l'heure où l'éponge de bain révèle de nouvelles propriétés pharmaceutiques, il apparaît qu'une bonne gestion de cette ressource doit passer par un suivi précis de tous les compartiments du socio-écosystème qui l'entoure.

Thierry Perez, Daniel Faget



Parmi les 9000 espèces connues, une quinzaine d'éponges « de bain », appartenant à la famille *Spongiidae*, sont exploitées à travers le monde pour les qualités de leur squelette en fibres de spongine, qualités qui ont suscité dès l'Antiquité leur pêche en Méditerranée.

En haut : Éponge fine *Spongia officinalis* dans son milieu naturel

En bas : Pêcheur d'aujourd'hui, utilisant un scaphandre autonome recycleur



© Thierry Pérez, CNRS



© Thierry Pérez, CNRS

AUTEURS

A

Oula Amrouni - Université de Carthage, Institut national des sciences et technologies de la mer, Laboratoire de Milieu Marin, Tunisie

Yildiz Aumeeruddy-Thomas - CNRS (CEFE)

B

Virginie Baldy - Aix Marseille Université (IMBE)

Vincent Battesti - CNRS (EAE)

Ilhem Bentaleb - Université de Montpellier (IUEM)

Juliette Blanchet - CNRS (IGE)

Gilles Boulet - IRD (CESBIO)

C

Hedia Chakroun - MTI, Université Cadi Ayyad, École nationale des sciences appliquées, Maroc

Nathalie Combourieu-Nebout - CNRS (HNHP)

Wolfgang Cramer - CNRS (IMBE)

D

Sofia Darmaraki - Université de Dalhousie, Canada

Jean-Philippe Degeai - CNRS (Labex Archimède)

Laurent Dezileau - Université de Caen (MC2)

Pablo Dominguez - CNRS (GEODE)

Eric Douville - CEA (LSCE)

E

Jamal Ezzahar - Université Cadi Ayyad, École nationale des sciences appliquées / Université Mohamed VI Polytechnique, CRSA, Maroc

F

Daniel Faget - Aix-Marseille Université (TELEMME)

Younes Fakir - Université Cadi Ayyad, Faculté des sciences Semlalia / Université Mohamed VI Polytechnique, CRSA, Maroc

Ghaleb Faour - Centre national de la télédétection, Liban

G

Muriel Gros-Balthazard - Université de New York Abu Dhabi, Émirats Arabes Unis

Joël Guiot - CNRS (CEREGE)

H

Lahoucine Hanich - Université Cadi Ayyad, Faculté des sciences et techniques / Université Mohamed VI Polytechnique, CRSA, Maroc

J

Lionel Jarlan - IRD (CESBIO)

K

Nejib Kallel - Université de Sfax, Laboratoire géoressources, matériaux, environnements et changements globaux, Tunisie

Said Khabba - Université Cadi Ayyad, Faculté des sciences Semlalia, LMFE / Université Mohamed VI Polytechnique, CRSA, Maroc

L

Malika Larara - Université des sciences et de la technologie Houari Boumediene, Algérie

Valérie Le Dantec - Université Toulouse - Paul Sabatier (CESBIO)

Michel Le Page - IRD (CESBIO)

Laurent Lespez - Université de Paris Est Créteil (LGP)

Zohra Lili Chabaane - Institut national agronomique, Université de Carthage, Tunisie

M

Gil Mahe - IRD (HydroSciences)

Katarzyna Marini - MedECC

Olivier Merlin - CNRS (CESBIO)

Paolo Montagna - Insitut des sciences polaires (ISP-CNR), Italie

P

Angel Pérez Ruzafa - Université de Murcia, Espagne

Thierry Pérez - CNRS (IMBE)

Odile Peyron - CNRS (ISEM)

R

Otmane Raji - Université Mohammed VI Polytechnique, Maroc

Aurélien Ribes - Météo France (CNRM)

S

Pierre Sabatier - Université Savoie Mont Blanc (EDYTEM)

Mehdi Saqalli - CNRS (GEODE)

Fathallah Sghir - Office régional de mise en valeur agricole du Haouz (ORMVAH), Maroc

Marie-Alexandrine Sicre - CNRS (LOCEAN)

Vincent Simonneaux - IRD (CESBIO)

Maria Snoussi - Université Mohammed V, Maroc

Samuel Somot - Météo France (CNRM)

Claudia Speciale - Institut national de géophysique et de vulcanologie (INGV), Observatoire du Vésuve, Italie

T

Isabelle Taupier-Letage - CNRS (MIO)

Adrien Tavernier - IRD (CESBIO)

Bernadette Tessier - CNRS (M2C)

Yves Trambly - IRD HSM)

V

Boris Vannière - CNRS (Laboratoire Chrono-environnement)

Laurence Vidal - Aix Marseille Université (CEREGE)

Freddy Vinet - Université de Montpellier 3 (GRED)

Z

Mehrez Zribi - CNRS (CESBIO)